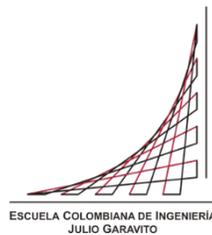


**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**

Maestría en Ingeniería Electrónica

**AUTOMATIZACIÓN DEL RIEGO A PARTIR DE LOS PARÁMETROS  
HIDRODINÁMICOS DEL SUSTRATO EN UN CULTIVO DE ARÁNDANOS**

**Manuel Eduardo Gantiva Osorio**



Bogotá D.C., noviembre del 2022

**AUTOMATIZACIÓN DEL RIEGO A PARTIR DE LOS PARÁMETROS  
HIDRODINÁMICOS DEL SUSTRATO EN UN CULTIVO DE ARÁNDANOS**

**Manuel Eduardo Gantiva Osorio**

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Electrónica con énfasis  
en Automatización Industrial

**Dr. Alexander Pérez Ruiz**

Director del trabajo de grado

**Dr. Javier Chaparro Preciado**

Co-director del trabajo de grado

Jurado:

Jurado:

Jurado:

Nota de Aceptación:

El trabajo de grado titulado “AUTOMATIZACIÓN DEL RIEGO A PARTIR DE LOS PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS DEL SUSTRATO EN UN CULTIVO DE ARÁNDANOS” presentada por Manuel Eduardo Gantiva Osorio, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Electrónica con énfasis en Automatización Industrial.

---

Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D.C., noviembre del 2022

# Agradecimientos

Son muchas las personas que apoyaron este trabajo, pero primeramente debo de agradecer a Dios quien fue aquel que me dio la fuerza y paciencia para iniciar y terminar este proyecto, guiándome por el camino correcto y acompañándome en los momentos más difíciles.

Después el agradecimiento es a mi familia, mis padres, Manuel Gonzalo Gantiva y Blanca Inés Osorio, personas que siempre confiaron y fomentaron mis ideas, que durante los momentos más duros me brindaron su apoyo y confianza, que con su sacrificio y dedicación contribuyeron a este logro; a mis hermanas, Elsa Gantiva y Adriana Gantiva, les agradezco su ejemplo, el cual desde muy joven me enseñó la disciplina y el valor de la educación; a mi novia Biviana Preciado le debo un agradecimiento profundo, ella fue la persona que me acompañó e impulsó en este largo camino, quien siempre me brindó su amor y cariño cuando más lo necesitaba y que con sus comentarios me dio felicidad en los momentos más oscuros; a mis sobrinos, gracias por llegar a mi vida y llenarme de felicidad y ánimo para continuar; a 4JM, mis hermanos de corazón un agradecimiento por su compañía en todas esas noches de duro trabajo.

Un agradecimiento muy especial a mis directores los ingenieros Alexander Pérez y Javier Chaparro, personas que siempre aportaron a mi crecimiento profesional, con sus conocimientos y experiencias, que, sin importar el momento, escucharon mis inquietudes y me guiaron por el camino del conocimiento. No olvidar al ingeniero Enrique Estupiñan quien desde el área de control apoyó y orientó mi proyecto; y al ingeniero Hernán Paz, quien me abrió las puertas de la maestría desde el primer día, dándome la oportunidad de volver a mi institución.

También un agradecimiento a la señora Anadelia Preciado y a Martin Ramos, personas que me permitieron trabajar en su finca y me apoyaron en la ardua labor agrícola, sin pedir nada a cambio. Finalmente, quiero dar un homenaje a mis abuelos paternos y maternos, personas que contribuyeron a mi formación personal y que siempre llevaré en mi corazón, adonde sea que vaya.

## Resumen

El sector agroindustrial colombiano cuenta con recursos naturales que le permiten perfilarse como un productor destacado en el cultivo de arándanos y para conseguirlo, se convierte en un objetivo primordial el actualizar sus técnicas a fin de implementar procesos eficientes en las tareas de riego y fertilización. Las nuevas tecnologías contribuyen en este objetivo aportando sistemas de control que aseguren la integridad del proceso, brindando la posibilidad de ser más competitivos en el mercado nacional e internacional. El sustrato como soporte físico y medio por el cual se entrega agua y nutrientes, es una parte vital en el desarrollo y producción de un cultivo, a tal punto que conocer sus características físicas permitió identificar la dinámica del agua y las condiciones óptimas para la planta.

En este trabajo, se diseñó e implementó un sistema de control automatizado de riego por goteo, que a partir de los parámetros hidrodinámicos del sustrato, asegura la disponibilidad de agua y nutrientes en la zona radicular de la planta. Para conseguir este objetivo se modeló y caracterizó el sustrato, se implementó un control PI de presión de la mezcla de agua y nutrientes y una red de monitoreo del sistema, y se propusieron dos controladores de humedad, los cuales variaron los tiempos de riego en función de la respuesta de humedad presente para cada una de las líneas del cultivo; finalmente se comparó y evaluó sus repuestas frente a una línea donde se mantuvo el riego tradicional del agricultor.

## **Abstract**

The Colombian agro-industrial sector has natural resources that allow it to stand out as a leading producer in the cultivation of blueberries. To achieve this, it becomes a primary objective to update its techniques to implement efficient processes in irrigation and fertilization tasks. New technologies contribute to this objective by providing control systems that ensure the integrity of the process, providing the possibility of being more competitive in national and international markets. The substrate as physical support and medium through which water and nutrients are delivered is a vital part of the development and production of a crop, to the point that knowing its physical characteristics proved to identify the dynamics of water and the optimal conditions for the plant.

In this work, an automated drip irrigation control system was conditioned and implemented, which, based on the hydrodynamic parameters of the substrate, will ensure the availability of water and nutrients in the root zone of the plant, for this purpose the substrate was modeled and characterized. A pressure PI control and monitoring network were implemented as well as two humidity controllers, which modified the irrigation times depending on the humidity response for each crop line. Finally compared and evaluated their answers against a line where the farmer's traditional irrigation was maintained.

# Contenido

|  |     |
|--|-----|
| Agradecimientos .....  | i   |
| Resumen.....   | ii  |
| Abstract.....  | iii |
| Contenido.....   | iv  |
| Lista de Tablas .....  | ix  |
| Lista de Figuras.....  | xi  |
| 1. Introducción .....  | 1   |
| 1.1. Pregunta problema.....                                    | 4   |
| 2. Objetivos .....   | 4   |
| 2.1. Objetivos General.....                                    | 4   |
| 2.2. Objetivos Específicos .....                               | 4   |
| 3. Marco Teórico.....  | 5   |
| 3.1. Agricultura de precisión en el riego .....                | 5   |
| 3.2. El cultivo de Arándanos .....                             | 6   |
| 3.3. El sustrato .....   | 9   |
| 3.3.1. Propiedades químicas .....                              | 10  |
| 3.3.2. Propiedades físicas .....                               | 12  |
| 3.4. Agua de riego.....  | 16  |
| 3.5. El fertirriego por goteo en los cultivos de Arándano..... | 17  |
| 3.6. Programación del riego.....                               | 20  |
| 3.7. Sistemas de riego automatizado .....                      | 21  |
| 4. Metodología .....   | 24  |
| 4.1. Adecuación y selección de los sensores .....              | 24  |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 4.1.1.  | Elección de los sensores de suelo.....                             | 25 |
| 4.1.2.  | Sensor de humedad zona de lixiviación .....                        | 27 |
| 4.1.3.  | Sensor calidad de Agua.....  | 28 |
| 4.1.4.  | Sensor temperatura y humedad del ambiente.....                     | 30 |
| 4.2.    | Caracterización de los parámetros físicos del sustrato .....       | 31 |
| 4.2.1.  | Curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica.....     | 31 |
| 4.2.2.  | Pruebas con pulsos de flujo sin planta .....                       | 33 |
| 4.2.3.  | Pruebas laterales bulbo húmedo zona radicular .....                | 37 |
| 4.2.4.  | Pruebas laterales bulbo húmedo zona lixiviación .....              | 38 |
| 4.3.    | Implementación del controlador velocidad en la bomba de riego..... | 39 |
| 4.3.1.  | Diagrama de bloques control de velocidad .....                     | 39 |
| 4.3.2.  | Diseño circuito Microcontrolador .....                             | 40 |
| 4.3.3.  | Sensores de presión y flujo.....                                   | 41 |
| 4.3.4.  | Convertidores de nivel lógico .....                                | 43 |
| 4.3.5.  | Diseño driver bomba de agua.....                                   | 43 |
| 4.3.6.  | Diseño control válvulas de apertura .....                          | 44 |
| 4.3.7.  | Diseño PCB control de velocidad .....                              | 45 |
| 4.3.8.  | Algoritmo microcontrolador .....                                   | 45 |
| 4.3.9.  | Montaje de la tubería e instalación del control de velocidad ..... | 47 |
| 4.3.10. | Caracterización del sistema de riego y diseño del PI.....          | 49 |
| 4.4.    | Diseño del sistema automatizado de riego y monitoreo .....         | 51 |
| 4.4.1.  | Elección de la red de comunicación .....                           | 51 |
| 4.4.2.  | Diagrama de bloques de los módulos de medición .....               | 52 |
| 4.4.3.  | Elección del módulo WIFI y diseño del circuito.....                | 53 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 4.4.4.   | Conversor serial TTL a RS485.....                                       | 54 |
| 4.4.5.   | Sensor análogo y digital .....  | 55 |
| 4.4.6.   | Diseño de la fuente de alimentación .....                               | 55 |
| 4.4.7.   | Modo bajo consumo de energía .....                                      | 59 |
| 4.4.8.   | Diseño PCB módulos .....  | 59 |
| 4.4.9.   | Algoritmo del microcontrolador.....                                     | 60 |
| 4.4.10.  | Diseño de la base de datos y algoritmo de consulta.....                 | 61 |
| 4.5.     | Implementación del sistema en el cultivo .....                          | 64 |
| 4.5.1.   | Instalación y configuración de la red de monitoreo .....                | 65 |
| 4.5.2.   | Algoritmo de supervisión y riego.....                                   | 66 |
| 4.5.3.   | Definición de los controladores.....                                    | 68 |
| 4.5.3.1. | Controlador de lógica difusa .....                                      | 72 |
| 4.5.3.2. | Controlador proporcional al error cuadrático.....                       | 75 |
| 5.       | Resultados y análisis .....   | 76 |
| 5.1.     | Resultados del modelamiento de la humedad en un riego.....              | 76 |
| 5.2.     | Resultados implementación del control PI .....                          | 76 |
| 5.3.     | Resultados implementación panel solar.....                              | 80 |
| 5.4.     | Resultados de los controladores.....                                    | 82 |
| 5.4.1.   | Controlador de lógica difusa .....                                      | 82 |
| 5.4.2.   | Controlador proporcional al error cuadrático.....                       | 87 |
| 5.4.3.   | Respuesta del riego tradicional .....                                   | 91 |
| 5.5.     | Resultados consumo de agua y disponibilidad de nutrientes.....          | 93 |
| 5.5.1.   | Conductividad eléctrica control difuso .....                            | 95 |
| 5.5.2.   | Conductividad eléctrica controlador proporcional al error cuadrático... | 96 |

|        |  |                                      |
|--------|--|--------------------------------------|
| 5.5.3. | Conductividad eléctrica riego tradicional .....            | 98                                   |
| 5.5.4. | Comparación de resultados simulados y datos reales .....   | 99                                   |
| 6.     | Conclusiones y recomendaciones .....                       | 100                                  |
| 6.1.   | Conclusiones.....  | 100                                  |
| 6.2.   | Recomendaciones y trabajos futuros .....                   | 102                                  |
|        | Referencias Bibliográficas .....                           | 104                                  |
|        | Anexos .....   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| A.     | Sensores de suelo disponibles en el mercado .....          | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | JXBS-3001-TDR .....  | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | GroPoint Pro SDI-12 soil moisture sensor .....             | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | TBSMP03 SDI-12 soil moisture/temperature probe;            | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | Drill and Drop probe accurately measures soil.....;        | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | MEC-10 soil moisture, temperature, EC y pH sensor;         | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| B.     | Validación y calibración de sensores .....                 | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | Validación sensor de humedad volumétrica MEL-10;           | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | Validación sensor de Conductividad eléctrica MEL-10;       | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | Validación sensor pH Soil .....                            | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | Calibración sensor conductividad eléctrica TDS Meter v1.0; | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
|        | Calibración sensor capacitivo de humedad V1.2....;         | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| C.     | Pruebas organolépticas al sustrato .....                   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| D.     | Resultados del ajuste parámetros .....                     | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |

E. Materiales PCB control de velocidad y módulos de medición ... **¡Error! Marcador no definido.**

F. Analogía a cultivos de mayor extensión ..... **¡Error! Marcador no definido.**

CWF500..... **¡Error! Marcador no definido.**

G. Calibración sensor de Flujo ..... **¡Error! Marcador no definido.**

H. Bomba de riego ..... **¡Error! Marcador no definido.**

I. Comparación de las redes de comunicación ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Bus RS485 con protocolo Modbus RTU ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Red Wifi con protocolo TCP/IP..... **¡Error! Marcador no definido.**

J. Ordenador de placa reducida ..... **¡Error! Marcador no definido.**

K. Resultados conectividad red Wifi ..... **¡Error! Marcador no definido.**

L. Algoritmo implementado en el micro-controlador dsPIC304011 ..... **¡Error! Marcador no definido.**

M. Algoritmo implementado en las ESP-12F Módulos Materas **¡Error! Marcador no definido.**

N. Algoritmo implementado en las ESP-12F Módulo Fuente.... **¡Error! Marcador no definido.**

O. Algoritmo implementado en la Raspberry Pi Zero **¡Error! Marcador no definido.**

P. Riegos en segunda y tercera línea..... **¡Error! Marcador no definido.**

Q. Simulación de los controladores ..... **¡Error! Marcador no definido.**

## Lista de Tablas

|                 |   |                                      |
|-----------------|---|--------------------------------------|
| <b>Tabla 1</b>  | Numero de planta por hilera de la unidad de riego.....                                  | 25                                   |
| <b>Tabla 2</b>  | Comparativo especificaciones técnicas Sensores .....                                    | 26                                   |
| <b>Tabla 3</b>  | Especificaciones técnicas sensor de humedad capacitivo v1.2.....                        | 27                                   |
| <b>Tabla 4</b>  | Especificaciones técnicas sensor TDS Meter v1.0 .....                                   | 28                                   |
| <b>Tabla 5</b>  | Especificaciones técnicas sonda de temperatura DS18B20.....                             | 29                                   |
| <b>Tabla 6</b>  | Especificaciones técnicas sensor AM2302 .....   | 30                                   |
| <b>Tabla 7</b>  | Composición del sustrato.....   | 31                                   |
| <b>Tabla 8</b>  | Rangos disponibilidad de agua .....   | 32                                   |
| <b>Tabla 9</b>  | Especificaciones técnicas del transductor de presión .....                              | 42                                   |
| <b>Tabla 10</b> | Especificaciones técnicas sensor de flujo .....   | 42                                   |
| <b>Tabla 11</b> | Tabla de Corrientes por dispositivo .....   | 56                                   |
| <b>Tabla 12</b> | IP fija asignada por módulo .....   | 66                                   |
| <b>Tabla 13</b> | Resultados de consumo por línea de riego.....   | 79                                   |
| <b>Tabla 14</b> | Resultado estado carga de batería.....  | 81                                   |
| <b>Tabla 15</b> | Especificaciones primer riego control difuso .....                                      | 82                                   |
| <b>Tabla 16</b> | Especificaciones segundo riego control difuso.....                                      | 83                                   |
| <b>Tabla 17</b> | Especificaciones tercer riego control difuso.....                                       | 84                                   |
| <b>Tabla 18</b> | Especificaciones conjunto de riegos control difuso.....                                 | 85                                   |
| <b>Tabla 19</b> | Especificaciones primer riego control proporcional.....                                 | 87                                   |
| <b>Tabla 20</b> | Especificaciones segundo riego control proporcional .....                               | 88                                   |
| <b>Tabla 21</b> | Especificaciones tercer riego control proporcional .....                                | 89                                   |
| <b>Tabla 22</b> | Especificaciones secuencia de riegos riego control proporcional.....                    | 90                                   |
| <b>Tabla 23</b> | Especificaciones riego tradicional .....  | 92                                   |
| <b>Tabla 24</b> | Especificaciones técnicas JXBS-3001-TDR adaptado de (JXCT, 2021)<br>.....               | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Tabla 25</b> | Especificaciones técnicas GroPoint Pro adaptado de (Riot Technology Corp,<br>2021)..... | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |

**Tabla 26** Especificaciones técnicas TBSMP03 SDI-12 adaptado de (Tekbox Digital Solutions, 2021).....**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 27** Especificaciones técnicas Drill and Drop adaptado de (Sentek, 2021) . **¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 28** Especificaciones técnicas MEC-10 Soil adaptado de (Dalian Endeavour Technology Co., Ltd, 2021).....**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 29** Especificaciones técnicas Soil pH Sensor adaptado de (Dalian Endeavour Technology Co., Ltd, 2021).....**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 30** Datos validación humedad volumétrica del sensor MEL-10 A ..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 31** Datos validación conductividad eléctrica del sensor MEL-10 A ..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 32** Datos validación pH del sensor pH Soil A .....**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 33** Datos validación conductividad eléctrica del sensor TDS Meter ..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 34** Datos calibración sensor capacitivo de humedad V1.2 A;**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 35** Parámetros de las curvas ajustados .....**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 36** Especificaciones técnicas motor WEG TE1BFOXO;**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 37** Especificaciones técnicas bomba HE 2 100-2 **¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 38** Especificaciones técnicas CWF500 .....**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 39** Especificaciones técnicas bomba de agua 12V;**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 40** Especificaciones técnicas ESP32 DOIT KIT DEV V-1;**¡Error! Marcador no definido.**

**Tabla 41** Resumen riegos varios .....**¡Error! Marcador no definido.**

# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> Estados de desarrollo de la yema floral (A, yema cerrada; B, yema hinchada; C, quiebre de yema; D, racimo apretado); de la yema vegetativa (E, punta verde temprana; F, punta verde tardía; G, brotes en expansión), de la flor (H, botón rosado temprano; I, botón rosado tardío; J, inicio floración; K, plena floración; L, caída de pétalos); y, del fruto (M, fruto verde; N; pinta; O, 25% cobertura azul; P, 75% cobertura azul; Q; inducción yemas para siguiente temporada). Fuente: Adaptado de Schilder et al. (Schilder, Isaacs, Hanson, & Cline, 2004) por Pinochet, Artacho, y Maraboli (Pinochet, Artacho, & Maraboli, 2014)..... | 8  |
| <b>Figura 2</b> Diagrama de Troug de nutrientes disponibles. Cada nutriente es representado con una banda. Adaptado de (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012) .....   | 10 |
| <b>Figura 3</b> Curva de calibración de agua de un sustrato. Tomado De Boodt et al. (De Boodt, Verdonck, & Cappaert, 1973).....  | 15 |
| <b>Figura 4</b> Parámetros utilizados para modelar la curva de retención de humedad. Fuente: van Genuchten et al. (Van Genuchten, Leij, Yates, & others, 1991) tomado de (Quintero, González, & Guzmán, 2011) .....  | 16 |
| <b>Figura 5</b> Forma del bulbo húmedo según las características físicas. Adaptado de Mendoza (2013).....  | 18 |
| <b>Figura 6</b> Esquema distribución de hileras en la unidad de riego .....  | 25 |
| <b>Figura 7</b> Sensor de humedad capacitivo v1.2 anticorrosivo .....  | 27 |
| <b>Figura 8</b> Sensor de conductividad eléctrica TDS Meter v1.0 .....   | 28 |
| <b>Figura 9</b> Sonda de temperatura sumergible DS18B20 .....  | 29 |
| <b>Figura 10</b> Sensor de temperatura y humedad ambiente AM2302 .....   | 30 |
| <b>Figura 11</b> Curva de caracterización del sustrato modelo de Van Genuchten et al. (1991) .....   | 32 |
| <b>Figura 12</b> Curva de conductividad hidráulica ajustada al modelo de Van Genuchten et al. (1991) .....   | 32 |
| <b>Figura 13</b> Respuesta al pulso de 1,48 L/min.....   | 33 |
| <b>Figura 14</b> Pulso de agua a 0,375 L/min con humedad residual en dos profundidades ..  | 34 |

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Figura 15</b> | Pulso de agua a 0,375 L/min con humedad residual en todo el sustrato..... | 35 |
| <b>Figura 16</b> | Pulso de agua de 30 segundos con humedad residual .....                   | 36 |
| <b>Figura 17</b> | Tren de pulsos de a 0,375 L/min .....                                     | 36 |
| <b>Figura 18</b> | Pruebas laterales del bulbo Húmedo a 15 cm de profundidad .....           | 37 |
| <b>Figura 19</b> | Pruebas laterales del bulbo Húmedo a 30 cm de profundidad .....           | 38 |
| <b>Figura 20</b> | Diagrama de bloques control de velocidad .....                            | 40 |
| <b>Figura 21</b> | Circuito conexiones del dsPIC30F4011 .....                                | 41 |
| <b>Figura 22</b> | Circuito convertidor de Voltaje a 5V y bornera a 12V .....                | 41 |
| <b>Figura 23</b> | Circuito conexión sensores de presión y flujo.....                        | 42 |
| <b>Figura 24</b> | Conversores de nivel lógico .....   | 43 |
| <b>Figura 25</b> | Puerto conexión para el ordenador.....                                    | 43 |
| <b>Figura 26</b> | Circuito de conmutación para bomba de agua .....                          | 44 |
| <b>Figura 27</b> | Circuito de control para válvulas de apertura.....                        | 44 |
| <b>Figura 28</b> | Placa PCB control de velocidad en el software Kicad .....                 | 45 |
| <b>Figura 29</b> | Flujo del algoritmo implementado en dsPIC30F4011 .....                    | 46 |
| <b>Figura 30</b> | Montaje bomba de riego.....   | 47 |
| <b>Figura 31</b> | Electroválvula 12 voltios para control de riego .....                     | 48 |
| <b>Figura 32</b> | Caja eléctrica para control de velocidad .....                            | 48 |
| <b>Figura 33</b> | Resultados de la simulación del control PI de presión.....                | 50 |
| <b>Figura 34</b> | Diagramas de bloques módulos de medición.....                             | 53 |
| <b>Figura 35</b> | Esquemático módulo wifi.....  | 54 |
| <b>Figura 36</b> | Conexión del módulo HW-0519 y borneras sensores .....                     | 54 |
| <b>Figura 37</b> | Conexión de los sensores digital y análogo .....                          | 55 |
| <b>Figura 38</b> | Circuito de control para alimentación de sensores .....                   | 56 |
| <b>Figura 39</b> | Módulo convertidor de voltaje MP2307 y grafica de eficiencia .....        | 57 |
| <b>Figura 40</b> | Placa electrónica desarrollada en el software Kicad .....                 | 60 |
| <b>Figura 41</b> | Flujo del algoritmo implementado en los módulos de medición .....         | 61 |
| <b>Figura 42</b> | Diagrama de flujo solicitud de medición y datos .....                     | 62 |
| <b>Figura 43</b> | Diagrama entidad relación de la base de datos local.....                  | 62 |
| <b>Figura 44</b> | Esquema de distribución del Sistema automatizado .....                    | 64 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 45</b> Módulos de censado de materas ensamblados e instalados .....  | 65 |
| <b>Figura 46</b> Access Point instalado y configurado .....                    | 66 |
| <b>Figura 47</b> Diagrama de flujo de supervisión por línea de riego .....     | 67 |
| <b>Figura 48</b> Diagrama de flujo para riego.....                             | 67 |
| <b>Figura 49</b> Riego con sobre picó de humedad.....                          | 69 |
| <b>Figura 50</b> Riego con elevado retardo y delta alto .....                  | 69 |
| <b>Figura 51</b> Riego con elevado retardo y delta alto .....                  | 70 |
| <b>Figura 52</b> Riego con respuesta ideal y retardo grande.....               | 71 |
| <b>Figura 53</b> Respuesta ideal de la humedad.....                            | 71 |
| <b>Figura 54</b> Arquitectura del controlador de humedad.....                  | 72 |
| <b>Figura 55</b> Funciones de membrecía para el Error Final.....               | 73 |
| <b>Figura 56</b> Funciones de membrecía para el Error Medio .....              | 73 |
| <b>Figura 57</b> Funciones de membrecía para el Delta del Error Medio.....     | 74 |
| <b>Figura 58</b> Funciones de membrecía para la Salida en delta de tiempo..... | 74 |
| <b>Figura 59</b> Superficies de control.....                                   | 74 |
| <b>Figura 60</b> Regresiones lineales para las constantes proporcionales ..... | 75 |
| <b>Figura 61</b> Planta simulada a un riego de 35 segundo .....                | 76 |
| <b>Figura 62</b> Presión y flujo en el riego con goteros hacia abajo.....      | 77 |
| <b>Figura 63</b> Goteros corregidos .....                                      | 77 |
| <b>Figura 64</b> Presión y flujo en el riego con goteros hacia arriba .....    | 78 |
| <b>Figura 65</b> PWM aplicado y presión de salida línea 3 .....                | 78 |
| <b>Figura 66</b> PWM aplicado y presión de salida línea 1 .....                | 79 |
| <b>Figura 67</b> Muestra de agua de un gotero.....                             | 80 |
| <b>Figura 68</b> Arreglo de paneles solares instalado en el cultivo .....      | 81 |
| <b>Figura 69</b> Respuesta humedad primer riego control difuso.....            | 83 |
| <b>Figura 70</b> Respuesta humedad segundo riego control difuso .....          | 84 |
| <b>Figura 71</b> Respuesta humedad tercer riego control difuso .....           | 85 |
| <b>Figura 72</b> Respuesta humedad secuencia de riegos control difuso.....     | 86 |
| <b>Figura 73</b> Respuesta de la humedad frente a un día de lluvia .....       | 87 |
| <b>Figura 74</b> Respuesta humedad primer riego control proporcional .....     | 88 |

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| <b>Figura 75</b> Respuesta humedad segundo riego control proporcional.....  | 89                                   |
| <b>Figura 76</b> Respuesta humedad tercer riego control proporcional .....  | 90                                   |
| <b>Figura 77</b> Respuesta humedad secuencia de riegos control proporcional .....   | 91                                   |
| <b>Figura 78</b> Respuestas riego tradicional.....  | 92                                   |
| <b>Figura 79</b> Respuesta de la humedad en 24 Horas línea 1 .....  | 93                                   |
| <b>Figura 80</b> Respuesta de la humedad en 24 Horas línea 2 .....  | 94                                   |
| <b>Figura 81</b> Respuesta de la humedad en 24 Horas línea 3 .....  | 94                                   |
| <b>Figura 82</b> Consumo por planta en las tres líneas de riego .....   | 95                                   |
| <b>Figura 83</b> Respuesta de humedad y CE control difuso.....  | 96                                   |
| <b>Figura 84</b> Respuesta CE secuencia de riegos control difuso .....  | 96                                   |
| <b>Figura 85</b> Respuesta de humedad y CE control proporcional .....   | 97                                   |
| <b>Figura 86</b> Respuesta CE secuencia de riegos control proporcional.....   | 97                                   |
| <b>Figura 87</b> Respuesta de humedad y CE riego tradicional.....   | 98                                   |
| <b>Figura 88</b> Respuesta de humedad y CE por lluvia.....  | 98                                   |
| <b>Figura 89</b> Respuesta del riego real y simulado .....  | 99                                   |
| <b>Figura 90</b> Sensor JXBS-3001-TDR adaptado de (JXCT, 2021); <b>Error! Marcador no definido.</b>                         |                                      |
| <b>Figura 91</b> Sensor GroPoint Pro adaptado de (Riot Technology Corp, 2021) .....   | <b>¡Error!</b>                       |
| <b>Marcador no definido.</b>  |                                      |
| <b>Figura 92</b> Sensor TBSMP03 SDI-12 adaptado de (Tekbox Digital Solutions, 2021)<br>.....                                | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 93</b> Sensor Drill and Drop adaptado de (Sentek, 2021); <b>Error! Marcador no definido.</b>                      |                                      |
| <b>Figura 94</b> MEC-10 soil moisture, temperature, EC sensor adaptado de (Dalian Endeavour Technology Co., Ltd, 2021)..... | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 95</b> Circuito para lectura de sensores en el Laboratorio; <b>Error! Marcador no definido.</b>                   |                                      |
| <b>Figura 96</b> Muestra de 100 gramos de sustrato en bolsa Ziploc hermética.....   | <b>¡Error!</b>                       |
| <b>Marcador no definido.</b>  |                                      |

**Figura 97** Muestra de sustrato seco en recipiente de 200 ml;**Error! Marcador no definido.**

**Figura 98** Probeta con 5 ml de agua destilada .....**¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 99** Medición del sensor MEL-10 A para la primera aplicación de 5 ml ... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 100** Muestra de suelo saturada a un volumen de aproximadamente 150 ml .....**¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 101** Sensor MEL-10 A en solución calibradora a 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;**Error! Marcador no definido.**

**Figura 102** Medición del sensor MEL-10 A para solución calibradora a 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  .....**¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 103** Volumen de medición sensores de suelo (Dalian Endeavour Technology Co., Ltd, 2021) .....**¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 104** Sensor pH Soil A en solución tampón pH 7.00;**Error! Marcador no definido.**

**Figura 105** Medición del sensor pH Soil A para solución tampón pH 4.00 ..... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 106** Sensor TDS Meter y sonda en solución calibradora a 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ... **¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 107** Medición del sensor TDS Meter para solución calibradora a 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  .....**¡Error! Marcador no definido.**

**Figura 108** Sensor capacitivo de humedad V1.2 en sustrato seco;**Error! Marcador no definido.**

**Figura 109** Voltaje de salida sensor capacitivo de humedad V1.2;**Error! Marcador no definido.**

**Figura 110** Curva sensor capacitivo de humedad V1.2 .;**Error! Marcador no definido.**

**Figura 111** Bolsa de sustrato sin cultivo a tres profundidades;**Error! Marcador no definido.**

**Figura 112** Resultados humedad volumétrica drenaje interno;**Error! Marcador no definido.**

- Figura 113** Variación de humedad primeras 12 horas ...; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 114** Delta de humedad vs logaritmo del tiempo en minutos; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 115** Conductividad Hidráulica procedimiento de Libardi et al. (1980) ....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 116** Motor y bomba de riego cultivo la Calera...; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 117** Montaje para la identificación de la curva característica; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 118** Calibración del sensor de flujo YF-201 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 119** Planos y cotas de la electrobomba de riego.; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 120** Curva característica de presión vs flujo .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 121** Topología bus red RS-485 con protocolo Modbus; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 122** Topología estrella red Wifi con protocolo TCP/IP; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 123** Resultados comando ping 192.168.94.....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 124** Respuesta humedad Riego Id 1 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 125** Respuesta humedad Riego Id 2 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 126** Respuesta humedad Riego Id 3 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 127** Respuesta humedad Riego Id 4 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 128** Respuesta humedad Riego Id 5 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 129** Respuesta humedad Riego Id 6 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 130** Respuesta humedad Riego Id 7 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 131** Respuesta humedad Riego Id 8 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 132** Respuesta humedad Riego Id 9 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 133** Respuesta humedad Riego Id 10 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 134** Respuesta humedad Riego Id 11 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 135** Respuesta humedad Riego Id 12 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 136** Respuesta humedad Riego Id 13 .....; **Error! Marcador no definido.**
- Figura 137** Respuesta humedad Riego Id 14 .....; **Error! Marcador no definido.**

**Figura 138** Respuesta humedad Riego Id 15 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 139** Respuesta humedad Riego Id 16 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 140** Respuesta humedad Riego Id 17 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 141** Respuesta humedad Riego Id 18 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 142** Respuesta humedad Riego Id 19 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 143** Respuesta humedad Riego Id 20 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 144** Respuesta humedad Riego Id 21 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 145** Respuesta humedad Riego Id 22 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 146** Respuesta humedad Riego Id 23 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 147** Respuesta humedad Riego Id 24 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 148** Respuesta humedad Riego Id 25 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 149** Respuesta humedad Riego Id 26 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 150** Respuesta humedad Riego Id 27 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 151** Respuesta humedad Riego Id 28 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 152** Respuesta humedad Riego Id 29 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 153** Respuesta humedad Riego Id 30 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 154** Respuesta humedad Riego Id 31 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 155** Respuesta humedad Riego Id 32 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 156** Respuesta humedad Riego Id 33 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 157** Respuesta humedad Riego Id 34 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 158** Respuesta humedad Riego Id 35 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 159** Respuesta humedad Riego Id 36 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 160** Respuesta humedad Riego Id 37 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 161** Respuesta humedad Riego Id 38 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 162** Respuesta humedad Riego Id 39 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 163** Respuesta humedad Riego Id 40 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 164** Respuesta humedad Riego Id 41 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 165** Respuesta humedad Riego Id 42 .....;Error! Marcador no definido.  
**Figura 166** Resultado respuesta control difuso con tiempo de 26,8 s;Error! Marcador no definido.

**Figura 167** Resultado respuesta control proporcional con tiempo de 25,3 s ..... **¡Error!**  
**Marcador no definido.**

# 1. Introducción

Colombia cuenta con diferentes pisos térmicos en sus regiones y por su ubicación geoespacial en la zona intertropical, no presenta estaciones a lo largo del año. Cuenta con alrededor de 40 millones de hectáreas que pueden ser utilizadas para la agricultura con gran disponibilidad de agua por sus afluentes hídricos y costas sobre dos océanos, que cuentan con puertos y esto le permite tener un alto potencial para el desarrollo agrícola (Valencia Pinzón, 2019). Por tal razón es de vital importancia que las diferentes ramas de la investigación busquen apoyar y fomentar el crecimiento del sector agrícola en un país como el nuestro, siempre teniendo como enfoque mejorar la calidad del producto y eficiencia de los procesos.

Distintos acontecimientos a nivel mundial como la globalización, la innovación en nuevas tecnologías, las restricciones ambientales y el considerable aumento en los precios de los bienes agrícolas, han llevado a que el sector agrícola de diferentes países adquiriera un rol importante en el desarrollo y a plantear una visión mucho más completa en la que también se consideran las diferentes relaciones con otros sectores. Esto lleva a países como Colombia, que cuentan con una dotación de recursos agrícolas no explotados plenamente, a considerar el sector agroindustrial como un pilar fundamental del desarrollo económico (Perfetti, Balcázar, Hernández, & Leibovich, 2013). Con el fin de que el sector agroindustrial pueda llegar a ser competitivo a nivel mundial se debe buscar incursionar en diferentes mercados con variedad de productos agrícolas que tengan una alta demanda, de la mano con la implementación de nuevas tecnologías que permitan el constante mejoramiento del sector.

De acuerdo con la publicación de la revista *Blueberries Consulting* se menciona que el arándano es el segundo *berrie* con mayor demanda en el mundo y además cita al presidente de la Asociación del Arándano de China y docente de la Universidad de Jilin, Li Yadog, donde expone que la producción de arándanos presentó un incremento de 23.600 millones de toneladas en 1995 a 66.400 toneladas en 2015. Por otra parte, sugiere que China se proyecta como uno de los gigantes en la industria del arándano con una producción que llegará a las

400.000 toneladas anuales, valorado en 40.000 millones de RMB (6.147 millones de USD) (Blueberries Consulting, 2018). Esto convertiría el mercado de arándanos, en uno de los más atractivos del sector agrícola para diferentes países, que como Colombia, pueden ofrecer estos productos de alta calidad con regularidad a lo largo de las 52 semanas del año.

El panorama del cultivo de arándano en Colombia también es muy prometedor. En una publicación realizada por la revista Agronegocios en el 2019, se afirma que existen alrededor de 450 hectáreas sembradas de arándano azul en Colombia, de las cuales la mayoría se encuentran concentradas en Cundinamarca y Boyacá. El cultivo ha tenido un crecimiento exponencial que pasó de tener 120 hectáreas en 2017 a 400 en el año 2019 y puede proyectar un crecimiento para el 2021 de más de 1.000 hectáreas sembradas en todo el país. También resalta la ventaja con la que cuenta Colombia al estar ubicado en la línea del ecuador, que puede tener una producción constante durante todo el año, condición que nos favorece frente a los mayores exportadores de la región como Chile o Estados Unidos. Por otra parte, la ubicación del altiplano Cundiboyacense por encima de los 2.200 metros a nivel del mar, hace que se presente una mayor acumulación de azúcares en la fruta, convirtiendo al arándano producido en esta zona geográfica, en un fruto más atractivo para el comprador (Lorduy, 2019). Todos estos factores convierten al departamento de Cundinamarca en uno de los focos de siembra de arándano con mayor proyección en el mercado nacional e internacional.

El arándano no es una planta originaria de nuestro país pero ha presentado una excelente adaptación a las condiciones climáticas y del suelo de acuerdo a lo expuesto por Proplantas S.A. (2015) en (Farfán Casallas, 2016) donde afirma que se trata de un cultivo nuevo y su comportamiento o condiciones de adaptabilidad son variables, siendo necesario para su adecuado manejo un constante diagnóstico del cultivo. Pone como ejemplo, que la planta en otros países de clima templado tarda en iniciar su producción tres años y en Colombia tarda entre 1 y 1.5 años en las zonas frías con temperaturas entre los 6° y 13°C, además que alcanza su madurez entre 5 a 7 años, logrando producciones de 8 a 10 toneladas por hectárea y una estimación de 1500Kg a 2000Kg en el primer año de producción.

Aunque las condiciones climáticas de Cundinamarca favorecen el desarrollo de la planta como se ha expuesto anteriormente, también existen condiciones que generan dificultades

como por ejemplo las heladas y las precipitaciones en ciertas épocas del año, respecto a lo que afirma Farfán sobre las condiciones del arándano en Colombia “es importante tener en cuenta el requerimiento o la cantidad de horas frío, pues también de ello depende la adaptación ideal de las plantas a condiciones semejantes a la zona de la sabana” (2016, pág. 82). El monitoreo del cultivo permite tener una mejor respuesta en el desarrollo de la planta y alcanzar una correcta gestión de los recursos, con el fin de alcanzar un mejor rendimiento.

En un cultivo de arándanos existen distintas variables como: temperatura, humedad, pH del suelo, y conductividad eléctrica que tienen incidencia en el desarrollo del fruto, en especial en la demanda hídrica que requiera, esto genera una relación directa con el riego adecuado del cultivo. El Instituto de Desarrollo Agropecuario e Instituto de Investigaciones Agropecuarias en Chile afirma que “Estudios recientes muestran incrementos de hasta el 43% en el rendimiento de arándano gracias a la aplicación de riego” (2017, pág. 77), En concordancia con Farfán quien menciona que “Antes de realizar el riego, debe realizarse un control periódico de su aplicación en relación al estado y necesidades de cultivo, para así determinar la demanda de riego” (2016, pág. 96). Mostrando la vital importancia de un correcto manejo de dichas variables para afectar positivamente el desarrollo del cultivo.

El proceso de fertilización de estos cultivos se realiza primordialmente por el mismo riego de goteo, donde se suplen las diferentes necesidades de la planta, para realizar un adecuado proceso es primordial identificar las etapas fenológicas del cultivo y efectuar una correcta fertirrigación, considerando los requerimientos del suelo y condiciones climáticas. En particular el arándano es una planta que presenta cierta sensibilidad al exceso de fertilizantes, además mantener el pH bajo en el suelo favorece directamente su desarrollo y por ende la calidad del fruto (Farfán Casallas, 2016). El riego y la fertilización se relacionan claramente, y la automatización del primero permitirá tener una mejor gestión del segundo en la toma de decisiones, por lo tanto, optimizar este proceso conllevará a la mejora de la productividad en el cultivo de arándanos.

## **1.1. Pregunta problema**

Este trabajado de grado da respuesta a la siguiente pregunta:

¿En cuánto se reduciría el consumo de agua por planta en un cultivo de arándanos en el municipio de Sopó, haciendo uso de un sistema automatizado de riego en el que se tenga en cuenta los parámetros hidrodinámicos del sustrato?

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivos General**

- Implementar un sistema de control automatizado de riego en un cultivo de arándanos en el municipio de Sopó, que, a partir de los parámetros hidrodinámicos del sustrato, asegure la disponibilidad de agua y nutrientes para la planta.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Modelar la dinámica del agua en el sustrato a partir de sus características físicas.
- Garantizar la uniformidad en la unidad de riego asegurando una correcta presión de trabajo para el sistema.
- Diseñar e implementar un sistema de control automatizado de riego a partir de los parámetros hidrodinámicos del sustrato, que asegure la disponibilidad de agua en la zona radicular de la planta de arándanos.
- Evaluar el impacto del sistema de control automatizado en dos hileras del cultivo sobre la humedad, conductividad y el consumo de agua mediante la comparación con una hilera en la que se mantiene un riego tradicional.

## 3. Marco Teórico

### 3.1. Agricultura de precisión en el riego

La importancia del sector agrícola a nivel mundial, ha llevado a que constantemente se busque mejorar o implementar nuevas metodologías de trabajo. Desde hace varios años debido a los diferentes avances científicos, han sido incorporadas nuevas tecnologías que buscan optimizar los procesos en distintos enfoques. La agricultura de precisión (AP) nace de esta necesidad y se ha consolidado como un enfoque de gestión que busca optimizar los recursos utilizados, aplicando el concepto de las cinco ‘R’ el que define Khosla (2010) citado por Colizzi et al. (2020, pág. 1) como: *“approach of applying the right input at the right time, at the right place, in the right amount and in the right manner”*. Aunque esta definición fue establecida en la década pasada ya varios autores habían definido el propósito de la agricultura de precisión, por ejemplo Pierce y Nowak (1999) afirman que la medición del valor de los sistemas de agricultura de precisión se realizará por su impacto en la gestión de los procesos agrícolas.

En la última década, se han desarrollado una gran variedad de proyectos y avances tecnológicos en la agricultura de precisión hasta el punto en que se ha logrado apoyar el trabajo de los agricultores en procesos como la siembra, riego, aplicación de pesticidas, cosecha, entre otros, asegurando precisión en la ejecución de estos y mejorando la eficiencia en insumos, para así aumentar la productividad de los cultivos. Aunque este enfoque ha tenido una gran evolución aún no se tiene claro el límite de precisión y exactitud que se puede alcanzar y por ende el impacto de este (Krishna, 2013). En gran medida esto se debe a la extensa variedad de cultivos y condiciones que se presentan en la agricultura, no es lo mismo los requerimientos de tratamiento que se tienen en un cultivo de papas a uno de fresas, cada uno contará con sus necesidades; o las condiciones climáticas en países con estaciones a otros sin estas, llevando a que la agricultura de precisión se debe adecuar a las necesidades de cada uno en sus distintas condiciones.

Aunque Colombia es un país con una larga tradición agrícola, actualmente se encuentra rezagado técnicamente con otros países, esto se debe a la falta de implementación de

tecnologías (Cáez Pérez, Cáez Pérez, Cáez Turizo, & others, 2020), aun así, ya se han implementado trabajos de agricultura de precisión orientados al riego o fertilización, por ejemplo, Cohen-Manrique et al. (2020) implementó un sistema de control para el riego de ahuyama en el que se monitorean variables meteorológicas por medio de una red de adquisición de datos conectada a la nube, el sistema se modeló:

Teniendo en cuenta el comportamiento de la evapotranspiración, mediante el modelo de Penman-Monteith, el crecimiento de la raíz del cultivo, sus etapas fenológicas, las características intrínsecas del suelo cultivable de la región, la tasa de infiltración, las láminas acumuladas de agua debida a la escorrentía entre otras (Cohen-Manrique, Burbano-Bustos, Salgado-Ordosgoitia, & Merlano-Porto, 2020, pág. 82)

este sistema mostró un excelente comportamiento y optimizó el uso del recurso hídrico.

### **3.2. El cultivo de Arándanos**

Los arándanos son un tipo de baya, los cuales han tenido una importancia fundamental en la historia de la humanidad. Inicialmente su planta fue un arbusto silvestre originario de Norteamérica y Europa y su triunfo se debe en gran medida a la variedad de aplicaciones terapéuticas y curativas reconocidas por los nativos americanos (García Rubio, García González de Lena, & Ciordia Ara, 2018). Los arándanos pertenecen al género *Vaccinium* de la familia de las Ericaceas que han sido domesticados y convertidos en uno de los frutos más comerciales a nivel mundial debido a su adaptación para producirlo en distintos climas. Diferentes estudios han demostrado que su consumo puede ayudar a evitar problemas de visión y digestivos entre otros, convirtiéndolo en un fruto apetecido en el mercado (Carrera, 2012).

Los arándanos son una especie que se puede dividir en distintas variedades dependiendo de las horas-frío necesarias para su floración: la primera variedad tiene altas exigencias de frío siendo superiores a 800 horas, la segunda variedad con exigencias medias que varían entre 400 a 600 horas frío y por último la variedad con exigencias bajas de menos de 400 horas frío, la elección de la variedad que se cultivará dependerá de las exigencias de horas frío que se puedan tener en la ubicación (García Rubio & González De Lena, 2011). El arándano es una planta que ya ha sido modificada genéticamente, un ejemplo es la variedad *highbush* que según Hancock (2009) citada por (Mesa Torres & others, 2015, p. 17) fue

creada para adaptarse a unas condiciones climatológicas específicas: la descripción taxonómica del arándano es especificada por Cronquist (1981) citado por (Mesa Torres & others, 2015, p. 18).

Las variedades *Southern highbush* son híbridos desarrollados a partir del arándano Alto (*V. corymbosum*), un arándano siempre verde (*V. darrowi*) y el arándano Ojo de Conejo o rabbiteye (*V. ashei*), con la principal característica que estas variedades tienen un requerimiento de horas frío baja. Perteneciente a esta variedad se encuentra la biloxi, la cual tiene un requerimiento mínimo de 400 horas frío, producción temprana, sensibilidad a las heladas y una fruta de tamaño medio y excelente sabor (Undurraga & Vargas, 2013). En Colombia ya se han realizado distintos trabajos relacionados con esta variedad de arándano, como ejemplo en (Farfán Casallas, 2016) se presenta un estudio sobre la viabilidad de un cultivo en Cundinamarca, o en (Sanabria Bernal & others, 2016) se evaluó el efecto de la acidificación del agua de riego en dos variedades de arándano, una de esta Biloxi.

El desarrollo de la planta de arándanos es un factor primordial en el riego, según Rivadeneira y Carlazara (2011) “El crecimiento de la planta de arándano está dividido en dos partes: vegetativo y reproductivo” citado en (Sebastián Gastañudi, 2019, pág. 3), la etapa vegetativa se puede subdividir en 4 según Mesa (2015) “primero es la yema vegetativa, el segundo es el brote caracterizado por entrenudos cortos, tercero el alargamiento de los entrenudos y la expansión de hojas y cuarto una rama nueva conformada por las hojas totalmente extendidas y entrenudos largos” citado por (Bustillo Alvarez & others, 2018, pág. 15), del mismo modo la etapa reproductiva se subdivide en 6, como afirman Meyer y Prinsloo (2003) citado en Mesa:

Primero se tiene una yema hinchada que dará origen a las flores y posteriormente la yema se abrirá dando inicio a la floración, tercero son botones florales con la corola cerrada, cuarto flor en plena floración con la corola abierta, quinta caída de la corola y cuaje del fruto y sexto fruto verde (Mesa Torres & others, 2015, p. 23).

Estas etapas se deben tener en cuenta al momento de realizar el riego del cultivo, con el fin de brindar a la planta el agua necesaria para su correcto desarrollo y producción, en la Figura 1 se muestran las distintas etapas fenológicas del arándano descritas anteriormente.

El sistema radicular del arándano es fibroso superficial y está compuesto por: raíces primarias, las cuales se encargan de fijar la planta, así como de transportar nutrientes a las hojas; secundarias, encargadas de extraer el agua y nutrientes; por último terciarias, que tienen un corto ciclo útil, estas características hacen que la planta sea especialmente sensible al riego y la fertilización (Garcia Rubio, Garcia Gonzáles de Lena, & Ciordia Ara, 2018), aun así según Strik et al. (2020) aunque la planta de arándanos es susceptible a la sequía, se debe evitar el exceso de riego, ya que estas podrían morir por falta de oxígeno, el equilibrio de agua en el suelo para planta es un punto vital para su desarrollo y el del fruto, en concordancia Wilk et al. (2009) afirma que el balance hídrico de la planta debe ser prioridad en la toma decisiones para el riego.

Según Uribe (2013) las raíces del arándano alcanzan a tener una profundidad de 60 ó 70 cm, teniendo su mayor densidad a los 30 cm, punto donde la absorción de agua y nutrientes es óptima, este proceso tendrá una repercusión directa en la productividad del cultivo, tal como afirman García y Gonzales “El tamaño del fruto está condicionado por el nivel y las oscilaciones de la humedad en el suelo, de ahí la gran importancia del riego” (2011, pág. 17), en concordancia con Bryla (2011) el periodo de crecimiento del fruto es crítico y puede ser el período más sensible al estrés hídrico, debido a que cualquier limitación de agua en este punto reducirá la expansión celular y el tamaño de las bayas, generando un bajo rendimiento.



**Figura 1** Estados de desarrollo de la yema floral (A, yema cerrada; B, yema hinchada; C, quiebre de yema; D, racimo apretado); de la yema vegetativa (E, punta verde temprana; F, punta verde tardía; G, brotes

en expansión), de la flor (H, botón rosado temprano; I, botón rosado tardío; J, inicio floración; K, plena floración; L, caída de pétalos); y, del fruto (M, fruto verde; N; pinta; O, 25% cobertura azul; P, 75% cobertura azul; Q; inducción yemas para siguiente temporada). Fuente: Adaptado de Schilder et al. (*Schilder, Isaacs, Hanson, & Cline, 2004*) por Pinochet, Artacho, y Maraboli (*Pinochet, Artacho, & Maraboli, 2014*)

### **3.3. El sustrato**

Quintero et al. (2011) citado por Salazar y Sánchez (2013) define el sustrato como “cualquier medio sólido, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, distinto del suelo que sirve de soporte para las raíces de la planta interviniendo o no en el proceso de nutrición”, basándonos en la anterior definición el sustrato es un sustituto del suelo, aun así, remplazar las propiedades de este no es tarea fácil, la Soil Survey Staff (1999) citada por Jaramillo define el suelo como:

“Un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurre en la superficie de la tierra, ocupa un espacio y se caracteriza o porque tiene horizontes o capas que se diferencian del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, traslocaciones y transformaciones de energía y materia o porque es capaz de soportar plantas arraigadas en un ambiente natural” (2002, pág. 6)

Esta formación natural hace que el suelo cuente con características que no se puedan suplir y por tal razón, como afirman Salazar y Sánchez (2013) no existe un sustrato ideal, pero si existe un manejo ideal.

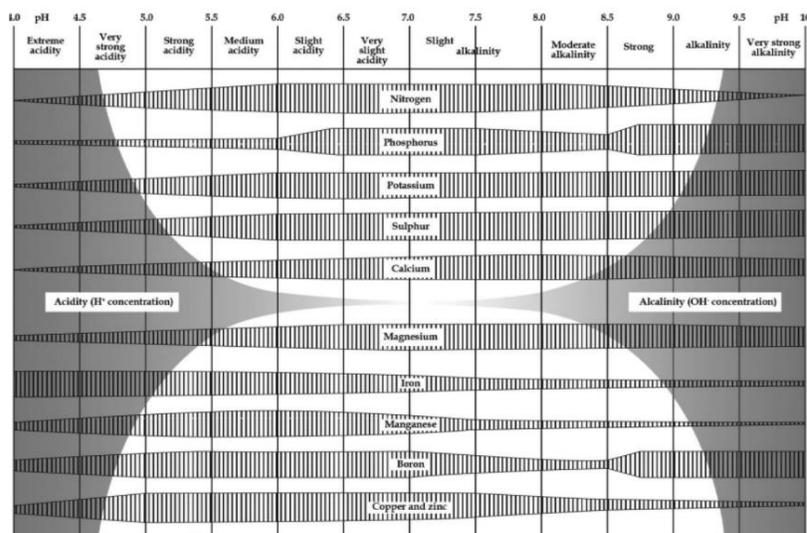
Existen varias razones por las que se utilizan cultivos en sustrato, Cruz et al. (2013) nombra dos, primero la facilidad para movilizar las plantas y segundo, problemas por agotamiento de los suelos agrícolas, salinidad y enfermedades, circunstancias que llevan a los agricultores a elegir este tipo de cultivo, teniendo la principal ventaja de un menor control de plagas y enfermedades de la raíz. Las funciones básicas del sustrato son descritas por Quesada y Roldan como “proveer agua y nutrientes, permitir el intercambio gaseoso desde y hacia la raíz y brindar soporte a la planta” (Quesada Roldán & Méndez Soto, 2005, pág. 2) convirtiendo al sustrato en uno de los componentes con mayor impacto en el cultivo.

Hay una gran variedad de sustratos y tal como expone Acosta-Durán et al. (2008) “no existe un sustrato que pueda ser empleado en todos los casos y en todas las especies”, por tal razón se han desarrollado una gran diversidad de sustratos y la selección es un proceso donde

se tienen en cuenta varias propiedades, Martínez y Roca (2011) dividen las propiedades de los sustratos en tres grupos que son: físicas, mecánicas y químicas. Las propiedades mecánicas hacen referencia a la estructura del sustrato, ya que una estructura débil llevará a que las raíces no tengan un buen anclaje en tierra, por otra parte, es importante que no tenga aristas que puedan lastimar el sistema radicular de la planta (Salazar Castro & Sánchez Arango, 2013).

### 3.3.1. Propiedades químicas

Las propiedades químicas del sustrato según Cruz et al. son aquellas que “establecen la transferencia de materia entre el sustrato y la disolución” (2013), marcando el comportamiento en la absorción de nutrientes que tendrá la planta, Sáez (1999) lista las siguientes: capacidad de intercambio catiónico, pH, concentración de solutos, contenido de nutrimentos y relación carbono-nitrógeno. Según Abad et al. (2004) la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la medida que tiene un sustrato para contener nutrientes la cual depende fundamentalmente de la acidez del suelo, el pH es la medida que nos indica el grado de acidez en el sustrato, y como afirma Osorio (2012) el pH en una solución de suelo es un indicador de la disponibilidad de nutrientes, como se muestra en la Figura 2, basándonos en el pH se puede dar un aproximado cualitativo, además de una proyección general de los requerimientos de manejo.



**Figura 2** Diagrama de Troug de nutrientes disponibles. Cada nutriente es representado con una banda. Adaptado de (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012)

La concentración de solutos descrita por Quintero et al. como “Las sales solubles que se hallan disueltas en la solución del sustrato” (2011, pág. 99), tendrán una composición la cual dependerá de los materiales que forman el sustrato, y una concentración dependiente de la humedad, según Burés (1997) esta aumentará a medida que el contenido de humedad disminuya, una de las desventajas del cultivo en sustrato es la mayor probabilidad de acumulación de sales en comparación al suelo afirma Cruz et al. (2013), debido a que el exceso de salinidad provoca toxicidad en las plantas se recomienda monitorear esta variable en el cultivo (Tombion et al., 2016), estos aumentos se pueden deber a un aporte excesivo de nutrientes en el fertirriego, o una baja lixiviación de sales en el sustrato (Quintero, González, & Guzmán, 2011).

La conductividad eléctrica se define como la capacidad de una sustancia para conducir una corriente eléctrica, en concordancia Burés (1997) expone que esta se expresa en dS/m o mmho/cm y es una medida aproximada para las sales solubles en el sustrato, debido a que la presencia de sales facilita la conducción y su ausencia la dificulta, según Cabrera (1999) el momento donde la conductividad eléctrica alcanza mayores valores es el previo al riego, al regar el sustrato la solución se desplaza al fondo del recipiente, si la conductividad del agua de riego es menor, se verá una disminución en la zona radicular de la planta, asegurando su integridad, a esto se le conoce como lixiviación, de acuerdo con Fernández (2010) quien afirma que el exceso del contenido de sales se previene o corrige con lavados con riegos controlados, o manteniendo la humedad constante del sustrato.

Mantener la cantidad de sales solubles en el suelo es una de las condiciones necesarias para las plantas, Martínez y Roca (2011) exponen que cada especie responde de diferente manera al nivel de salinidad del suelo, y mantenerlo en el óptimo aportará a su correcto desarrollo, según Cabrera (1999) conociendo la conductividad del agua se puede calcular el porcentaje de lixiviación necesaria para mantener un nivel en el sustrato con (1) donde RL es el requerimiento de lixiviación, el resultado nos dirá cuál es el porcentaje de riego que deberá ser lixiviado para alcanzar el CE deseado, he aquí donde la conductividad del agua toma importancia debido a que si hay un mayor nivel será necesario una mayor lixiviación.

$$RL = \frac{CE \text{ del agua o solución}}{CE \text{ deseado}} * 100 \quad (1)$$

La última propiedad química de los sustratos es la relación de carbono nitrógeno, según Martínez y Roca (2011) en sustratos orgánicos sirve como indicador del grado de descomposición, donde los microorganismos intervienen en la transformación de la materia, al consumir dichos elementos, debido a esto las plantas pueden verse afectadas al tener que competir y tal como afirma Gamarra et al. (2018) es un índice de calidad del nitrógeno disponible para la planta, donde un alto nivel indicará la lenta descomposición y una baja disponibilidad, mientras que un bajo nivel indicará una rápida descomposición y una buena disponibilidad, siendo recomendable valores que oscilen entre 10 y 14: la relación C/N permitirá tener una perspectiva del estado del sustrato y una perspectiva de su estabilidad.

### **3.3.2. Propiedades físicas**

Entre las propiedades evaluadas en un sustrato, las que toman mayor relevancia en su elección son las físicas, tal como afirma Abad et al. (2004) citado por Cruz et al. (2013) esto se debe a que, una vez instaladas las plantas en el sustrato será muy difícil modificarlas positivamente, a diferencia de las propiedades químicas que pueden ser alteradas con tratamientos. Las propiedades físicas determinan principalmente las fracciones sólida, líquida y gaseosa del sustrato, definiendo así la disponibilidad de agua y aire que tendrá la zona radicular de las plantas, es importante resaltar que para medir estos parámetros se han normalizado algunos métodos, con el fin de facilitar la comparación entre sustratos (Martínez, Roca, & others, 2011).

Martínez y Roca (2011) listan como propiedades físicas las siguientes: Granulometría, Densidad real, Densidad aparente, Porosidad total, Agua fácilmente disponible (AFD), Agua de reserva (AR) y capacidad de aire (CA), mientras que Díaz (Díaz, 2004) citado por Hernández (2012) añade dos más las cuales son porosidad del aire y agua difícilmente disponible (ADD), todas estas características en los cultivos de sustratos están enfocadas a contribuir dos rasgos primordiales, una elevada capacidad de retención de aireación y agua a bajas tensiones, menores a 100 cm de columna de agua (Burés, 1997). Otra característica que

es muy utilizada es la curva de liberación de agua para sustratos orgánicos desarrollado por De Boodt et al. (1973).

La granulometría según Martínez y Roca expresa “la distribución de las partículas como porcentaje de la masa de cada fracción de tamaño, en relación con la masa total seca al aire” (2011, pág. 39), conocer dicha distribución permite identificar el balance entre el contenido de agua y aire que podría existir en el sustrato, la relación que existe entre la granulometría y la porosidad es esencial, y un punto crítico en la elección, dado que un nivel alto de granulometría significara que estará compuesto por partículas de mayor tamaño, con baja retención de agua y una buena aireación, mientras que materiales finos en los que el tamaño de las partículas es pequeño, se presentara una buena retención de agua y una baja aireación (Quintero, González, & Guzmán, 2011), tal como recomienda Morales y Casanova (2015) citados por Gayosso et al. (2016) es importante una correcta distribución de aire y liquido en el sustrato, siendo el sugerido entre el 10 a 30 % de aire para la oxigenación de las raíces.

La densidad del sustrato se mide utilizando dos parámetros distintos, el primero es la densidad real (DR), según Cruz et al. (2013) esta es el cociente entre la masa de las partículas y el volumen del sustrato sin tener en cuenta los poros creados por la irregularidad, uno de los métodos para calcularla es por picnometría, la segunda medida y más utilizada que la anterior es la densidad aparente (DA) la cual define Burés (1997) como la razón entre la masa de las partículas secas y el volumen que ocupan, en esta medida se tienen en cuenta el espacio ocupado por los poros, razón por la cual esta dependerá del grado de compactación y del tamaño de las partículas: según Mascarini et al. (2012) citado por Gayosso et al. (2016) esta medida es una de las de mayor relevancia debido a la relación con la velocidad de filtración del agua.

Como se mencionó anteriormente en el sustrato debe existir un equilibrio entre las tres fases, asegurando que la planta cuente con el recurso hídrico, pueda tener una correcta oxigenación y esté segura con un buen anclaje, según Díaz (2004) citado por Hernández (2012) la porosidad total (PT) es el porcentaje de espacio ocupado por los poros respecto al volumen aparente, esta medida al igual que la densidad aparente variara dependiendo del grado de compactación y tamaño de las partículas. Quintero et al. (2011) expone que los

poros se pueden clasificar según su tamaño: microporos menores a 30  $\mu\text{m}$ , donde se retiene agua y macroporos mayores a 30  $\mu\text{m}$  que contienen el aire. El valor recomendable para esta característica es mínimo 85%, con poros que tengan un tamaño entre 30 y 300  $\mu\text{m}$  y se puede calcular con (2).

$$PT = \left(1 - \frac{DA}{DR}\right) * 100 \quad (2)$$

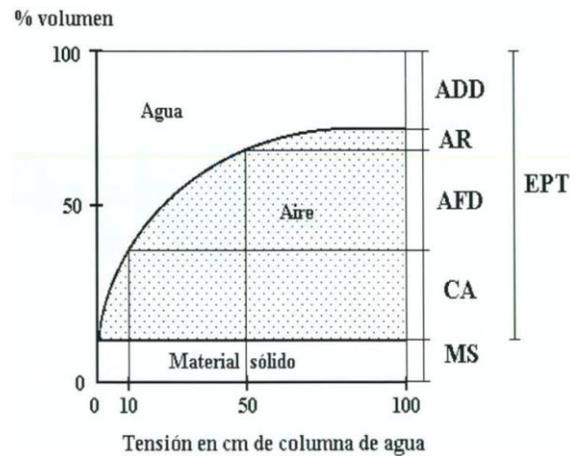
Con el fin de describir el comportamiento del agua en el sustrato han sido desarrolladas varias características, definidas como el volumen de agua después de aplicar una tensión al suelo, la principal función del sustrato es suministrar agua a la zona radicular a bajas tensiones, que frecuentemente varían entre 0 y 100 cm de columna de agua (Burés, 1997). La primera es el agua difícilmente disponible (ADD) que según Sáenz (1999) hace referencia al agua retenida en el sustrato después de aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua; la razón por la que se considera de difícil acceso para planta es que debido al esfuerzo para utilizarla disminuye la producción pero que en caso de sufrir estrés hídrico la planta podrá absorberla (Quintero, González, & Guzmán, 2011).

El agua de reserva (AR), es el volumen que se extrae del sustrato al haber aplicado una tensión entre 50 y 100 cm de columna de agua (Sáez, 1999); Martínez y roca (2011) recomiendan que este volumen oscile entre el 4 y 20%. El agua fácilmente disponible (AFD), según Burés (1997) es el porcentaje de volumen de agua liberada después de aplicarle una tensión entre 10 y 50 cm de columna de agua, siendo este el intervalo más favorable para que la planta absorba el agua y obtener una aireación suficiente para la zona radicular. La suma de las dos anteriores características se denomina el agua disponible (AD) y se recomienda que oscile entre 24 y 40% (Martínez, Roca, & others, 2011).

La capacidad de aireación según Sáenz es “la proporción del volumen del sustrato que contiene aire después que dicho sustrato ha sido llevado a saturación y dejado drenar” (1999, pág. 233), varios autores afirman que este drenaje se alcanza con una tensión de 10 cm de columna de agua; esta característica hará referencia al volumen que podrá ocupar el aire en el sustrato y se recomienda que oscile entre el 10 y 30% con el fin de asegurar una correcta

oxigenación en la zona radicular (Martínez, Roca, & others, 2011). A partir de las anteriores características también se puede calcular la porosidad total del sustrato como su suma en (3). Todos estos parámetros pueden ser caracterizados con la curva de liberación de agua para sustratos orgánicos desarrollado por De Boodt et al. (1973) que se muestra en la Figura 3, donde el volumen por debajo de la curva corresponde al del aire y el que está por encima al del agua.

$$PT = CA + AFD + AR + ADD \quad (3)$$

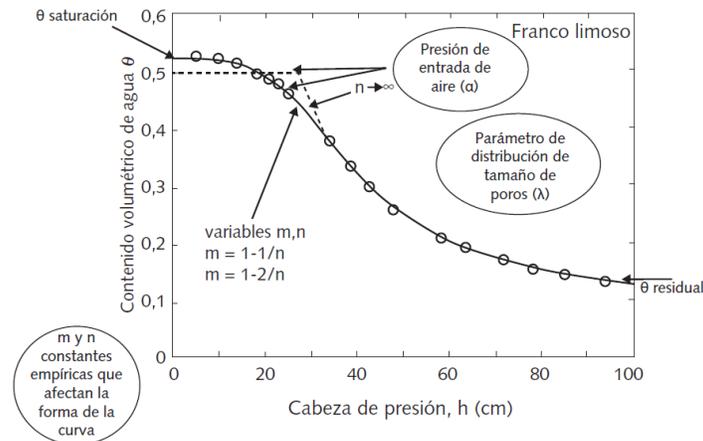


**Figura 3** Curva de calibración de agua de un sustrato. Tomado De Boodt et al. (De Boodt, Verdonck, & Cappart, 1973)

El contenido de humedad en un sustrato se puede modelar utilizando la curva de retención de humedad (CRH) expuesto en la Figura 4, la cual muestra la variación de la succión en función del contenido volumétrico de humedad del suelo o sustrato, a medida que la humedad sea menor en el sustrato, se requerirá de un mayor esfuerzo de la planta para extraer agua. Esta curva se puede identificar con las ecuaciones (4) y (5) conocidas como la de van Genuchten (1980) con la ventaja que ésta quedará en términos de las propiedades físicas del sustrato, donde  $S_e$  es la función de retención de humedad,  $\theta$  es el contenido de humedad del suelo,  $\theta_s$  es la humedad de saturación y  $\theta_r$  la humedad residual, respectivamente;  $h$ , la presión del agua en el suelo;  $m$  y  $n$  son parámetros empíricos; y  $\alpha$  es el parámetro cuyo inverso se relaciona con la presión de entrada de aire (Quintero, González, & Guzmán, 2011).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (4)$$

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (5)$$



**Figura 4** Parámetros utilizados para modelar la curva de retención de humedad. Fuente: van Genuchten et al. (Van Genuchten, Leij, Yates, & others, 1991) tomado de (Quintero, González, & Guzmán, 2011)

Otra propiedad que es fundamental para entender el comportamiento del agua en el sustrato es la curva de conductividad hidráulica. Burés (1997) la define como la capacidad que tiene el sustrato para conducir agua hacia la zona radicular y se caracteriza por su complejidad, ya que depende del valor de humedad (Quintero, González, & Guzmán, 2011). Debido a su dependencia esta variable se divide en 2: Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados, la cual ocurre cuando todos los poros del suelo están llenos de agua; y la Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados, donde el volumen de agua es menor a la porosidad total (Barbecho & Calle Ortiz, 2012). Quintero et al. (2011) expone varios modelos empíricos que describen la función de conductividad hidráulica a diferentes grados de saturación  $k(\theta)$  y uno de los más usados es (6) donde depende de la conductividad hidráulica en saturación  $K_s$ , del grado de saturación  $W_s$  y una constante empírica  $m$ , este modelo es muy similar al usado por López et al. (2008).

$$k(\theta) = K_s W_s^m \quad (6)$$

### 3.4. Agua de riego

En el riego no solo es necesario tener un correcto manejo de la cantidad de agua suministrada, también es importante conocer su calidad, ya que tendrá un impacto directo en el cultivo, según Can Chulim et al. (2008) el concepto de calidad en el agua hace referencia

a las características que puedan alterar su uso para un fin específico, por tal razón las características requeridas para el riego no serán las mismas que para el consumo, en concordancia Castellón-Gómez et al. exponen que es “determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga” (2015, pág. 40), haciendo referencia a la salinidad y cantidad de sodio presente en el agua.

García (2015) expone que los problemas más comunes derivados de la calidad del agua de riego son: Salinidad, su infiltración en el suelo, toxicidad y otros efectos relacionados con el exceso de fertilización. Como afirma Millán (2016) citado por Carabalí et al. (2019) las fuentes de agua de riego generalmente son de origen natural, razón por la cual con normalidad presentan contaminantes de naturaleza inorgánica, fertilizantes o metales pesados, los cuales son tóxicos para las plantas, en especial el agua superficial, razón por la cual un análisis previo a la instalación y de forma periódica es relevante con el fin de asegurar la integridad del cultivo.

Según Mendoza (2013) los criterios para evaluar la calidad del agua en un sistema de riego por goteo son: Salinización, Sodificación, Toxicidad y Obstrucciones en riego localizado, estos criterios permitirán evaluar qué tan apta es el agua de la fuente para nuestro cultivo y si es necesario algún tipo de tratamiento, tal como recomienda García et al. (2011). En los cultivos de arándano el análisis de la calidad es vital, ya que esta planta presenta sensibilidad a la salinidad, y a los excesos de calcio, boro o cloro.

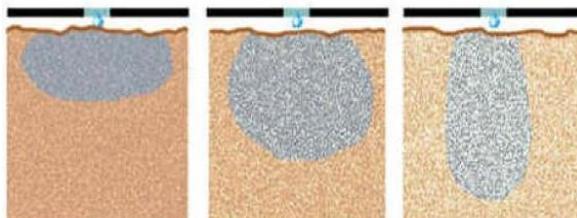
### **3.5. El fertirriego por goteo en los cultivos de Arándano**

El fertirriego es el proceso por el cual de forma simultánea se entregan los nutrientes y el agua a las plantas por la misma vía. La fertilización y el riego son procesos que tendrán una influencia directa en el comportamiento y rendimiento del cultivo, son de gran relevancia y su correcto manejo se convierte en una necesidad para los agricultores (Martínez Gamiño, y otros, 2014). El sistema de goteo entrega el agua al sustrato de forma directa gota a gota, por medio de goteros ubicados en cada planta que necesitan de una presión mínima para su funcionamiento, menor que la requerida en sistemas de aspersores (Mendoza Martínez, 2013)

convirtiendo a los sistemas de fertirriego por goteo en una de las opciones más usadas en distintos cultivos a nivel mundial y siendo el recomendado para el arándano (Bryla, 2011).

Una de las características que convierte a este sistema en el más usado, es proporcionar uniformidad en la distribución de agua y fertilizantes, asegurando que un cultivo presente una producción con tendencia uniforme en general, tal como concluye Jamrey, Y Nigam (2018) los sistemas de riego por goteo con un buen diseño tienen un excelente funcionamiento asegurando más de un 90% de uniformidad en la aplicación. Otras de las ventajas expuestas por Paico y Figueroa (2015) son disponibilidad de agua de forma frecuente, menor pérdida por evapotranspiración y baja presión de funcionamiento; no obstante, también mencionan la importancia de supervisar las dosis aplicadas de fertilizantes para su correcto funcionamiento.

Los goteros colocados en cada una de las plantas suministran agua al sustrato, el cual lo absorbe creando una zona húmeda en forma de bulbo, la distribución del bulbo variará dependiendo de la velocidad de filtración, en suelos con una velocidad alta se expandirá de forma vertical mientras que en bajas velocidades lo hará de forma horizontal, la mayor concentración de humedad se presentará en el punto de aplicación (Mendoza Martínez, 2013), en contraste con lo mencionado por Marín (2001) el tamaño del bulbo aumenta a medida que se incrementa el volumen de agua aplicado alcanzando zonas más profundas, en la Figura 5 se muestra la forma del bulbo en tres tipos diferentes de suelo, el conocimiento del tamaño y forma de este posibilita tener un diseño más preciso en el riego, la implementación del monitoreo de humedad en el sistema permite alcanzar un mejor control del agua suministrada a la planta.



**Figura 5** Forma del bulbo húmedo según las características físicas. Adaptado de Mendoza (2013)

Los sistemas de riego están compuestos básicamente por: fuente de abastecimiento de agua, cabezal principal, tuberías de conducción principales, cabezales de campo, tuberías terciarias y laterales con emisores, además consta de diferentes sectores denominados unidades de riego, las cuales son áreas contraladas por una válvula o cabezal de campo (Liotta, Carrión, Ciancaglini, & Olguin Pringles, 2015), aunque otros autores (Mendoza Martínez, 2013) (Carrasco Castañeda, 2020) incluyen dispositivos de seguridad y de control, los cuales contribuyen al correcto funcionamiento del sistema. Adicionalmente para la fertilización se incluyen los depósitos de almacenamiento, tanque de fertilizantes, bomba de inyección y sistema Venturi, estos cumplen la función de inyectar de forma uniforme al sistema de riego los fertilizantes requeridos por las plantas.

La bomba es el dispositivo encargado de alimentar el sistema de riego con agua, según Liotta et al. para su elección: “es importante tener en cuenta la presión requerida para vencer las diferencias de cota y las pérdidas de carga total del sistema” (2015, pág. 10), la presión en un sistema de goteo es primordial para que el caudal en los goteros sea constante y se asegure uniformidad en el riego. Tejido et al. (2007) evaluó el rendimiento de los goteros variando la presión y registrando el caudal y mediante (7) se encuentra el caudal medio para luego hallar el coeficiente de uniformidad calculado con (8). Este estudio dio como resultado que todos los goteros evaluados tenían un coeficiente de uniformidad mayor al 95%.

$$q_m = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} \quad (7)$$

$$Cu = 100 * \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_m|}{n * q_m} \right) \quad (8)$$

Otro componente que tiene un funcionamiento primordial en el sistema de riego, son los filtros que se encargan de evitar taponamientos de los goteros, situación muy frecuente por el reducido tamaño de su salida. Según Liotta et al. (2015) existen 4 tipos de filtro usados en sistemas de riego, los cuales son: Hidrociclones, de grava o arena, de malla y de anillos o discos, es muy común que en un mismo sistema se utilice más de un tipo como recomienda Phocaidés (2007). Es importante resaltar lo afirmado por Mendoza (2013) en donde indica que todo filtro genera una pérdida de presión que debe ser evaluada en el diseño del sistema.

Debido a la importancia del riego, el diseño del sistema es un punto clave en el establecimiento del cultivo, ya que su desempeño tendrá incidencia en la productividad, Falconi (2020) expone el diseño de un sistema de riego teniendo en cuenta varios factores: como lo son la demanda hídrica del cultivo por día, la cual estima utilizando el índice de Evapotranspiración y el coeficiente del cultivo, también definidos en (Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2017) dependiendo de las condiciones climatológicas y etapa fenológica del arándano; las pérdidas por tuberías y emisores; tiempos en la apertura y cierre de válvulas, entre otras características hidráulicas, en vista de la gran cantidad de factores que intervienen en el diseño es común el uso de software como apoyo para dicha tarea.

Carrasco (2020) propone el uso del Software Irricad, creado por el *Agricultural Engineering Institute* (AEI) en el año 1993, el cual es capaz de calcular los diámetros y requerimientos de tubería apoyado en una base de datos previamente cargada, recibiendo parámetros de los instrumentos escogidos por el diseñador y sus características técnicas. El mismo software es usado por Falconi (2020). En concordancia Salud (2012) concluye que el diseño de estos sistemas agrupa conceptos de distintas especialidades con el fin de entregar como resultado un producto capaz de satisfacer las necesidades de los agricultores.

### **3.6. Programación del riego**

Para realizar una correcta gestión del recurso hídrico en un cultivo es preciso conocer los momentos indicados para realizar los riegos y las cantidades para suplir sus necesidades, el principal objetivo es aplicar la cantidad correcta de agua en el momento adecuado para minimizar los costos de riego maximizando la producción de cultivos y el rendimiento económico (Bryla, 2011), con el fin de alcanzar este objetivo se han planteado diferentes metodologías, una de las más usadas es la de evapotranspiración, Ortega y Acevedo (1999) exponen el procedimiento para calcular la demanda y frecuencia de riego en un cultivo, estimado a base de las condiciones climatológicas y del cultivo.

El método de evapotranspiración es uno de los más usados debido a la facilidad para acceder a información del clima ya que no requiere equipos adicionales en el cultivo, siendo

el preferido para productores pequeños, además de ser el utilizado para estimar la capacidad que deberán suplir los sistemas de riego, aunque no es el único o más preciso, Fernández et al. (2015) expone dos métodos adicionales: flujo de savia y variación del diámetro del tronco, ambos métodos monitorizan el estado de la planta y se basan en ésta para calcular la demanda hídrica, por otra parte, Valencia y Proaño (2005) concluyeron que el método basado en humedad presenta un mejor rendimiento y un mayor ahorro de agua.

Los métodos basados en la humedad supervisan la cantidad de agua presente en el suelo, con el fin de garantizar que la planta tenga un suministro constante, tal como afirma Wilk et al. (2009) para realizar una correcta estimación de las necesidades de la planta se debe monitorear la humedad del suelo e identificar sus características físicas, con el fin de conocer el comportamiento del agua en la zona radicular, en concordancia Strik et al. (2020) afirma que la zona radicular del arándano debe estar lo suficientemente húmeda para que no se seque entre los ciclos de riego, esto dependerá del tipo de suelo y sus características.

La correcta entrega del recurso hídrico en un cultivo se puede alcanzar con la implementación de un sistema automatizado el cual monitoree las distintas condiciones del sustrato, los sensores se pueden instalar de forma permanente en puntos representativos de un campo agrícola para proporcionar lecturas de humedad a lo largo del tiempo, las cuales se utilizarán para la gestión del riego (Muñoz-Carpena & Dukes, 2005), Alarcón (1997) afirma que los sistemas desempeñan un papel preponderante en donde la supervisión asegura un aporte adecuado a las exigencias de la planta, aunque es de resaltar que para esto se requiere una calibración cuidadosa en sitio con el fin de asegurar su correcto funcionamiento.

### **3.7. Sistemas de riego automatizado**

A nivel mundial ya se han desarrollado sistemas automatizados de riego, por ejemplo, Martínez et al. (2013) expone el diseño de un sistema de riego automatizado a escala en un invernadero, adicionalmente incluye alimentación hidráulica para mezclar los fertilizantes, en este caso la programación del riego se realiza por medio de una interface gráfica en la que el ingeniero agrónomo ingresa las horas y tiempos dependiendo de su conocimiento sobre las necesidades del cultivo, el sistema no cuenta con ningún tipo de sensores y principalmente

busca ahorrar en la mano de obra y tiempo en el riego. A nivel comercial este tipo es uno de los más comunes ofrecidos por empresas en Colombia y debido a su simplicidad y economía es muy utilizado por los agricultores más pequeños.

Castellanos et al. (2020), expone un sistema automatizado de riego basado en aplicación por zona, donde se monitorearon variables meteorológicas, humedad y temperatura del suelo, con el fin de estimar la demanda hídrica del cultivo en cada una de las zonas, se aplicaron 4 tratamientos, de los cuales tres se basaban en el cálculo por las variables meteorológicas y el cuarto se basó en la medición de humedad del suelo, en varios escritos han utilizado la medición de humedad en el suelo como un indicador de la demanda hídrica de la planta, en comparación Pacheco et al. (2018) plantea un sistema de adquisición en el que se monitorea solamente la humedad y temperatura del suelo, contando con esta información el sistema era capaz de realizar el riego de forma automática, con el fin de asegurar un uso eficiente del recurso hídrico. Por otra parte, estos proyectos hacen uso del internet de las cosas (IoT), por sus siglas en inglés, para tener un control a distancia del cultivo y ofrecer a los agricultores la accesibilidad de los datos del cultivo en tiempo real.

En la revisión realizada por García et al. (2020) se identificaron que las variables más medidas por los sistemas de riego: son la humedad del suelo y parámetros meteorológicos como la humedad relativa, temperatura ambiente, precipitaciones y luminosidad, todas estas variables con el fin de evaluar las necesidades del cultivo, por otra parte aunque existen una gran cantidad de variables que se pueden medir muy pocos sistemas miden un número superior a 4, para el caso del riego por goteo la variable que más se mide es la humedad del suelo debido a que este método es de riego localizado. Por último, la revisión concluye que uno de los principales factores que ha dificultado la implementación de estos sistemas es el costo de los equipos que muchas veces no es asequible para el agricultor promedio.

Para los sistemas de riego basados en la medición de humedad como el propuesto por Schugurensky y Capraro (2008) una de las principales características es la calibración que se debe realizar en sitio, con el fin de asegurar el correcto funcionamiento, como se mencionó en las anteriores secciones la disponibilidad de agua en el sustrato depende exclusivamente de las características físicas, razón por la cual en este trabajo se dividió el terreno en sectores

donde se presentaran características muy similares, el anterior sistema presentó excelentes resultados para alcanzar el valor de referencia de humedad deseado, permitiendo al agricultor identificar el valor más adecuado dependiendo de la época y etapa fenológica del cultivo.

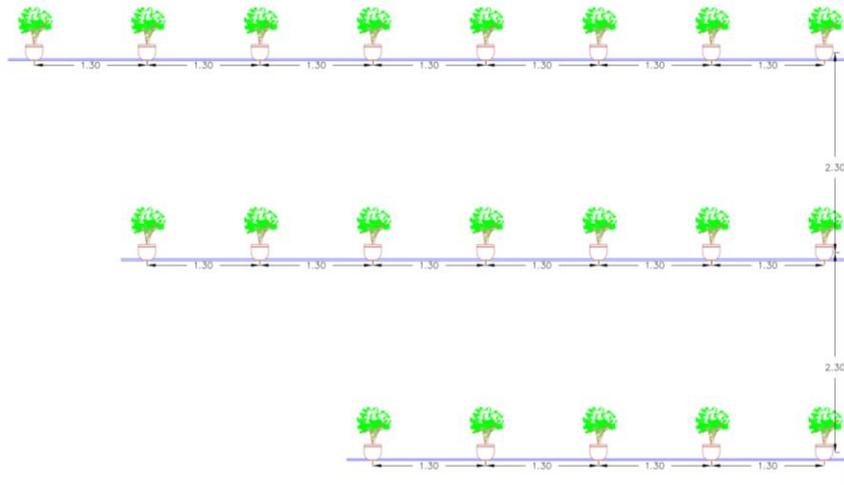
## **4. Metodología**

El riego como parte del cultivo es un punto crítico que puede influir en diferentes factores de su desarrollo en general, convirtiéndolo en un proceso que bien ejecutado tiene un impacto positivo en la producción y calidad del fruto, por tal razón se buscó que, a partir de los parámetros hidrodinámicos del sustrato se diseñara un lazo de control mediante la implementación de un sistema automatizado de riego. Para ello se ejecutó el proyecto estableciendo un conjunto de etapas en donde cada una entrega un resultado que cumplió con los objetivos establecidos.

El proyecto define cinco etapas estratégicas que, debido a la naturaleza de la investigación, se ciñe a un enfoque experimental y un diseño cuasi experimental, el cultivo donde se implementó el sistema está ubicado en la vereda San Gabriel del municipio de Sopó, Cundinamarca, sobre los 2600 metros de altitud. En el mismo sector se ubican dos cultivos de gran extensión con la misma variedad de arándano, uno sembrado en sustrato y otro en tierra, las precipitaciones medias del área en 7 meses superan los 77 mm, teniendo su máximo en julio con 100,1 mm y mínimo en enero con 30,5 mm. La temperatura media a lo largo del año varía entre los 13,4 °C a 14,4 °C, permitiendo que los arándanos acumulen horas frías a lo largo de todo el año (Syscol Consultores S.A.S, 2020). Geográficamente la zona se ubica en la falda de la cordillera, sin embargo, en el área del cultivo no se presenta ningún desnivel y las tres líneas de riego están niveladas.

### **4.1. Adecuación y selección de los sensores**

Teniendo en cuenta que las plantas tienen homogeneidad en la etapa fenológica, tipo de sustrato y entrega de agua, se asumió que la medición en las materas centrales de las líneas fueron representativas para realizar un aproximado del estado de cada una, en cada matera se tomaron dos medidas de humedad, la primera a 15 cm de profundidad, donde se encuentra la mayor densidad de raíces y absorción de nutrientes; y la segunda a 35 cm de profundidad, punto donde se encuentran los orificios de la bolsa para la lixiviación, además de implementar un sensor de pH y uno de conductividad eléctrica entre los 13 y 16 cm.



**Figura 6** Esquema distribución de hileras en la unidad de riego

La unidad de riego está compuesta por 3 hileras tal como se muestra en la Figura 6, en la Tabla 1 se encuentra la cantidad de plantas por hilera, las medidas se tomaron en la materia central de las hileras, con el fin de evaluar el estado de cada una, donde se instalaron los sensores y un módulo, los cuales recibían las señales y enviaron la información al Access point ubicado en el cabezal de riego, adicionalmente en la fuente de agua se ubicó un sensor de conductividad eléctrica.

**Tabla 1** Numero de planta por hilera de la unidad de riego

| Hilera       | # Plantas |
|--------------|-----------|
| 1            | 5         |
| 2            | 7         |
| 3            | 8         |
| <b>Total</b> | <b>20</b> |

#### 4.1.1. Elección de los sensores de suelo

Después de haber identificado los sensores existentes en el mercado y verificar las descripciones técnicas de cada uno de los dispositivos en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un resumen y comparativo en la Tabla 2, directamente de los fabricantes en sus manuales, se tomó la decisión basado en los siguientes factores: Costo, disponibilidad de entrega, rango, precisión y resolución, tamaño y adaptabilidad al proyecto. Para iniciar, el sensor TBSMP03 tiene buenas características de medición, aunque su costo no es muy elevado y su diseño robusto pero pequeño lo hacen una buena opción

para la instalación en las materas; no tiene integrada la medición de CE y haría necesario la compra de un sensor que la midiera, aumentando el tamaño de la implementación y la invasión en las materas.

Los sensores JXBS-3001-TDR y GroPoint Pro ofrecen un rango de medida, resolución y precisión bastante similares y adicionalmente sus diseños permiten tener mediciones de varias profundidades con un solo sensor; es de fácil instalación y larga vida útil debido a que los sensores no entran en contacto directo con el suelo. Otra ventaja, son sus interfaces de comunicación las cuales permiten integrarlos con diferentes controladores, pero la principal dificultad radica en sus elevados costos y baja disponibilidad. Por otra parte, el sensor *Drill and Drop* aunque es el que presenta mejores características de medición y alcanza la menor resolución y precisión, es el más costoso y único en el que no se logró verificar su disponibilidad.

**Tabla 2** Comparativo especificaciones técnicas Sensores

| Especificación           | JXBS-3001-TDR                                  | GroPoint Pro | TBSMP03      | Drill and Drop            | MEC-10   |
|--------------------------|--|--------------|--------------|---------------------------|--|
| Voltaje de alimentación  | 12 V   | 6 a 14 V     | 6 a 17 V     | 3.5- a 6 V                | 5 a 30 V                                       |
| Rango humedad            | 0-100%   | 0-100%       | 0-100%       | 0-100%                    | 0-100%   |
| Precisión humedad        | 0-53% ( $\pm 3\%$ )<br>/ 53-100% ( $\pm 5\%$ ) | $\pm 2.0\%$  | N/A          | $\pm 0.03\%$              | 0-50% ( $\pm 2\%$ )<br>/ 50-100% ( $\pm 3\%$ ) |
| Resolución humedad       | 1%   | 0,2%         | 0,1%         | 0,001%                    | 1%   |
| Rango temperatura        | -20 a 80 °C                                    | -20 a 70 °C  | -20 a 65 °C  | -20 a 60 °C               | -40 a 80 °C                                    |
| Precisión temperatura    | $\pm 0.5$ °C                                   | $\pm 0.5$ °C | $\pm 0.5$ °C | $\pm 2$ °C                | $\pm 0.5$ °C                                   |
| Resolución temperatura   | 0.1 °C   | N/A          | 0.1 °C       | 0.3 °C                    | 0.1 °C   |
| Rango CE                 | 0 a 10000 $\mu\text{S/cm}$                     | 0 a 4 dS/m   | N/A          | 0 a 3000 $\mu\text{S/cm}$ | 0 a 20000 $\mu\text{S/cm}$                     |
| Precisión CE             | $\pm 10$ $\mu\text{S/cm}$                      | $\pm 3\%$    | N/A          | $\pm 10$ $\mu\text{S/cm}$ | $\pm 5$ $\mu\text{S/cm}$                       |
| Resolución CE            | 2 $\mu\text{S/cm}$                             | N/A          | N/A          | 3.3 $\mu\text{S/cm}$      | 10 $\mu\text{S/cm}$                            |
| Comunicación             | RS485/Lora                                     | SDI-12 v.1.3 | SDI-12 v.1.3 | SDI-12/RS232              | RS485  |
| Grado de protección      | IP67   | IP68         | IP67         | N/A                       | IP68   |
| Temperatura de operación | -20 a 80 °C                                    | -20 a 70 °C  | -20 a 65 °C  | -20 a 60 °C               | -40 a 80 °C                                    |
| Costo aproximado         | 350 USD  | 600 USD      | 100 USD      | 600 USD                   | 45 USD   |

Razones por las cuales los sensores escogidos para este proyecto fueron el MEC-10 y el Soil pH Sensor, debido principalmente a: su diseño permitió instalaciones permanentes con altos grados de protección; su costo fue bajo en comparación a la de los otros sensores y fue viable para el proyecto; sus especificaciones técnicas y la disponibilidad de envío al país. La validación de estos sensores se realizó en el laboratorio, los resultados se muestran en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

#### 4.1.2. Sensor de humedad zona de lixiviación

Tal como ya se había mencionado fue necesaria la instalación de un sensor de humedad en la zona de lixiviación de las materas, este no requirió de alta resolución o precisión debido a que solo se deseaba verificar si se está realizando una lixiviación hacia la parte inferior, por tal razón se utilizó el sensor de humedad capacitivo mostrado en la Figura 7, el cual fue calibrado y validado para el sustrato en laboratorio, los resultados se muestran en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



**Figura 7** Sensor de humedad capacitivo v1.2 anticorrosivo

Este sensor funciona con un circuito integrado que genera una onda cuadrada con la cual se alimenta el capacitor, al aumentar el nivel de humedad, la reactancia disminuye y por ende hay una reducción de voltaje a la salida del sensor. En la Tabla 3 se muestran las especificaciones técnicas del sensor.

**Tabla 3** Especificaciones técnicas sensor de humedad capacitivo v1.2

| Especificación          | Valor     |
|-------------------------|-----------|
| Voltaje de alimentación | 3,3 a 5 V |
| Corriente de Operación  | 5 mA      |
| Rango humedad           | 0 a 100%  |
| Salida Analógica        | 0 a 3,0 V |

|                          |             |
|--------------------------|-------------|
| Temperatura de operación | -20 a 50 °C |
| Costo aproximado         | 5 USD       |

---

### 4.1.3. Sensor calidad de Agua

Además de asegurar un correcto monitoreo en el sustrato fue importante supervisar la calidad del agua y en especial su conductividad eléctrica, dado que esta tendrá un impacto directo en las necesidades de lixiviación y en la dosis de fertilización que deberá preparar el agricultor, por tal razón se hizo uso de un sensor de TDS y una sonda de temperatura sumergible en la fuente de agua. En la Figura 8 se muestra el sensor TDS Meter v1, el cual fue calibrado y validado a partir de los patrones disponibles en el laboratorio, los resultados se muestran en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



**Figura 8** Sensor de conductividad eléctrica TDS Meter v1.0

Cuenta con un amplio rango de voltaje de alimentación de 3,3 a 5,5 V y salida de voltaje analógico de 0 ~ 2,3 V, lo que lo hace compatible con distintos microcontroladores. La fuente de excitación es una señal de CA, que puede prevenir eficazmente la polarización de la sonda y prolongar la vida útil de esta, ayudado a aumentar la estabilidad de la señal de salida. La sonda TDS es resistente al agua, y puede ser sumergida durante largos lapsos de tiempo, en la Tabla 4 se muestran las especificaciones técnicas.

**Tabla 4** Especificaciones técnicas sensor TDS Meter v1.0

| Especificación          | Valor               |
|-------------------------|---------------------|
| Voltaje de alimentación | 3,3 a 5,5 V         |
| Corriente de Operación  | 3 a 6 mA            |
| Rango TDS               | 0 a 1000 ppm        |
| Precisión TDS           | ± 10 % a 25 °C      |
| Rango CE                | 0 a 2000 $\mu$ S/cm |

|                          |             |
|--------------------------|-------------|
| Salida Analógica         | 0 a 2,3 V   |
| Temperatura de operación | -20 a 50 °C |
| Costo aproximado         | 9 USD       |

Para hacer uso de este sensor el fabricante recomienda una serie de pasos con el fin de obtener lecturas precisas y confiables, inicialmente se realizan 30 lecturas de voltaje cada 40 microsegundos y se obtiene la media, seguido se calcula un coeficiente de compensación en (9) que dependerá de la temperatura del líquido y con el que se compensará el voltaje de lectura (10), para finalmente calcular el valor de TDS con (11).

$$CC = 1.0 + 0.02 * (t_{Liquido} - 25.0) \quad (9)$$

$$VC = \frac{V}{CC} \quad (10)$$

$$TDS = (133.42 * VC^3 - 255.86 * VC^2 + 857.39 * VC) * 0,5 \quad (11)$$

Debido a la compensación por temperatura el fabricante recomienda el uso de un sensor que permita realizar este proceso con mayor precisión, por tal razón se implementó una sonda de temperatura sumergible DS18B20, la cual cuenta con un rango de alimentación parecido entre 3 a 5.5 Voltios, en la Figura 9 se muestra la sonda de temperatura sumergible.



**Figura 9** Sonda de temperatura sumergible DS18B20

Una de las principales cualidades de la sonda de temperatura es su interface de comunicación 1-wire, que permite transmitir los datos por un único pin digital con una resistencia de pull-up, en la Tabla 5 se encuentran las especificaciones técnicas de la sonda.

**Tabla 5** Especificaciones técnicas sonda de temperatura DS18B20

| Especificación          | Valor        |
|-------------------------|--------------|
| Voltaje de alimentación | 3,0 a 5,5 V  |
| Corriente de Operación  | 2 mA         |
| Rango temperatura       | -55 a 125 °C |

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| Precisión temperatura    | $\pm 2$ °C   |
| Ouput                    | 1-wire       |
| Temperatura de operación | -55 a 125 °C |
| Costo aproximado         | 9 USD        |

#### 4.1.4. Sensor temperatura y humedad del ambiente

Otra variable que fue de vital importancia monitorear es la temperatura y humedad del ambiente. Para esto se usó un sensor AM2302 basado en el DHT22. Su uso es común debido a su interfaz de conexión 1-wire, el cual puede ser asociado a microcontroladores o tarjetas de desarrollo, a diferencia del DHT21 este cuenta con mayor precisión y una mejor resolución en su medición. En la Figura 10 se muestra el sensor.



**Figura 10** Sensor de temperatura y humedad ambiente AM2302

La principal cualidad es que este sensor permite monitorear las dos variables al mismo tiempo, lo cual representa una disminución en la energía, tamaño e inversión y está conformado por un sensor de humedad capacitivo de polímero y un termistor, en la Tabla 6 se encuentran las especificaciones técnicas.

**Tabla 6** Especificaciones técnicas sensor AM2302

| Especificación           | Valor        |
|--------------------------|--------------|
| Voltaje de alimentación  | 3,0 a 5,5 V  |
| Corriente de Operación   | 2,5 mA       |
| Rango temperatura        | -40 a 125 °C |
| Resolución temperatura   | 0,1 °C       |
| Precisión temperatura    | $\pm 0,5$ °C |
| Rango humedad            | 0 a 100 %RH  |
| Resolución humedad       | 0,10%        |
| Precisión humedad        | $\pm 2$ %    |
| Ouput                    | 1-wire       |
| Temperatura de operación | -50 a 130 °C |
| Costo aproximado         | 9 USD        |



## 4.2. Caracterización de los parámetros físicos del sustrato

El cultivo fue sembrado en bolsas de 40 litros de sustrato, todas las materas fueron preparadas por el mismo proveedor con la composición de la Tabla 7, razón por la cual se consideró que las características físicas fueron homogéneas en todo el cultivo, se procedió a realizar las pruebas organolépticas donde se identificaron: las curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica, por medio del procedimiento planteado por Hillel et al. (1972) el cual es aplicado a sustratos por López et al. (2008) .

**Tabla 7** Composición del sustrato

| Componente                  | % Composición |
|-----------------------------|---------------|
| Bioford                     | 3%            |
| Cascarilla mona             | 80%           |
| Cascarilla de arroz quemada | 7%            |
| Pino                        | 5%            |
| Coco                        | 5%            |
| <b>Total</b>                | <b>100%</b>   |

### 4.2.1. Curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica

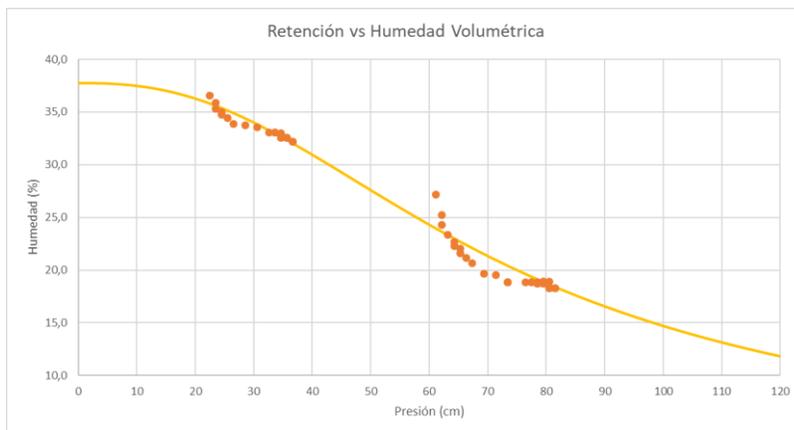
Para trazar la curva de retención de humedad se remplazaron los valores obtenidos a partir de las pruebas organolépticas del Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en (4), teniendo en cuenta que el valor de  $m$  se calcula con (12), y la curva de conductividad hidráulica no saturada de Van Genuchten et al. (1991) con (13) que depende de  $S_e$  en (14).

$$m = 1 - \frac{1}{n} = 0.6034 \quad (12)$$

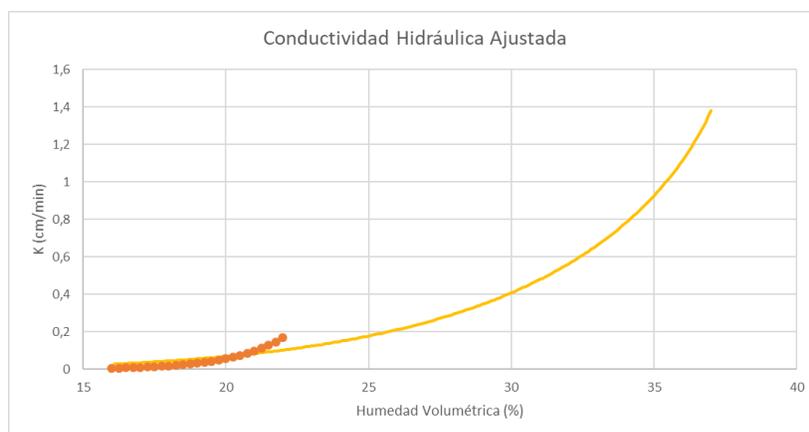
$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (13)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (14)$$

En la Figura 11 y Figura 12 se muestran las curvas del sustrato ajustadas a los modelos propuestos por Van Genuchten et al. (1991), también los datos de tensión y conductividad hidráulica sin ajustar respectivamente.



**Figura 11** Curva de caracterización del sustrato modelo de Van Genuchten et al. (1991)



**Figura 12** Curva de conductividad hidráulica ajustada al modelo de Van Genuchten et al. (1991)

Por último, con la curva caracterización del sustrato se identificaron el rango de humedad para el agua difícilmente disponible (ADD), el agua de reserva (AR), el agua fácilmente disponible (AFD) y la capacidad de aireación (CA), mostrados en la Tabla 8, es importante resaltar que el sustrato puede superar la humedad de saturación, pero esto significará que la capacidad de aireación disminuirá y el porcentaje de aire será insuficiente para la planta y sus raíces teniendo un efecto negativo.

**Tabla 8** Rangos disponibilidad de agua

| ADD                | AR                           | AFD                          | CA                 |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| $\theta < 14,71\%$ | $14,71\% < \theta < 27,59\%$ | $27,59\% < \theta < 37,49\%$ | $\theta > 37,49\%$ |

#### 4.2.2. Pruebas con pulsos de flujo sin planta

Después de haber determinado los intervalos en que las plantas tendrán una adecuada disponibilidad de agua, se procedió con las pruebas que permitieron identificar la dinámica en el sustrato, para esto se variaron distintas condiciones, como el pulso de agua, las condiciones iniciales y la periodicidad. Es importante resaltar que en estas no había presencia de la planta.

La primera fue aplicar un pulso de agua muy superior al de los goteros, con el sustrato seco en las tres profundidades, con el objetivo de conocer la dinámica a un paso de su estado menos húmedo hasta uno superior a la saturación, se instalaron los tres sensores de igual forma que el anterior ejercicio, después con la bomba de agua y una regadera se aplicó de forma uniforme un pulso de agua a 1,48 L/min, y se midió cómo variaba la humedad.



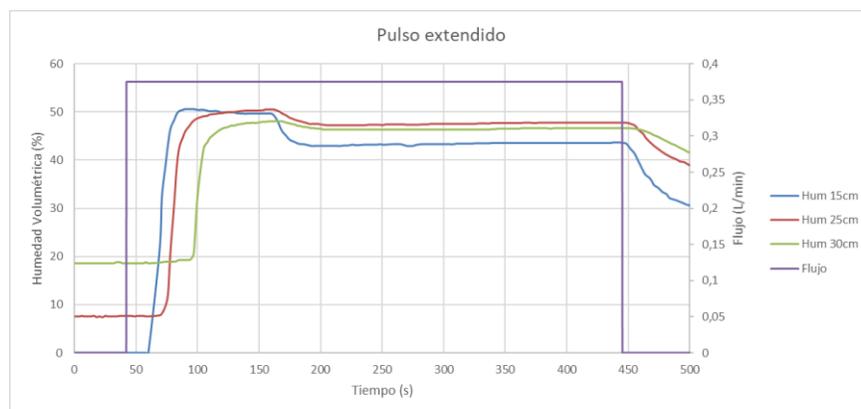
**Figura 13** Respuesta al pulso de 1,48 L/min

En la Figura 13 se muestra la respuesta al impulso de las tres profundidades, en este se puede notar cómo el sustrato aumenta su humedad volumétrica iniciando con la menos profunda hasta la zona de lixiviación, el retardo que se presenta en los primeros 48 segundos después de iniciado el pulso se debe a la baja conductividad hidráulica del sustrato con una humedad baja inicial, considerando que esta situación no se alcanzara en el cultivo, se espera que el retardo disminuya a medida de que se tenga una mayor humedad residual.

Otro factor que es relevante en el análisis del anterior experimento fue el tiempo y cantidad de agua lixiviada, cuando la profundidad de 30cm del sustrato alcanzó aproximadamente el 50% de humedad volumétrica se inició con la lixiviación de agua, el

flujo de agua lixiviada fue aumentado hasta ser considerablemente cercana a la aplicada, evidenciando que para ese punto el sustrato ya había superado su capacidad de absorción y aunque la humedad aumentase, se estaría disminuyendo la capacidad de aireación.

Continuando con las pruebas se utilizó un gotero con flujo de 0,375 L/min, con el cual se aplicaron distintos pulsos de agua variando el tiempo y las condiciones iniciales del sustrato, el primer ejercicio fue aplicar un pulso de 7 minutos con humedad residual en las profundidades de 25 y 30 cm, pero seca a la profundidad de 15 cm, la Figura 14 muestra los resultados del pulso, en el cual se observó un retardo en la respuesta debido nuevamente a la baja conductividad hidráulica para la profundidad de 15 cm, pero que para las profundidades de 25 cm y 30 cm presentó una disminución respecto al anterior ejercicio, debido a su humedad residual.



**Figura 14** Pulso de agua a 0,375 L/min con humedad residual en dos profundidades

Sin embargo, nuevamente se evidenció un flujo de agua lixiviada muy parecido al aplicado aproximadamente a los 2 minutos de iniciado el pulso, esto coinciden con la disminución de humedad que se ve en las tres profundidades siendo más pronunciada a los 15 cm, después de esto, aunque se continuo con la aplicación de agua la humedad en las tres profundidades no vario significativamente.

Lo siguiente fue verificar el anterior ejercicio, pero con humedad residual en todo el sustrato, siendo este el caso más próximo a la realidad del riego cotidiano, la Figura 15 muestra los resultados de humedad, donde se evidenció cómo el retardo de la respuesta

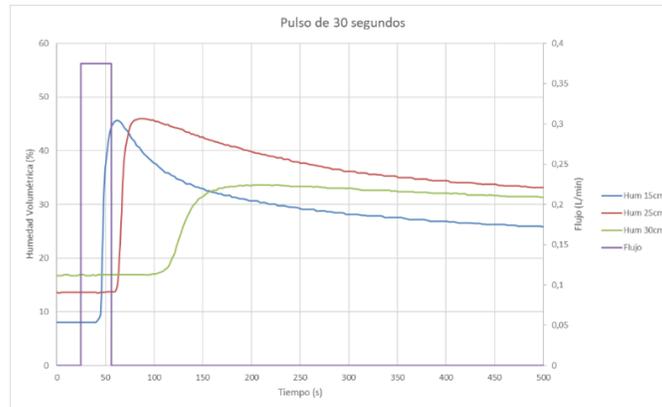
disminuyó debido a la humedad inicial, aun así, algunos factores como lixiviación y la caída de humedad se evidenciaron de igual manera.



**Figura 15** Pulso de agua a 0,375 L/min con humedad residual en todo el sustrato

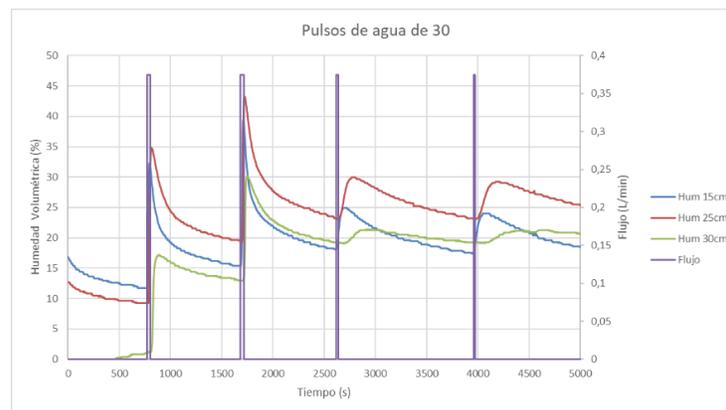
Después de haber analizado la respuesta de humedad de los anteriores ejercicios se pudo concluir que un pulso superior a dos minutos lixiviará, algo que solo se desea cuando se requiere un lavado debido a la alta concentración de sales, aunque realizando riegos como los de las anteriores pruebas se podría asegurar la disponibilidad de agua. También es evidente el gasto de agua que se estaría perdiendo, por lo anterior se decidió realizar pruebas con pulsos de menor duración, con el objetivo que el agua aplicada solo alcance la profundidad de 15 cm y la mayoría se quede en este punto sin llegar a la zona de lixiviación.

El primer ejercicio fue un pulso de 30 segundos con un flujo de 0,375 L/min, en este caso existía humedad residual en todo el sustrato, la Figura 16 muestra los resultados, visualizando inicialmente el retardo en la respuesta y cómo el agua fluye por el sustrato, primero alcanzando saturación a 15 cm de profundidad. Debido a la corta duración del pulso es importante conocer la respuesta posterior, donde se observa como la humedad tiende a estabilizarse en las tres profundidades, pero con la excepción que la zona de lixiviación absorbe el agua proveniente de las capas superiores y alcanza una estabilidad con mayor humedad.



**Figura 16** Pulso de agua de 30 segundos con humedad residual

Con esto se verificó que aunque el tiempo de riego sea corto, el agua se moverá hasta la zona de lixiviación buscando llegar a un equilibrio. Se procedió a aplicar un tren de pulsos con el fin de identificar dicho equilibrio y en la Figura 17 se muestran los resultados para 4 pulsos.



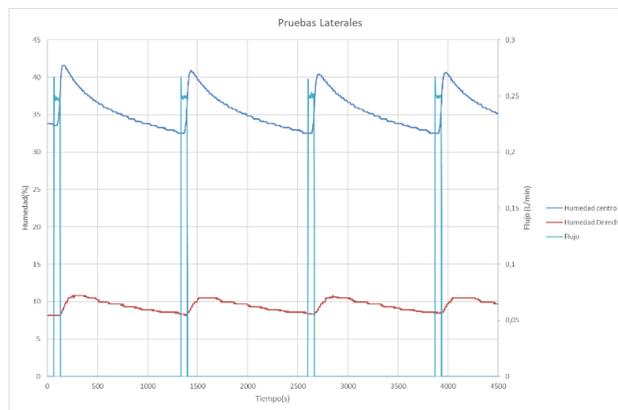
**Figura 17** Tren de pulsos de a 0,375 L/min

Inicialmente se humedeció una parte del sustrato y se organizó en la materia de forma que la parte más seca se encontrara en la zona de lixiviación y la de mayor humedad en las capas superiores, es importante resaltar que previo al riego el sustrato ya tendía a mover el agua. El primer pulso tuvo una duración de 30 segundos y tal como se observa generó un cambio en las tres profundidades, pero principalmente en la zona de lixiviación, a los 15 minutos se aplicó un segundo pulso con la misma duración, este pulso nuevamente amentó la humedad en las tres profundidades consiguiendo igualarlas en rangos cercanos.

Los dos últimos pulsos tuvieron una duración de 20 segundos y con intervalos de aproximadamente de 25 minutos; en estos se observó cómo la variación en la zona de lixiviación es menor a la de las capas superiores, y cómo el agua se estabiliza, asegurando que no se generará lixiviación y el agua aplicada se mantendrá en la zona radicular.

#### 4.2.3. Pruebas laterales bulbo húmedo zona radicular

En la anterior sección se evaluó el comportamiento del agua de forma vertical, midiendo la humedad a distintas profundidades, en esta sección se intentó conocer el comportamiento de forma horizontal colocando sensores a una misma profundidad, pero en distintas posiciones, un sensor en el extremo y otro en el centro de la maceta, posteriormente se aplicó un tren de pulsos con duración de 60 segundos cada 22 minutos. La Figura 18 muestra los resultados del experimento



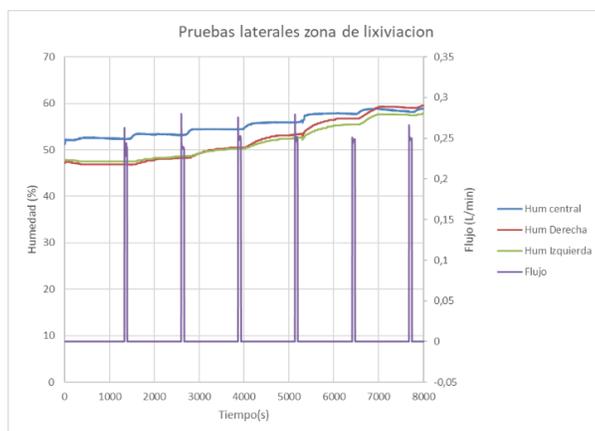
**Figura 18** Pruebas laterales del bulbo Húmedo a 15 cm de profundidad

Los anteriores resultados muestran cómo, aunque la humedad en el extremo de la maceta aumenta después del pulso, lo realiza en una menor cantidad y con un mayor retardo, manteniéndose en el rango de agua de reserva, mientras que en el centro de la maceta alcanza valores en el rango de agua fácilmente disponible, lo anterior podría afectar el sistema de control. En general el bulbo húmedo formado en el sustrato tiene a tener una mayor distribución hacia capas inferiores y menor de forma lateral, consecuencia de su bajo retención. Este fenómeno podría disminuir a medida que la humedad fuera mayor, pero podría requerir que sea llevado a valores muy cercanos a la saturación.

Para evitar que la baja retención del sustrato altere el sistema de control y dificulte la lectura adecuada de los sensores, se decidió colocar el sensor de los 15 cm dentro de la materia, ubicado debajo del gotero y donde se lograra medir la humedad con mayor precisión, esto es posible gracias a la protección IP68 del sensor el cual puede ser sumergido en agua por extensos intervalos de tiempo, aplicando para los dos sensores.

#### 4.2.4. Pruebas laterales bulbo húmedo zona lixiviación

Al igual que la anterior sección en esta se buscó identificar la dinámica del agua en la zona de lixiviación, la cual se encuentra a 35 cm de profundidad donde se ubican 10 orificios de lixiviación, en este caso se instaló un sensor en el centro de la materia y dos más ubicados en los extremos, posteriormente se aplicó un tren de pulsos de 60 segundos cada 22 minutos y se monitoreó en los tres puntos. La Figura 19 muestra los resultados del experimento.



**Figura 19** Pruebas laterales del bulbo Húmedo a 30 cm de profundidad

A diferencia de la zona radicular se puede observar que en esta área el agua tiende a distribuirse con mayor uniformidad, siendo menor la diferencia entre los extremos y centro, esto principalmente debido a que el agua al no poder descender, tiende a moverse a los extremos en busca de los orificios de lixiviación, adicionalmente se evidencia que al aumentar la humedad esta diferencia tiende a disminuir y por ende las mediciones serán más cercanas, debido a lo anterior se decidió que el sensor de lixiviación se ubicara externo a la bolsa en uno de los orificios de lixiviación.

### **4.3. Implementación del controlador velocidad en la bomba de riego**

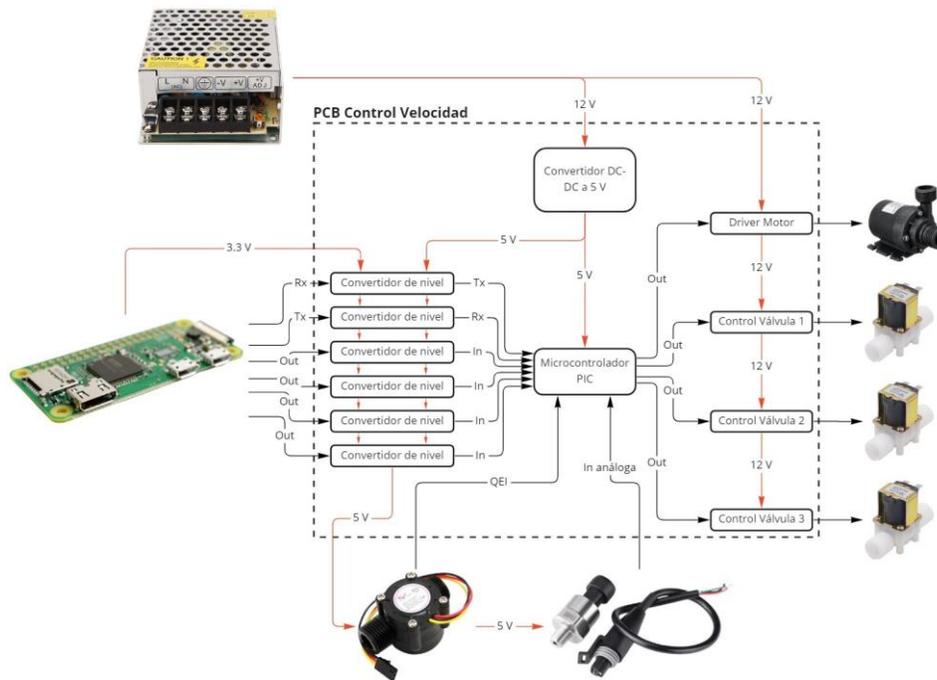
En los sistemas de riego presurizados la uniformidad dependerá de la presión de trabajo, razón por la cual asegurar una presión constante a la salida de la bomba garantiza un correcto funcionamiento, con el fin de alcanzar dicho objetivo se instaló un control de velocidad y un sensor de presión, para así implementar un control de lazo cerrado.

El control PI tendrá como referencia la presión de trabajo del sistema y como salida la velocidad de la bomba de riego, a medida que la línea de riego fue más grande o estuviera a una mayor distancia, se requeriría de un incremento de velocidad en la bomba para alcanzar la presión deseada, mientras que en líneas pequeñas a cortas distancias se requerirá una menor velocidad, inicialmente la bomba trabajó con una capacidad constante en lazo abierto a máxima velocidad alimentando las 20 plantas simultáneamente, la implementación del lazo de control tendrá un impacto directo en el consumo de energía debido a que la bomba dejará de trabajar a máxima potencia.

Otro factor que aportó a la uniformidad del sistema de riego fueron los goteros, los cuales fueron auto compensados con un caudal de 8 litros por hora, estos goteros trabajan de forma uniforme en un rango más amplio de presión, por lo cual, cambios debido a la topografía, no afectaron el comportamiento del sistema. Como aporte en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se realizó una analogía con cultivos de mayor envergadura.

#### **4.3.1. Diagrama de bloques control de velocidad**

El control velocidad se encargó de la bomba teniendo como referencia una presión ideal para que los goteros auto compensados aseguren un caudal uniforme, adicionalmente midió el flujo de agua a la salida con el fin de determinar el consumo para cada línea en los respectivos intervalos de riego, por otra parte se implementó el control para la apertura de las válvulas de cada línea, es importante resaltar que aunque la bomba pueda alimentar las tres líneas al tiempo se espera que solo se abra una a la vez con el fin de evitar errores en la medición de consumo. La Figura 20 muestra el diagrama de bloques, en este se incluyen los convertidores de nivel para la comunicación con el ordenador de placa reducida y la conexión de los sensores.



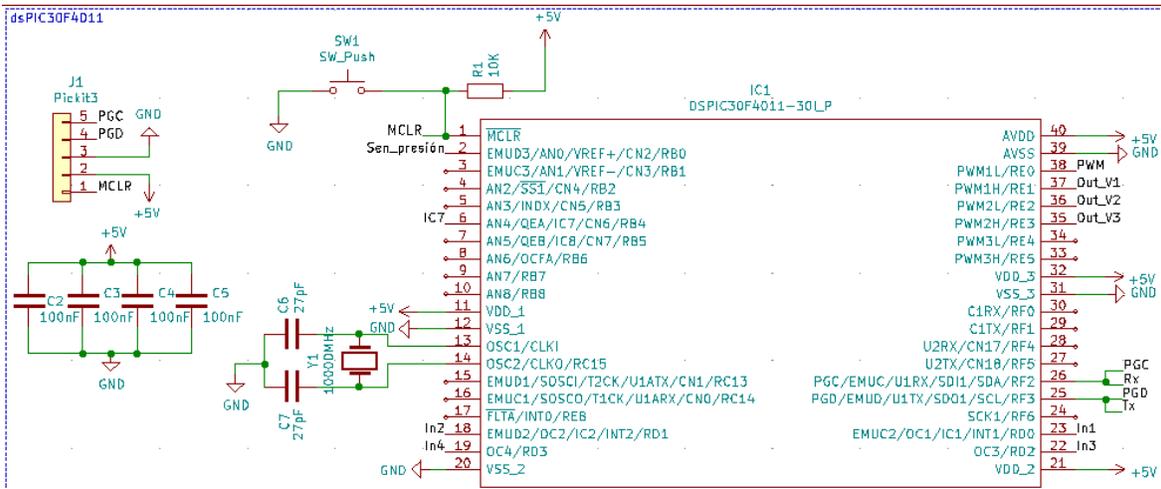
**Figura 20** Diagrama de bloques control de velocidad

Dado al alcance de este proyecto se decidió utilizar una fuente de voltaje externa a 12V y un conversor DC, que entregara una salida de 5 voltios para alimentar el microcontrolador y los sensores.

#### 4.3.2. Diseño circuito Microcontrolador

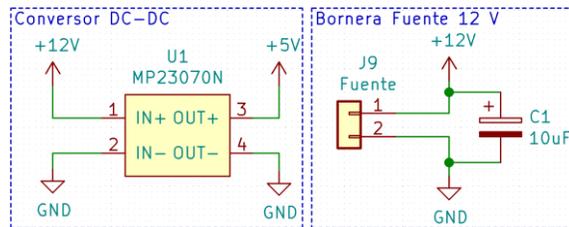
Debido a la gran variedad de microcontroladores que existen en el mercado, la elección se realizó partiendo de una lista de requerimientos y necesidades, principalmente: el control de un motor DC, un puerto serial, una interfaz Input Capture, entradas análogas y digitales. Aun así, la lista de microcontroladores que cumplen estas necesidades sería bastante extensa, por lo cual se decidió enfocarse en los que sean comercialmente usados.

El dsPIC30F4011 es un microcontrolador de 16-bits fabricado por *Microchip Technology Inc.* de la familia dsPIC30 especializada en el control de motores, aunque podría estar sobredimensionado y lo ideal sería usar microcontroladores de la misma familia como el dsPIC30F3010 con una menor cantidad de pines y periféricos, debido a la disponibilidad en el mercado, para este prototipo se utilizó el inicial.



**Figura 21** Circuito conexiones del dsPIC30F4011

La Figura 21 muestra las conexiones básicas del microcontrolador recomendadas por el fabricante, adicionalmente se dejó un puerto de 5 pines en el que se puede conectar el Pickit 3 para su programación, para la alimentación se añadieron capacitores de filtrado y un pulsador de reset, como fuente de reloj se utilizó un cristal de 10000 Mhz.



**Figura 22** Circuito convertidor de Voltaje a 5V y bornera a 12V

Como convertidor de voltaje se implementó un Módulo MP2307, en la Figura 22 se muestra su conexión y adicional la bornera de alimentación con un capacitor de filtrado para asegurar la integridad y calidad de la alimentación.

### 4.3.3. Sensores de presión y flujo

Para medir la presión del sistema se utilizó un transductor lineal con un rango que fue establecido después de realizar pruebas en campo con la bomba y el sistema de riego, en la Tabla 9 se muestran las especificaciones técnicas del transductor, las principales ventajas que ofrece este sensor es el rango de trabajo a su salida, el cual permite identificar si no existe conexión y adicional su bajo error.

**Tabla 9** Especificaciones técnicas del transductor de presión

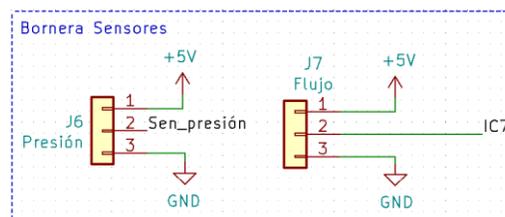
| Especificación          | Valor       |
|-------------------------|-------------|
| Voltaje de alimentación | 5.0 V       |
| Voltaje de salida       | 0,5 a 4,5 V |
| Rango de medición       | 0 a 10 psi  |
| Error                   | ± 2 %       |
| Grado de protección     | IP65        |
| Tipo conexión           | 1/4" NPT    |

Para medir el flujo de agua se usó el sensor YF-201, el cual consta de un cuerpo de válvula plástico, un rotor de agua y un sensor de efecto Hall. A medida que el agua fluye a través del rotor, haciéndolo girar, varía la frecuencia de salida del sensor Hall. En la tabla se muestran las especificaciones técnicas del fabricante, el proceso de calibración se expone en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

**Tabla 10** Especificaciones técnicas sensor de flujo

| Especificación          | Valor         |
|-------------------------|---------------|
| Voltaje de alimentación | 4,5 a 18 V    |
| Voltaje de salida       | 0,5 a 4,5 V   |
| Rango de medición       | 0.3 a 6 L/min |
| Corriente de trabajo    | 15 mA         |
| Temperatura máxima      | ≤80 °C        |
| Presión máxima          | ≤250 psi      |
| Tipo conexión           | 1/4" NPT      |

Dado que la salida del sensor de flujo es un tren de pulsos, se utilizó una de las entradas del periférico *Input Capture* del microcontrolador, la cual fue configurada como un detector de frecuencia que permitió determinar la medición de este, en la Figura 23 se muestran los circuitos de conexión para ambos sensores, el primero conectado al convertor ADC y el segundo conectado al pin IC7 del microcontrolador.



**Figura 23** Circuito conexión sensores de presión y flujo

#### 4.3.4. Conversores de nivel lógico

Dado que es necesaria la comunicación entre el ordenador de placa reducida y el microcontrolador se diseñaron 6 conversores de nivel lógico, 2 para transmisor y receptor de la UART y 4 para entradas y salidas digitales, la Figura 24 muestra los 6 canales de conversión haciendo uso de MOSFETs 2N7000. Para la fuente de 3,3V se utilizó la proveniente del ordenador de placa reducida, esto con el fin de evitar la implementación de un convertor adicional.

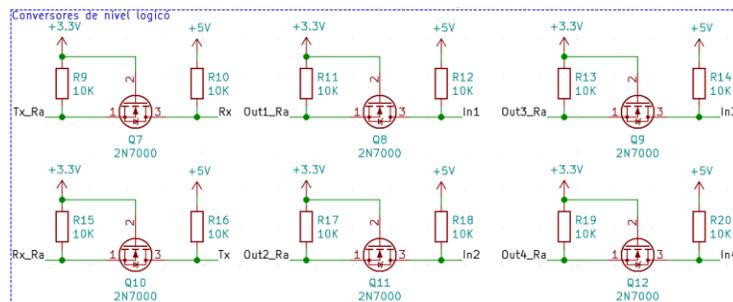


Figura 24 Conversores de nivel lógico

La conexión del ordenador se realizó por medio del puerto de 8 pines mostrado en la Figura 25, es de vital importancia que las tierras del ordenador y el circuito estén conectadas para el correcto funcionamiento de los conversores de nivel.

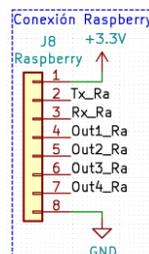
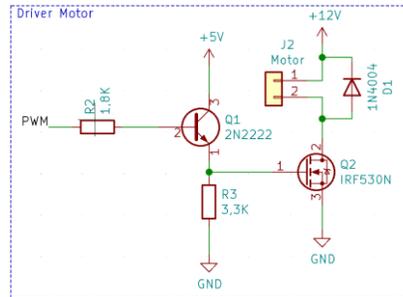


Figura 25 Puerto conexión para el ordenador

#### 4.3.5. Diseño driver bomba de agua

Normalmente para el control de motores DC se implementan puentes H, los cuales permiten por medio de conmutación coordinada variar la velocidad y sentido de giro de los motores, pero dado que se desea controlar una bomba de agua, y en esta no se requiere variar su sentido de giro, lo más adecuada fue implementar un sistema de conmutación con un

MOSFET. Para más información sobre la bomba de agua revise el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



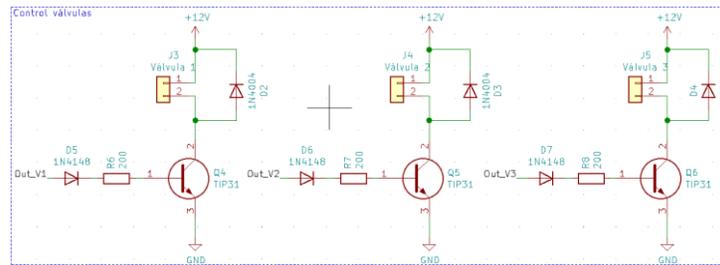
**Figura 26** Circuito de conmutación para bomba de agua

La Figura 26 muestra el circuito compuesto por: un MOSFET IRF530N, el cual soporta voltajes entre *drain* y *source* de 100V y una corriente de 12A; un transistor que proteger la integridad de la salida PWM del microcontrolador y asegurar la correcta conmutación; por último, paralelo a la carga se ubicó un diodo de protección para corrientes inversas generadas por el motor.

#### **4.3.6. Diseño control válvulas de apertura**

El control de apertura de cada línea de riego se realizó con electroválvulas de 12V, para la energización se diseñó un circuito con transistores TIP31C, el cual es habilitado por las salidas digitales del microcontrolador, en la figura se muestra el circuito compuesto por tres transistores, diodos en paralelo a la bobina de la electroválvula y diodos a las salidas del microcontrolador como protección a corrientes inversas.

El consumo de corriente de cada electroválvula es de 0.3A, en caso de que se energizaran las tres al mismo tiempo, la corriente sería considerablemente alta y debería tenerse en cuenta para el diseño de la PCB y elección de la fuente, sin embargo, como se mencionó anteriormente para el presente proyecto solo se habilito una válvula por ciclo de riego.



**Figura 27** Circuito de control para válvulas de apertura

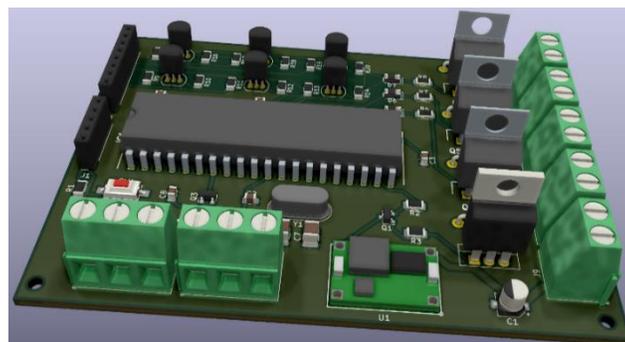
### 4.3.7. Diseño PCB control de velocidad

Partiendo de los esquemáticos anteriormente expuestos, se procedió con el diseño de la PCB en la que se implementarían la totalidad de los componentes, el primer paso fue verificar la disponibilidad de cada uno y las medidas reales, debido a el consumo de la bomba y válvulas se realizó el cálculo del ancho de pista para la alimentación de 12V con una corriente máxima de 4A, siguiendo (15) y (16) recomendada por la IPC (2012), con las siguientes constantes para capas exteriores  $K_1 = 0.048$ ,  $K_2 = 0.44$  y  $K_3 = 1.379$  y un  $\Delta T = 25^\circ C$ .

$$\text{Área} = \left( \frac{I}{K_1 * \Delta T^{K_2}} \right)^{K_3} = 63.18 \text{ mil}^2 \quad (15)$$

$$\text{Ancho} = \frac{\text{Área}}{1.378} = 45.85 \text{ mil} = 1.17 \text{ mm} \quad (16)$$

En la Figura 28 se muestra el modelo 3D de la placa diseñada en el software Kicad, con los componentes montados, incluyendo borneras de conexión para sensores y actuadores, los puertos de programación y de comunicación con la Raspberry. En el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentra el listado de componentes.

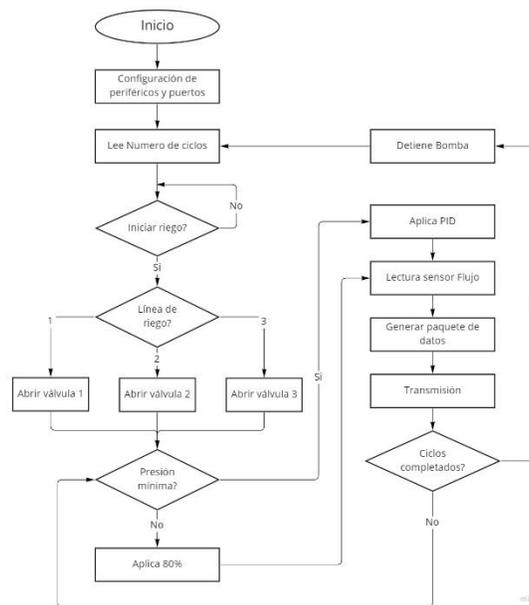


**Figura 28** Placa PCB control de velocidad en el software Kicad

En base al anterior diseño se procedió con la fabricación de la placa y el montaje de los componentes para su posterior prueba con los sensores y actuadores.

#### 4.3.8. Algoritmo microcontrolador

El siguiente paso fue la implementación del algoritmo en el microcontrolador, en la Figura 29 se muestra el diagrama de flujo, primero se inicializan los periféricos como: puerto serial, entradas y salidas digitales, conversor análogo digital e interfaz Input Capture. Seguido el microcontrolador esperará a que el ordenador de placa reducida envíe por el puerto serial el número de ciclos que deberá encender la bomba, donde cada ciclo representa un tiempo de 0,125 ms.



**Figura 29** Flujo del algoritmo implementado en dsPIC30F4011

Al recibir la orden de iniciar el riego, el microcontrolador verifica por medio de las tres entradas digitales, qué línea debe habilitar, dando apertura a la válvula indicada, posteriormente como medio de seguridad se verifica una presión mínima de trabajo para que entre a funcionar el control PI, la cual fue determinada en campo con un valor de 2,6 psi, al superar este valor de presión las tuberías se encuentran llenas en su mayoría, y el controlador puede entrar a funcionar manteniendo una presión constante y por ende también el flujo, en cada ciclo será enviado vía serial al ordenador: la presión, el flujo y el porcentaje de PWM

aplicado a la bomba. Una vez sean completados los ciclos de encendido el control cambiará la referencia a 0 psi, y detendrá la bomba, al igual que el riego, posterior a esto, enviará datos durante 10 segundos con el fin de medir correctamente el consumo de cada riego.

Adicionalmente se implementaron dos filtros de media móvil exponencial para la lectura de la presión y del flujo respectivamente, con el fin de reducir el ruido en la señal analógica, (17) muestra la fórmula aplicada para los filtros, donde el termino  $S$  corresponde a la medición filtrada y  $Y$  a la medición sin filtrar, para los valores de  $\alpha$  se utilizó un conjunto de datos recogidos, en los cuales se buscó el mejor ajuste de forma manual y se encontró la mejor respuesta, para el caso del flujo en  $\alpha = 0.18$  y para la presión  $\alpha = 0.16$ . En el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el código implementado en el microcontrolador.

$$S(t) = \alpha Y(t) + (1 - \alpha)S(t - 1) \quad (17)$$

#### **4.3.9. Montaje de la tubería e instalación del control de velocidad**

Posterior al diseño del sistema se procedió con la instalación de la bomba, control de velocidad, sensores, actuadores y filtros necesarios para su correcto funcionamiento, el montaje principal inicia con una válvula de pie, la cual tiene incorporado un filtro, con el fin de evitar la succión de partículas que pudieran afectar el funcionamiento de la bomba, en la descarga se ubicó el sensor de presión y un filtro que eliminó las partículas más pequeñas que pudieran llegar a afectar o bloquear el funcionamiento de los goteros, finalmente previo a la distribución se ubicó el sensor de flujo, en la Figura 30 se muestra el montaje instalado.



**Figura 30** Montaje bomba de riego

Para la apertura y cierre en cada una de las líneas de riego, se incorporaron tres electroválvulas de 12 voltios de 1/2", las cuales fueron colocadas dentro de cajas plásticas de 10x10 cm para intemperie, con protección IP64, a estas se les adaptaron dos conectores que permitieran conectar de forma segura las mangueras 16 mm de cada una de las líneas, en la Figura 31a se muestra la conexión interna de la caja mientras que la Figura 31b muestra el dispositivo instalado en el cultivo, para asegurar la integridad de la caja se utilizaron prensa cables IP65 para la conexión eléctrica.



**a.** Instalación eléctrica



**b.** Caja instalada

**Figura 31** Electroválvula 12 voltios para control de riego

Como última parte se instaló la caja eléctrica donde se colocó el control de velocidad, fuente de voltaje externa, esta fue escogida para intemperies con una protección IP68, y fue ubicada en la parte central entre las líneas y bomba de riego, con el fin de minimizar el extendido de cable en alguna dirección, todos los cables fueron instalados con prensa cables IP65, la Figura 32 muestra el armario instalado.



**Figura 32** Caja eléctrica para control de velocidad

#### **4.3.10. Caracterización del sistema de riego y diseño del PI**

Instalado el control de velocidad y la bomba de riego, se procedió con la identificación de la dinámica entre la presión a la salida de la bomba y el PWM aplicado a la misma, para esto se aplicó una entrada constante al 80%, y se midió la respuesta al escalón con el sensor de presión, después con ayuda de la herramienta “*System Identification*” del software Matlab, se halló una función de transferencia en el dominio de  $Z$ , la cual pudo ser usada como punto de referencia en la sintonización del control PI en la herramienta “*PID Tuner*”, la tasa de muestreo fue de 0.125 s y en (18) se muestra la función de transferencia que más se ajustó a la dinámica, con un coeficiente de relación del 84.64%.

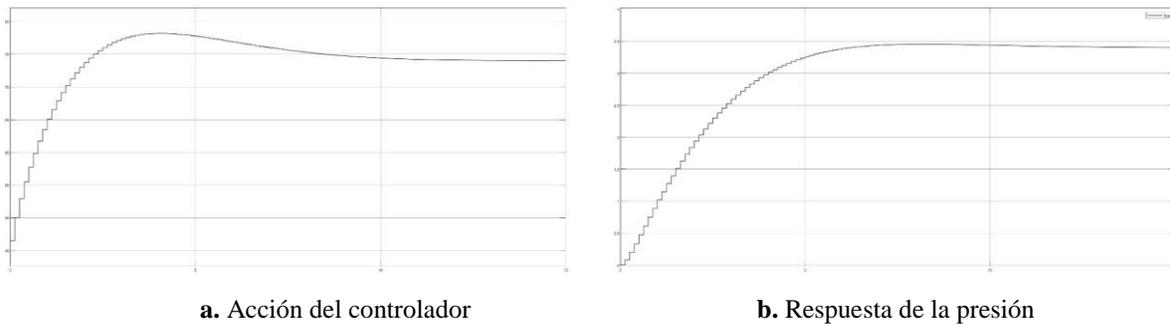
$$H(z) = \frac{0.001744z}{z^2 - 1.373z + 0.411} \quad (18)$$

En un principio se consideró la posibilidad de implementar un controlador PID de presión, pero dado que el sistema conto con un tiempo de llenado de tuberías el cual asegurara una presión mínima de trabajo para el controlador, no se requiere de la parte derivativa para hacerlo más robusto, por lo anterior se decidió implementar un controlador PI discreto.

Posteriormente con ayuda de la función de transferencia se realizó el ajuste, buscando las siguientes características: este debía ser rápido y no era necesario que fuera un controlador robusto, debido a que el sistema de goteo no tendría variaciones o perturbaciones significativas a lo largo de su funcionamiento. En (19) se muestra la función de transferencia para el controlador, donde  $P = 13.7$  corresponde a la constante proporcional,  $I = 10.9$  corresponde a la integrativa, y  $T_s = 0.125$  corresponde al tiempo de muestreo.

$$PI(z) = P + I * T_s \frac{1}{z - 1} \quad (19)$$

Para verificar la anterior información se realizó la simulación en la herramienta Simulink del software Matlab, limitando la señal de control, entre 0 y 100%, y tomando un setpoint 3.6 psi, la Figura 33a muestra la acción del controlador en porcentaje, mientras que la Figura 33b muestra la respuesta del sistema.



**Figura 33** Resultados de la simulación del control PI de presión

Para poder calcular la acción de control en el microcontrolador fue necesario pasar la función de transferencia  $PI(z)$  a términos del error actual  $e(k)$ , error anterior  $e(k - 1)$ , la salida  $c(k)$  y la salida anterior  $c(k - 1)$ , como resultado de este proceso se obtuvo (20), la anterior ecuación fue implementada en el controlador y probada en el sistema anteriormente diseñado.

$$c(k) = P(e(k) - e(k - 1)) + I(T_s * e(k - 1)) + c(k - 1) \quad (20)$$

#### **4.4. Diseño del sistema automatizado de riego y monitoreo**

En esta etapa se procedió con el diseño de los módulos de censado, en los que se implementaron los sensores escogidos y validados en la etapa 1, el principal objetivo de esta etapa fue crear una red que permitiera recolectar la información del estado general de cada una de las plantas supervisadas, y almacenarla en una base de datos que fue utilizada para toma de decisiones del comportamiento del cultivo y la evaluación general del sistema, en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se exponen la comparación entre una red RS485 y una red wifi.

Adicionalmente con el fin de aportar información a la fertirrigación se implementaron tablas y gráficas que permitieran identificar situaciones como: elevada concentración de sales en el sustrato después de la fertilización, bajo y elevado pH en el sustrato, elevada concentración de sales en el agua de riego y una en caso de que la humedad sea muy alta con riesgos de afectar la capacidad de aireación de la zona radicular.

##### **4.4.1. Elección de la red de comunicación**

Una vez identificadas y descritas las redes de comunicación que se podrían adaptar al proyecto, se evaluó cuál de estas era la que mejor se acopla a sus necesidades, teniendo en cuenta los siguientes factores: costos de implementación, complejidad, confiabilidad, mantenimiento y sostenibilidad, haciendo especial énfasis que la solución aquí propuesta podrá ser implementada en cultivos de mayor envergadura donde una válvula de riego puede llegar a cubrir una extensión más amplia y un mayor número de plantas.

Aunque el costo de la red RS485 para el cultivo que se plantea en este proyecto sea baja, depende directamente de la extensión del cultivo y de la cantidad de materas que se deseen monitorear, razón por la cual en cultivos con mayor envergadura y número de puntos a medir, su despliegue puede convertirse en algo más complejo y su costo puede aumentar considerablemente, otro factor que es importante evaluar es la distribución de los puntos de medición, dado que puede que no obedezcan a una línea recta y en topologías de bus se recomienda que las derivaciones sean lo más cortas posibles, debido a esto se debería buscar

que el bus pase cerca de cada una de las materas aumentando así la longitud del bus de datos principal.

Ahora realizando un análisis desde el punto de vista del agricultor, el despliegue de cables por el cultivo no es algo aconsejable ya que puede entorpecer tareas diarias como la cosecha y poda, aunque bien planeado en la fase de montaje de un cultivo, esta red podría adaptarse de mejor forma y reducir sus costos sin necesidad de dificultar las tareas de los agricultores.

Por otra parte, aunque la red inalámbrica de wifi tiene un mayor costo para el cultivo aquí planteado, este no variaría mucho con respecto al aumento de extensión en otros cultivos y número de materas monitoreadas, adicionalmente no limita los protocolos de comunicación que se deba tener con cada uno de los sensores, y por último, no genera cableado adicional que pueda afectar el desarrollo de actividades, aunque es de resaltar que los módulos diseñados para esta red deberán buscar minimizar el gasto de energía, encendiendo los sensores únicamente en los momentos de medición.

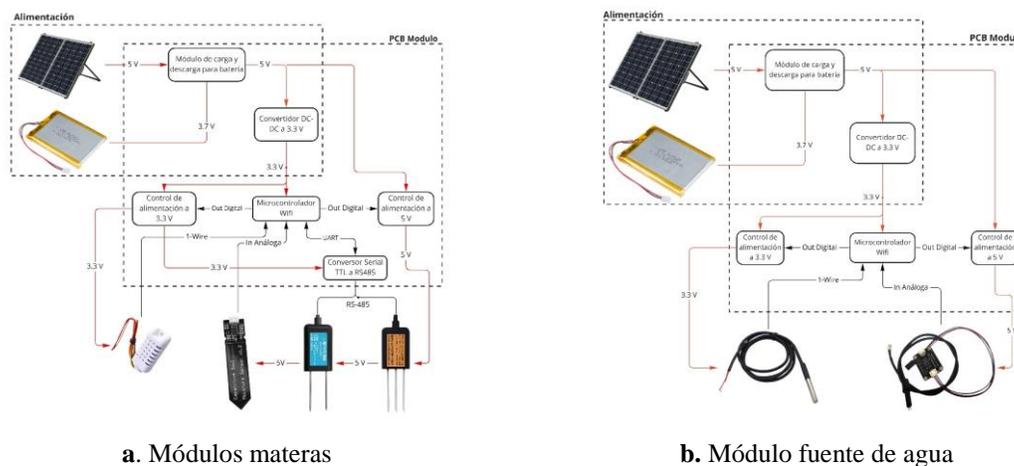
Para finalizar, aunque las dos redes ofrecen cualidades que pueden beneficiar al desarrollo de este proyecto, se decidió implementar la red inalámbrica Wifi ya que este permite la independencia de cada uno de los módulos de forma que estos puedan ser implementados en cualquier punto del cultivo sin la limitación de un bus de datos, adicionalmente es importante resaltar que normalmente las zonas rurales donde están ubicados los cultivos no siempre se tiene disponibilidad de red eléctrica y el desarrollo de módulos que trabajen de forma autónoma con energías renovables puede tener un mayor campo de aplicación en la agricultura.

#### **4.4.2. Diagrama de bloques de los módulos de medición**

Inicialmente se estableció un diagrama de bloques para los módulos de medición en las materas y fuente de agua, este funcionó como una guía al momento de diseñar cada una de las etapas e intento facilitar después su respectiva integración, en la Figura 34a se muestra el diagrama de bloques correspondiente a los módulos que se instalaron en las materas, donde se observan los 4 sensores elegidos y su tipo de comunicación, también se especifican dos bloques que representan el control de alimentación de los sensores, de tal manera que estos

puedan ser apagados cuando no se esté monitoreando, adicionalmente se identifica las etapas en la fuente de alimentación las cuales incluyeron un módulo de carga y descarga para la batería y un regulador de voltaje a 3.3 voltios que sirvió para alimentar el microcontrolador principal, es importante resaltar que la última etapa en ser diseñada fue la fuente de alimentación dado que primero fue necesario conocer las exigencias de corriente del circuito.

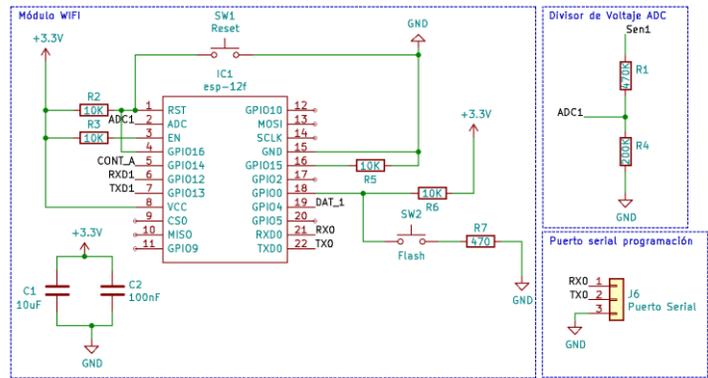
La Figura 34b muestra el diagrama de bloques correspondiente al módulo que se instaló en la fuente de agua, donde se observan los 2 sensores elegidos y su tipo de comunicación, al igual que en los anteriores módulos este también conto con una fuente de alimentación solar y dos bloques de control de alimentación para apagar los sensores.



**Figura 34** Diagramas de bloques módulos de medición

#### 4.4.3. Elección del módulo WIFI y diseño del circuito

El módulo que se propuso usar es el ESP-12F, este cuenta con un total 22 pines, 11 entrada/salidas de propósito general, 1 entrada análoga, 1 conversor análogo con resolución de 10 bits, comunicación UART y una memoria Flash de 32 Mb, características suficientes para las necesidades establecidas en la sección 4.4.2, este puede ser programado vía UART, y por tal razón en muchos casos se incorpora al circuito un integrado conversor usb a serial que permita su fácil programación, pero debido a que el principal objetivo es optimizar el espacio y energía solo se dejaron disponibles los pines donde se pueda conectar un conversor externo y programar el microcontrolador.



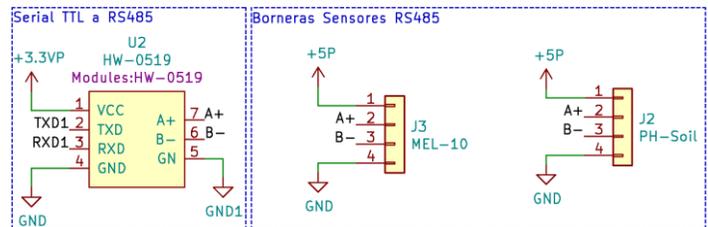
**Figura 35** Esquemático módulo wifi

En la Figura 35 se muestra el esquemático con las conexiones básicas del módulo ESP-12F para su correcto funcionamiento, es importante resaltar que fue necesario un divisor de voltaje a la entrada del ADC, dado que su rango es de 0 a 1 V, se añadieron dos condensadores con el fin de filtrar la alimentación y evitar picos de corriente.

#### 4.4.4. Conversor serial TTL a RS485

Con el fin de que el microcontrolador fuera capaz de comunicarse con los sensores escogidos en la sección 4.1.1 fue necesario el uso de un conversor a RS485, aunque existen distintos módulos basados en el integrado MAX485, se propuso utilizar un HW-0519, teniendo en cuenta que funciona a 3.3 V, es pequeño y tiene un bajo consumo.

Se creó por medio de programación un segundo puerto serial el cual está conectado a los pines de recepción y transmisión del módulo, adicionalmente las líneas A+ y B- del bus RS485 están conectadas a las bornearas de los sensores MEL-10 y PH-Soil, la alimentación de este módulo también fue controlada por el microcontrolador. En la Figura 36 se muestra las conexiones del módulo.



**Figura 36** Conexión del módulo HW-0519 y bornearas sensores

#### 4.4.5. Sensor análogo y digital

Es importante resaltar que los sensores análogos y digitales de los módulos de las materas y el de la fuente comparten un mismo formato de comunicación y rango de salida, esto permitió que pudieran ser configurados de la misma manera y se diseñara una único PCB lo que facilitó y disminuyó los costos de fabricación. Para el sensor análogo los pines de alimentación se conectaron al control de alimentación de 5 V y la salida al divisor de voltaje del ADC.

Para los sensores digitales con interfaz 1-wire se conectó su pin de datos al GPIO4 y una resistencia de *pull-up* de  $4.7K\Omega$ , para su alimentación se utilizaron los 3,3 V controlados por el microcontrolador. Dado que los sensores conectados a esta interfaz son los de humedad y temperatura ambiente, y estas variables abarcan grandes áreas de medición, en algunos casos se evaluó que no sería necesaria su instalación en todos los módulos, por tal razón se añadió una bornera habilitadora que permitió conectar la entrada GPIO4 a tierra con un jumper en caso de que no se instalar el sensor ni su resistencia de *pull-up*. En la Figura 37 se muestra el esquemático de las conexiones para el sensor digital y el análogo. Para cultivos de mayor envergadura se podrá instalar un sensor de ambiente para los módulos en los que se considere necesario.

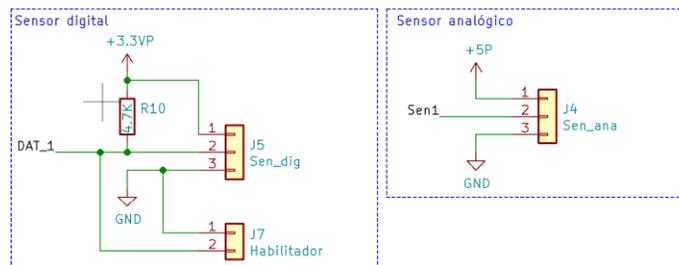


Figura 37 Conexión de los sensores digital y análogo

#### 4.4.6. Diseño de la fuente de alimentación

Partiendo de los diagramas y los sensores previamente escogidos, se identificó la corriente y consumo de energía, en la Tabla 11 se muestran los registrados en las hojas técnicas de los elementos y los medidos, con el fin de conocer la demanda energética y escoger la capacidad del panel y batería.

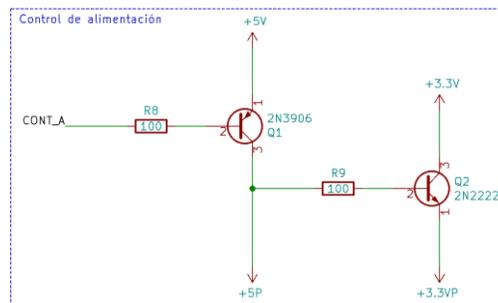
**Tabla 11** Tabla de Corrientes por dispositivo

| Dispositivo                       | Corriente hoja técnica | Corriente medida | Voltaje | Consumo |
|-----------------------------------|------------------------|------------------|---------|---------|
| ESP-12F                           | 80 mA                  | 60 mA            | 3.3 V   | 231 mW  |
| AM2302                            | 1,5 mA                 | 1.4 mA           | 3.3 V   | 4.62 mW |
| Sensor de humedad capacitivo v1.2 | 7 mA                   | 5 mA             | 5.0 V   | 35 mW   |
| MEL-10                            | 20 mA                  | 8 mA             | 5.0 V   | 40 mW   |
| pH Soil                           | 20 mA                  | 7 mA             | 5.0 V   | 35 mW   |
| TDS agua                          | 6 mA                   | 2 mA             | 5.0 V   | 10 mW   |
| Sonda DS18B20                     | 1,5 mA                 | 1.4 mA           | 3.3 V   | 4.62 mW |
| XY-017 RS485                      | 1 mA                   | 0.5 mA           | 3.3 V   | 1.65 mW |

Con los datos anteriormente registrados se pudo calcular el consumo para cada uno de los circuitos y la corriente total, comenzando con los controles de alimentación de los sensores en (21) y (22) avanzando hasta el módulo de carga y descarga, todo esto se realizó haciendo uso de los datos de máximos de corriente con el fin de evaluar el desempeño del circuito en condiciones extremas.

$$I_{Control\ 5.0\ V} = 20\ mA + 20\ mA + 7\ mA = 47\ mA \quad (21)$$

$$I_{Control\ 3.3\ V} = 1.5\ mA + 1\ mA = 2.5\ mA \quad (22)$$



**Figura 38** Circuito de control para alimentación de sensores

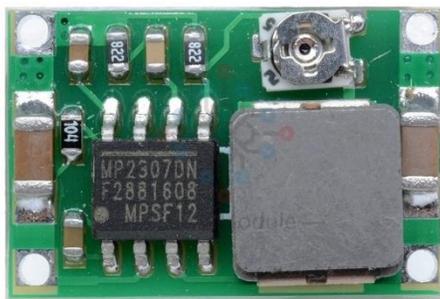
El circuito mostrado en la Figura 38 es el usado para controlar el encendido y apagado de los sensores y periféricos alimentados a 3.3 y 5 voltios, dado que ambos sistemas serán activados al tiempo los transistores fueron conectados en cascada, trabajándolos en corte y

saturación. Continuando se calculó el consumo de corriente que debió compensar el regulador de voltaje en (23).

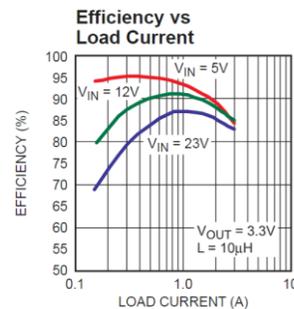
$$I_{Out\ 3.3V} = 80\ mA + 2.5\ mA = 82.5\ mA \quad (23)$$

La elección del regulador de voltaje se realizó teniendo en cuenta su eficiencia, dado que es de vital importancia optimizar la energía, segundo su disponibilidad en el mercado y costo, el módulo escogido fue el MP2307 el cual cuenta con una eficiencia superior al 95 % para un voltaje de entrada de 5 voltios y una salida de 3.3 Voltios. En la Figura 39 se muestra el módulo y la gráfica de eficiencia vs corriente para distintos voltajes de salida, observando que para las condiciones anteriormente dadas presente el mejor comportamiento.

Dado que la corriente de la carga fue de 82.5 mA la eficiencia no alcanzo el mayor valor, pero realizando pruebas con cargas fijas que consumieran la misma corriente se logró identificar que era del 83 %, ahora utilizando la ecuación (24) se calculó la corriente de entrada que requirió el módulo para alimentar la carga con una entrada de voltaje a 5 voltios despejándola en (25).



a. Módulo



b. Grafica de eficiencia

**Figura 39** Módulo convertidor de voltaje MP2307 y grafica de eficiencia

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{in} * I_{in}} \quad (24)$$

$$I_{in} = \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{in} * Eficiencia} = \frac{3.3\ V * 82\ mA}{5.0\ V * 0.83} = 65.205\ mA \quad (25)$$

El siguiente paso fue calcular la potencia que debía entregar el módulo de carga y descarga de baterías en (27), el módulo que se propuso usar es el AC02-YF3, basado en el integrado IP5306, tiene la capacidad de alimentar cargas que requieran una corriente máxima de 2 amperios y alcanzar una eficiencia superior al 93%, pero al igual que el anterior regulador esta eficiencia puede disminuir en cargas de baja demanda de corriente, la cual para este caso fue del 83%.

$$I_{out} = 65.205 \text{ mA} + 47 \text{ mA} = 112.205 \text{ mA} \quad (26)$$

$$I_{in} = \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{in} * Eficiencia} = \frac{5.0 \text{ V} * 112.205 \text{ mA}}{5.0 \text{ V} * 0.83} = 135.2 \text{ mA} \quad (27)$$

Otra cualidad del módulo de carga y descarga propuesto es la visualización del estado actual de la batería por medio de 4 leds, la corriente que deberá suministrar el panel solar para alimentar el circuito a máxima capacidad es 135,2 mA, por tal razón se decidió usar unos paneles solares de 5 V y 300 mA, los cuales son capaces de alimentarlo y cargar la batería si se requiere al mismo tiempo.

Como criterio para elegir la capacidad de la batería se propuso que esta fuera capaz de sustentar el circuito a máxima capacidad por 12 horas, sin que el panel solar se activara, la corriente que requirió suministrar la batería cuando el panel no está funcionando se calcula en (28) con una eficiencia de entrada vs la salida igual a 0,82, y la capacidad en (29), la cual fue dividida por 0,7 como factor de desgaste.

$$I_{batería} = \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{in} * Eficiencia} = \frac{5.0 \text{ V} * 112.205 \text{ mA}}{3.7 \text{ V} * 0.82} = 184.91 \text{ mA} \quad (28)$$

$$Capacidad = \frac{I_{Batería} * Tiempo}{0.7} = \frac{184.91 \text{ mA} * 12 \text{ Horas}}{0.7} = 3169,89 \text{ mAh} \quad (29)$$

Comercialmente se encuentran pilas con capacidad de 3500 mAh las cuales cumplen el criterio anteriormente propuesto, es importante resaltar que la máxima capacidad recomendada por el fabricante del módulo de carga es de 5000 mAh.

#### 4.4.7. Modo bajo consumo de energía

Ya que en principio no es necesario que los módulos instalados en las materas y fuente estén monitoreando constantemente, se propuso que entraran en un modo de bajo consumo el cual ayudara a aumentar la duración de las baterías y asegurara su integridad, en dicho modo se des energizaron los sensores y periféricos que no estén en uso y se activó el modo *Deep-sleep* del microcontrolador.

Al activar el *Deep-sleep* del microcontrolador este apago todos sus periféricos internos incluyendo su conexión Wifi, dejando únicamente encendido el RTC el cual es el encargado de volverlo a activar después de un tiempo preestablecido antes de su apagado. Según el fabricante el consumo del módulo ESP-12F es de 60  $\mu A$ , en el caso de los sensores, dado que el control de alimentación estará apagado no generan ningún consumo de corriente.

Uno de los principales inconvenientes que presentan los convertidores DC-DC es que siempre requerirán una corriente mínima para conmutar y por tal razón, aunque disminuya la corriente de salida continuarán consumiendo, para el caso del convertidor DC-DC es de 5 mA, y la eficiencia del módulo de carga y descarga para dicha corriente es de 25%.

$$I_{bateria} = \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{in} * Eficiencia} = \frac{5.0 V * 5 mA}{3.7 V * 0.25} = 27.03 mA \quad (30)$$

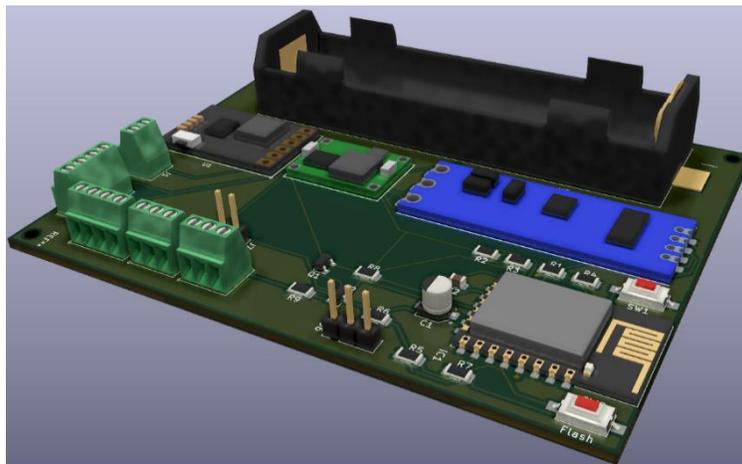
En (30) se calculó la corriente que debía suministrar la batería en bajo consumo y ahora suponiendo que en una hora se mantenga el 50% en bajo y el otro en alto consumo, se pudo calcular la duración de la batería en (31), sin embargo, se esperó que el porcentaje de actividad en una hora sea menor al 40%.

$$T = \frac{0.7 * Capacidad}{I_{Promedio}} = \frac{0.7 * 6800mAh}{(27.03mA * 0.5) + (184.91 mA * 0.5)} = 23.12 horas \quad (31)$$

#### 4.4.8. Diseño PCB módulos

Partiendo de los esquemáticos anteriormente expuestos se procedió a diseñar la placa electrónica verificando la disponibilidad de los componentes en el mercado y siguiendo la recomendación de cada fabricante, este procedimiento se realizó haciendo uso del software

libre Kicad, en el que se desarrollaron los esquemáticos y la distribución espacial de cada componente. Posterior se procedió con el enrutamiento de cada uno de las pistas teniendo presente las distancias mínimas recomendadas por la empresa donde se fabricó la PCB, en la placa se integran los 3 módulos principales, el porta pilas 18650, el microcontrolador ESP-12F y demás componentes superficiales, para la conexión del panel solar y los sensores se añadieron terminales de 2.54mm que aseguran la integridad y fiabilidad de la conexión, por último para la programación del microcontrolador se hizo uso de los dos pulsadores recomendados por el fabricante y una bornera de pines donde se conectó el conversor serial TTL a usb, en la Figura 40 se muestra el diseño en 3D de la PCB culminado con todos sus componentes montados.

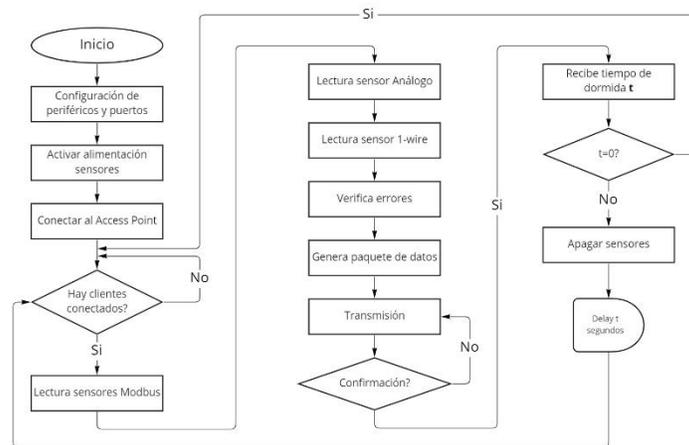


**Figura 40** Placa electrónica desarrollada en el software Kicad

La lista de componentes para esta placa se muestra en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

#### **4.4.9. Algoritmo del microcontrolador**

Con el hardware desarrollado y listo, se explica el diagrama de flujo de la Figura 41, que siguió cada módulo según su programación, en el caso de los ESP-12F estos fueron programados usando el entorno de Arduino y con un módulo conversor de usb a serial. El primer paso es la inicialización de los periféricos como: puertos seriales, salidas y entradas análogas y maestro Modbus, después se activa la alimentación de los sensores y se conecta al access point.

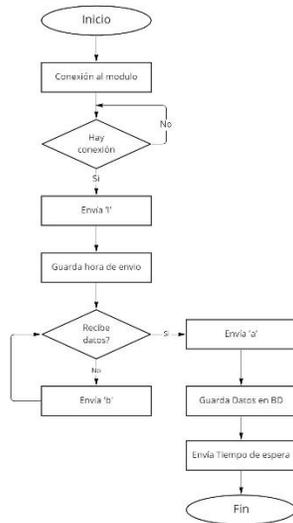


**Figura 41** Flujo del algoritmo implementado en los módulos de medición

Después de que el módulo se halla conectado a la red, este esperará la primera conexión del ordenador como cliente, donde se realizará la lectura de los sensores, en caso de que alguna de las medidas esté por fuera del rango normal será llevada a cero y un bit de error se generara. Posteriormente el módulo crea un paquete de datos con las medidas y los bits de error, el cual es enviado al ordenador para ser almacenado, como precaución se esperará un bit de confirmación, en caso de que el paquete no haya sido recibido, por último, se recibirá el tiempo en segundos en que apagara la alimentación de los periféricos hasta el siguiente ciclo.

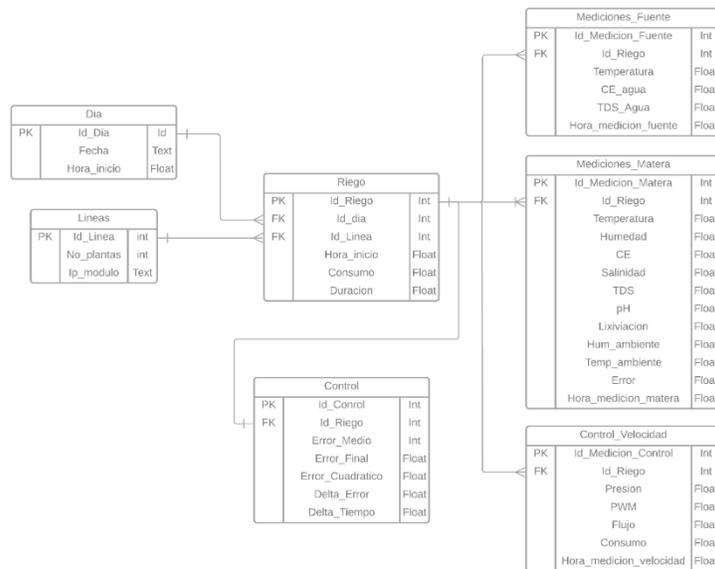
#### 4.4.10. Diseño de la base de datos y algoritmo de consulta

Con el fin de realizar un correcto almacenamiento de datos y lectura de la información de los sensores, se configuro el ordenador como un cliente el cual, por medio de un socket de comunicación, envió y recibió información de cada uno de los módulos en campo configurados como servidores, para dicho proceso se hizo uso de la librería socket del lenguaje Python. En la Figura 42 se muestra el diagrama de flujo para la lectura de los datos, donde primero se estable conexión con el módulo por el puerto 2020, posterior se envía un carácter 'l' el cual indicara a los módulos que deberán leer los sensores y generar un paquete de datos que será enviado al cliente, posteriormente se guarda la hora en la que se solicitó la lectura y espera su envío desde los módulos, al recibir los datos envía el carácter 'a' para confirmar la recepción y en caso de que tarde un tiempo enviara el carácter 'b', con el fin de que el módulo vuelva a enviar la información y esta sea recibida correctamente.



**Figura 42** Diagrama de flujo solicitud de medición y datos

Para el almacenamiento de las mediciones e información se procedió con el diseño de una base de datos formada por distintas entidades y relaciones que permitió una fácil consulta de información y más aún un almacenamiento confiable. La Figura 43 muestra el diagrama de entidad relacional de la base de datos previamente diseñada, donde se definieron 7 entidades: Día; Línea, Riego, Mediciones de fuente, mediciones de materias, control de velocidad y control.



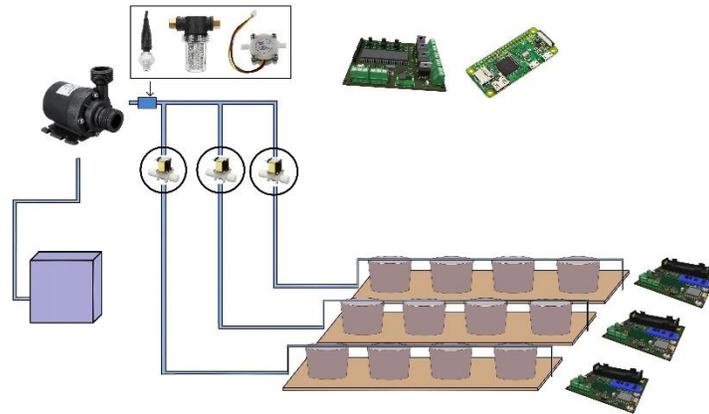
**Figura 43** Diagrama entidad relación de la base de datos local

El diseño anteriormente presentado buscó representar de mejor forma las relaciones entre las distintas entidades presentes en el sistema, y además poder ser lo más adaptable a cultivos de mayor envergadura, es importante resaltar que la entidad Riego hace referencia a las medidas o información recolectada dentro del intervalo de inicio de un riego hasta el inicio del siguiente, en el que se guardó el historial de cada planta, el comportamiento del control de velocidad y la medición de la fuente previo y posterior al riego, los riegos fueron adjudicados al día en el que estos iniciaron.

Algunas de las consultas que facilitó el anterior diseño fueron, riegos en un día, riegos por línea en un día, consumo de riegos, acción de control en una línea, mediciones de los módulos por riego, mediciones de fuente por riego, el análisis de esta información permitió tener una mejor comprensión del comportamiento del sistema y las plantas.

## 4.5. Implementación del sistema en el cultivo

En esta etapa se procedió a integrar los parámetros hidrodinámicos identificados en la etapa 2 con los sensores escogidos y validados en la etapa 1, instalando los módulos de medición diseñados en la etapa 4, con los cuales se pudo medir la respuesta del sistema de riego que se implementó en la etapa 3, todo con el fin de conocer la dinámica del sistema que permitió establecer dos leyes de control, las cuales tuvieron como referencia la información de los riegos y el estado del sustrato para tomar acción sobre la duración y tiempo de riego. La Figura 44 muestra un esquema general de los equipos que se instalaran en el cultivo y su organización.



**Figura 44** Esquema de distribución del Sistema automatizado

Dado el tamaño y extensión del cultivo la instalación de un sistema de inyección de fertilizante no es factible, ya que los métodos tradicionales requieren de una mayor tasa de flujo para funcionar, por tal razón y con el fin de conocer mejor la respuesta de la conductividad eléctrica y pH del suelo frente al riego, se decidió mezclar el fertilizante en la fuente de agua y fertilizar en cada riego. Con el objetivo de suplir las necesidades del cultivo, se programaron reuniones semanales con el agricultor para conocer el comportamiento de dichas variables y efectuar acciones sobre el fertilizante aplicado a la fuente.

Las leyes de control fueron implementadas en una Raspberry Pi Zero, la cual fue la encargada de funcionar como base de datos local para recibir la información de los tres

módulos en campo, el algoritmo de control y comunicación fue desarrollado en el lenguaje Python en el cual se incluyeron librerías que permitieron el manejo de la información, la secuencia de supervisión y la toma de decisiones, el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** explica la elección de la tarjeta y las librerías utilizadas.

#### 4.5.1. Instalación y configuración de la red de monitoreo

Debido a que los módulos de monitoreo debieron ser instalados a la intemperie se requirió de su empaquetamiento en cajas con protección IP64 plásticas de 10x10 cm y para los cables se utilizaron prensa cables IP67, la Figura 45 muestra uno de los módulos ensamblado en su totalidad. Los cuales fueron ubicados sobre tres soportes de madera enterrados en el piso cerca de las materas que debían censar, para el módulo de medición de la fuente este fue ubicado al lado del tanque de agua donde se mezclaron los fertilizantes y se ubicó la bomba de riego.



a. PCB y módulo ensamblados



b. Módulo instalado en campo

**Figura 45** Módulos de censado de materas ensamblados e instalados

Una vez fueron instalados los módulos de medición, se procedió con el montaje del punto de acceso y la configuración de la red WiFi, el equipo utilizado como *access point* fue TP-Link *The reliable choice* modelo TL-WA701ND, el cual fue configurado para generar una red llamada “Red Cultivo” a la cual se conectaron los módulos de medición, y ordenador. Para facilitar la conexión a los módulos se le asignaron a cada uno IPs guardadas y asociadas

con cada uno de ellos. En la Tabla 12 se muestran el nombre del módulo, dirección Mac, IP fija asignada y su ubicación en el cultivo.

**Tabla 12** IP fija asignada por módulo

| Módulo | Ubicación   | MAC               | IP fija      |
|--------|-------------|-------------------|--------------|
| 1      | Línea 1     | 48-3F-DA-5D-0F-4E | 192.168.0.97 |
| 2      | Línea 2     | 40-F5-20-07-35-48 | 192.168.0.95 |
| 3      | Línea 3     | 2C-3A-E8-42-97-C2 | 192.168.0.94 |
| 4      | Fuente Agua | 2C-3A-E8-42-95-B4 | 192.168.0.96 |

Dado que el *access point* no es un equipo diseñado para exteriores, se instaló dentro de la casa cercana al cultivo, donde podía suplir las necesidades del proyecto y además asegurar su integridad y funcionamiento, la distancia aproximada entre este y el módulo más alejado no superó la distancia de 7 metros, que es una distancia mínima para ser cubierta con una red Wifi. En la Figura 46 se muestra el dispositivo instalado, en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los resultados de la conectividad.



**Figura 46** Access Point instalado y configurado

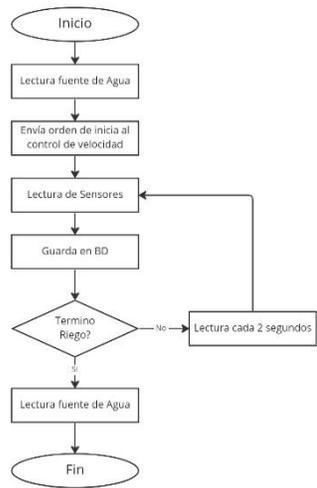
#### 4.5.2. Algoritmo de supervisión y riego

La rutina de supervisión que se ejecuta cada tres minutos por línea sigue el flujo mostrada en la Figura 47, inicialmente verifica que no exista un riego en ese instante, dado que la frecuencia de lectura durante la rutina de riego es mucho mayor, y podría afectar las comunicaciones, por lo que durante un riego las otras líneas esperan a que finalice, posterior se ejecuta la petición y recepción del módulo de medición, y con esta información se toma la decisión si se debe iniciar el riego, pasando a la rutina de riego.



**Figura 47** Diagrama de flujo de supervisión por línea de riego

Para la rutina de riego se sigue el flujo mostrado en la Figura 48, se inicia con la lectura de la fuente de agua, posteriormente se envía al control de velocidad el número de ciclos y se habilita la salida correspondiente a la línea que se regara, después el sistema lee los datos del sustrato con una frecuencia de 2 segundos durante el tiempo de riego más 3 minutos que sirven para conocer con mayor precisión la respuesta de la humedad al riego, finalmente se guardan los datos y se lee por segunda vez el estado de la fuente de agua, terminando la rutina de riego y retomando la rutina de supervisión.



**Figura 48** Diagrama de flujo para riego

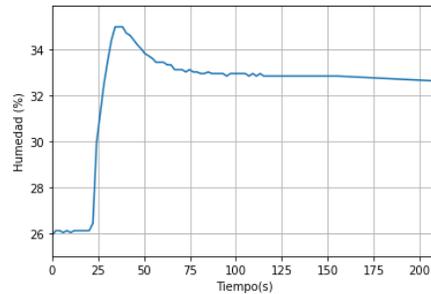
### **4.5.3. Definición de los controladores**

Se identificaron tres características previas al planteamiento de las leyes de control que debieron ser analizadas con el fin de obtener una respuesta adecuada: la primera fue la acción de control que se realiza, normalmente en los modelos de control las acciones varían la magnitud de la variable de entrada, dependiendo de cómo se quiera agregar energía al sistema, para este caso no es posible variar el flujo con el que se agrega agua a la planta, la acción que se realiza no actuó sobre la magnitud, sino sobre el tiempo en la que se aplica.

La segunda característica es el elevado retardo en la respuesta a la acción de control, la cual según la Etapa 2 puede variar entre 30 a 60 segundos, este elevado retardo no permite que la acción pueda ser corregida a tiempo, la tercera y última característica es que a diferencia de otros casos en este modelo de control no existe ninguna acción que permita disminuir o extraer humedad de la planta, haciendo que cualquier exceso sobre la acción de control puede saturar el sustrato y se deba esperar un tiempo considerable para volver a regar y corregirlo.

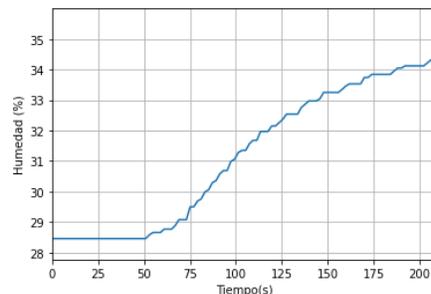
Por esto se buscó que la respuesta de humedad a 15 cm de profundidad siguiera una curva pre establecida a partir de distintos riegos en el cultivo, la cual asegura estas características: 1) no elevará el nivel de humedad demasiado con el fin de no generar lixiviación; 2) mantendrá la humedad en un rango adecuado en la zona de agua fácilmente disponible para la planta; 3) permitirá que los riegos se realicen en un rango de 2 a 5 horas; 4) puede ser modelado con una función de transferencia y un retardo.

Inicialmente se identificó la curva de respuesta que mejor cumpliera las características anteriormente explicadas, para tal razón se efectuaron distintos riegos variando la duración y las condiciones ambientales, un total de 42, es importante resaltar que estos se realizaron en las dos líneas donde se implementaron los controladores, para la primera línea se mantuvo un riego programado de 150 segundos de duración cada 12 horas, tal como lo había manejado el agricultor según su criterio. En la Figura 49 se muestra un riego con una duración de 30 segundos, una humedad inicial de 26%, realizado en horas de la mañana.



**Figura 49** Riego con sobre picó de humedad

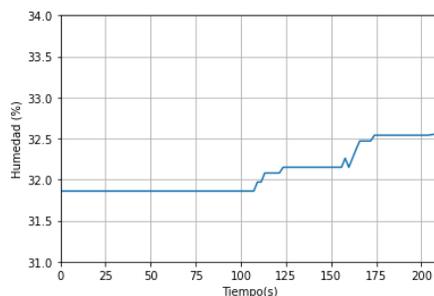
La anterior respuesta al pulso mostró un retardo de aproximadamente 20 segundos y después alcanzó un pico en 35%, para finalmente caer y estabilizarse en aproximadamente 33% de humedad volumétrica, según lo observado en la sección 2, esto indica que el agua inicialmente se acumuló a la profundidad del sensor, pero posteriormente continuó descendiendo a las capas más profundas del sustrato, por otra parte se alcanzó un aumento de aproximadamente 7% de humedad, aunque se mantiene en la zona deseada, este delta podría hacer que el siguiente riego tarde demasiado tiempo en iniciar. Por lo cual se considera que una respuesta de este tipo tubo un tiempo de riego elevado. En la Figura 50 se muestra un riego con una duración de 40 segundos, una humedad inicial de 28,5%, realizado en horas de la tarde.



**Figura 50** Riego con elevado retardo y delta alto

La anterior respuesta al pulso mostró un retardo de aproximadamente 50 segundos y después una subida sin estabilizarse o sobre-pico, esto puede indicar que el riego fue tan extenso que la ventana de 3 minutos y medio no fue suficiente para visualizar la totalidad de la respuesta de humedad, este es un caso no deseado, porque puede ser peligrosa al acercarse a la zona de saturación, por otra parte se alcanzó un aumento de aproximadamente 6% de humedad, aunque se mantiene en la zona deseada, este delta podría hacer que el siguiente

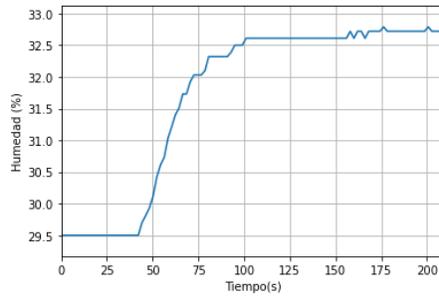
riego tarde demasiado tiempo en iniciar y la tendencia del final puede indicar que la humedad continua subiendo. En la Figura 51 se muestra un riego con una duración de 20 segundos, una humedad inicial de 31,8%, realizado en horas de la tarde.



**Figura 51** Riego con elevado retardo y delta alto

La anterior respuesta al pulso mostró un retardo de aproximadamente 110 segundos y después una subida lenta la cual se estabilizó aproximadamente en 32,5% de humedad, esta respuesta indica que el pulso de riego fue demasiado corto y gran parte del agua quedo ubicada en las capas superiores, donde se ubican las raíces primarias de la planta, las cuales sirven como soporte y forma un pequeño bulbo en el que se concentran. Aunque en este punto existen raíces, su función no es la de absorber y mantener la humedad en esta zona no es efectivo para la nutrición de la planta, adicionalmente al estar más cerca de la superficie son más propensas a la evapotranspiración, aunque un tiempo después puede que la humedad aumente, este no sería significativo y se tendría que realizar un riego en un periodo corto de tiempo. En la Figura 52 se muestra un riego con una duración de 25 segundos, una humedad inicial de 29,5%, realizado en horas de la tarde.

La siguiente respuesta al pulso mostró un retardo de aproximadamente 45 segundos y después una subida media la cual se estabilizó aproximadamente en 31,7% de humedad, esta es la respuesta que se buscó obtener en el sustrato, donde se observó una estabilización rápida, sin sobre-picos y que en la ventana de los 3 minutos y medio se alcance a observar su estabilización de humedad en un valor, el cambio de humedad fue de aproximadamente de 3,2%, con este valor se logró un amento adecuado con el cual los tiempos entre riego no sean ni altos ni bajos. El único inconveniente con este riego es quizás su retardo a la respuesta el cual en comparación con otros riegos tiende a ser mayor

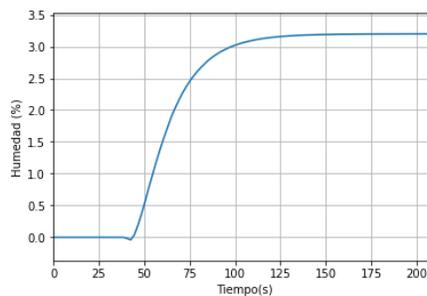


**Figura 52** Riego con respuesta ideal y retardo grande

Con la información anteriormente recolectada se decidió modelar la respuesta ideal en dos partes, primero un retardo de 40 segundos en el que se mantiene la humedad inicial, y segundo una respuesta al pulso de una función de transferencia aproximada a los datos tomados en la Figura 52, (32) muestra la función de transferencia hallada mediante la herramienta de *System Identification* del software Matlab. La cual dio un ajuste del 93,64% con los datos de aproximación.

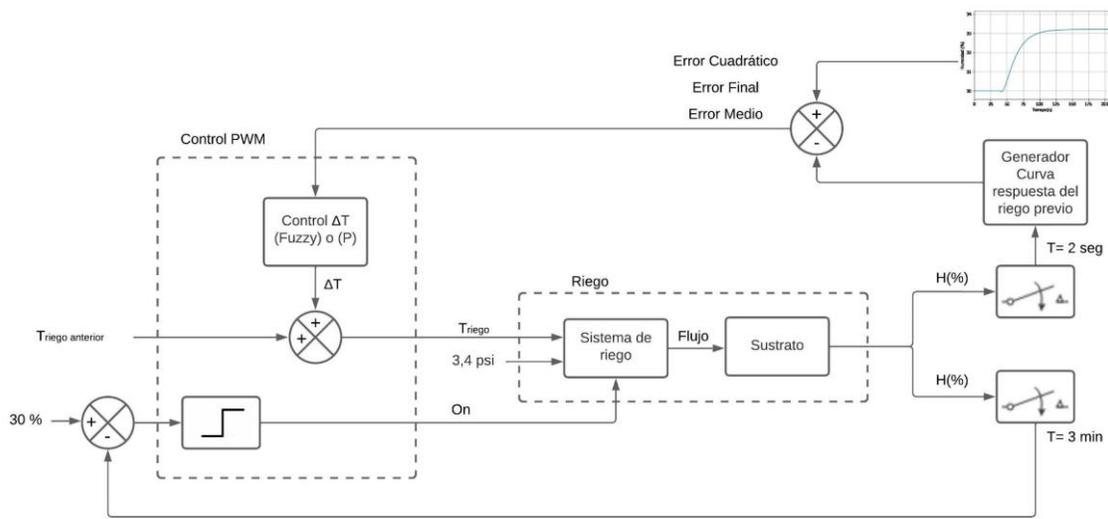
$$H(s) = \frac{-0,4588s + 0,2144}{s^2 + 0,2118s + 0,008917} \quad (32)$$

La Figura 53 muestra la respuesta ideal planteada como objetivo de los controladores, la cual fue trazada en el lenguaje Python con la librería Control, con esta se buscó cumplir los objetivos planteados en la presente sección.



**Figura 53** Respuesta ideal de la humedad

Teniendo la respuesta ideal, se plantió que cada riego inicie cuando la humedad haya bajado a un valor preestablecido, funcionando como un control de histéresis, pero con la diferencia que cada riego ajustó el tiempo dependiendo de los errores anteriores. La Figura 54 muestra la arquitectura del controlador donde se mide la respuesta de humedad.



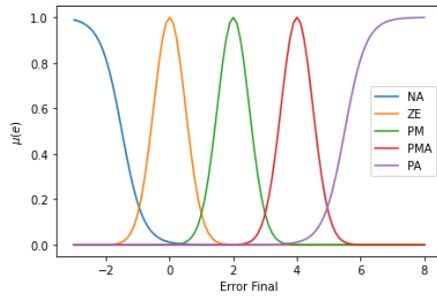
**Figura 54** Arquitectura del controlador de humedad

#### 4.5.3.1. Controlador de lógica difusa

El primer controlador que se propuso fue el de lógica difusa, el cual permitió incorporar distintas variables y por ende generar un control más íntegro, como se mencionó anteriormente la acción de control se efectuara sobre el tiempo de riego, por lo cual una acción negativa busca reducir el tiempo, mientras que una acción positiva aumentarlo, las variables que se integraron fueron: el error final de humedad entre la curva de referencia y la real, el error medio entre las dos curvas y el delta de dicho error medio.

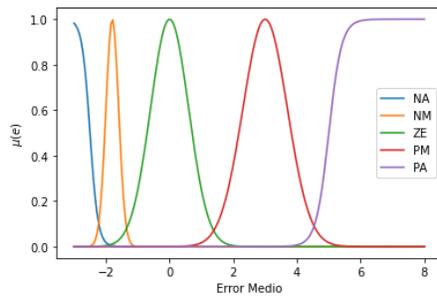
A continuación, se muestra las funciones de membrecía propuesta para cada una de las variables de entrada, con su respectiva gráfica, estas fueron planteadas con la información recolectada en los 42 riegos, donde se hallaron los errores anteriormente escogidos y se propuso un ajuste basado en la información y conocimientos adquiridos en el desarrollo.

La primera variable es el error final de humedad entre la curva de referencia y la real, esta nos permitió conocer la distancia entre el valor estabilizado y el deseado, es importante resaltar que para esta variable el valor que se puede obtener negativo está limitado para el caso en que el riego no genere ninguna respuesta en el intervalo planteado, mientras que para un valor positivo no lo está. La Figura 55 muestra las funciones de membrecía propuestas para el controlador, es de resaltar que para el error positivo se definieron tres rangos, mientras que para el negativo únicamente una, esto debido a lo anteriormente explicado.



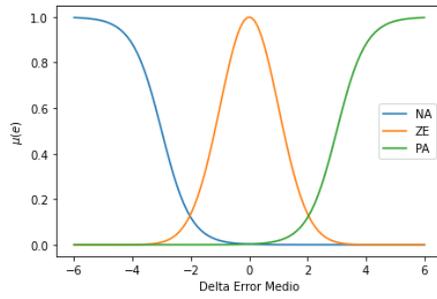
**Figura 55** Funciones de membresía para el Error Final

La segunda variable es el error medio, el cual al igual que el anterior está limitado por la parte negativa, por un riego sin respuesta mientras que para la positiva no, se asignaron dos funciones de membresía para los valores negativos y positivos y una para los valores cercanos al cero. La Figura 56 muestra la gráfica para el universo de discurso de la variable. Se resalta que las funciones de memberships asignadas a los valores negativos tienden a ser más delgadas con el fin de poder tener un ajuste fijo cuando el error tienda a ser menor.



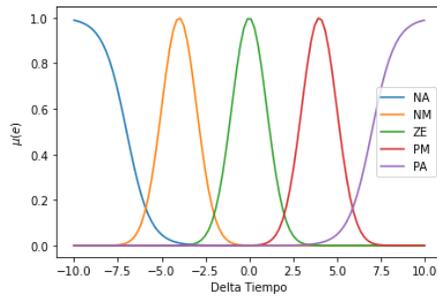
**Figura 56** Funciones de membresía para el Error Medio

La tercera variable fue el delta de error medio, esta es simétrica a lo largo de su universo de discurso y es principalmente utilizada para conocer el efecto del controlador sobre la planta, y si se requiere de una acción más agresiva para ser más efectivo o el caso contrario. La Figura 57 muestra la gráfica del universo de discurso de la variable



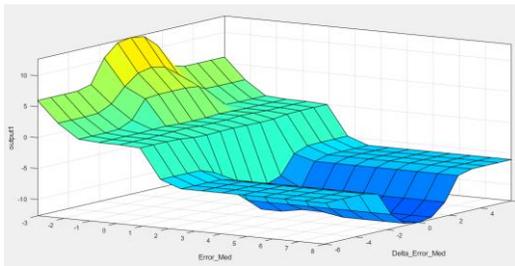
**Figura 57** Funciones de membresía para el Delta del Error Medio

Por último, el universo de discurso utilizado para la variable de salida fue comprendido entre -10 y +10 segundos, con 5 funciones de membresías, divididas simétricamente sobre el cero. La Figura 58 muestra la gráfica para el universo de discurso de la variable de Salida.

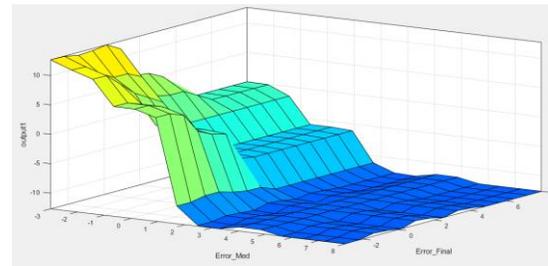


**Figura 58** Funciones de membresía para la Salida en delta de tiempo

Para terminar, la Figura 59 muestra las superficies de control para las tres variables y su comportamiento vs la salida. Este controlador fue implementado en la Raspberry con la ayuda de la librería *Skfuzzy*.



**a.** Error medio vs Delta de error



**b.** Error medio vs Error final

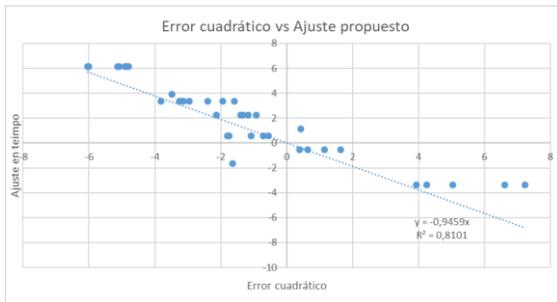
**Figura 59** Superficies de control

### 4.5.3.2. Controlador proporcional al error cuadrático

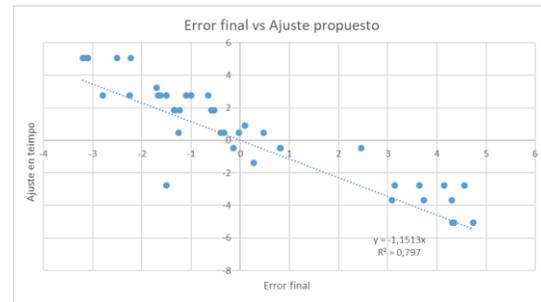
Para el control proporcional se propuso una dinámica parecida a la expuesta en el anterior, pero con la diferencia que en este se utilizó el error cuadrático medio el cual permitió tener una acción de control más agresiva, al igual que el anterior la salida de control fue el delta de tiempo que sumo o resto al tiempo del anterior riego. La ley de control se basó en (33), donde se incluye el signo del Error medio por una constante proporcional por el error cuadrático, más una segunda contante por el error final.

$$\Delta T = sig(e_{medio}) * K_1 e_{Cuadratico} + K_2 e_{Final} \quad (33)$$

Para determinar los valores óptimos de las constantes de la ley de control anteriormente establecida se hizo uso de la información recolectada de los 42 riegos, con la cual se les asignó una corrección teórica y se graficó la relación de cada uno de los errores vs el delta de tiempo propuesto, donde las constantes fueron iguales a la pendiente de la regresión lineal de cada una. En la Figura 60a se muestra la regresión correspondiente a los valores de error cuadrático donde  $K_1 = 1,1$  y en la Figura 60b la regresión correspondiente a los valores de error final donde  $K_2 = 0,79$ .



a. Regresión lineal error cuadrático



b. Regresión lineal error final

**Figura 60** Regresiones lineales para las constantes proporcionales

En el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el resultado de las simulaciones para ambos controladores y su análisis.

## 5. Resultados y análisis

### 5.1. Resultados del modelamiento de la humedad en un riego

A partir de un riego de 240 segunda de duración se obtuvo una planta característica en (34) con un coeficiente de correlación de 95,78%, la cual con el objetivo de imitar la respuesta fue utilizada y limitada de tal forma que al alcanzar su máximo se mantuviera en el mismo.

$$H(s) = \frac{0,0001s + 0,00002}{s^4 + 0.057s^3 + 0.0007s^2 + 0,00003s} \quad (34)$$

Esta respuesta, aunque no es igual a la deseada, permita a la simulación recibir un valor de tiempo y retorna la respuesta de los primeros 210 segundos, la Figura 61 muestra el resultado de la planta para un tiempo de riego de 35 segundos.

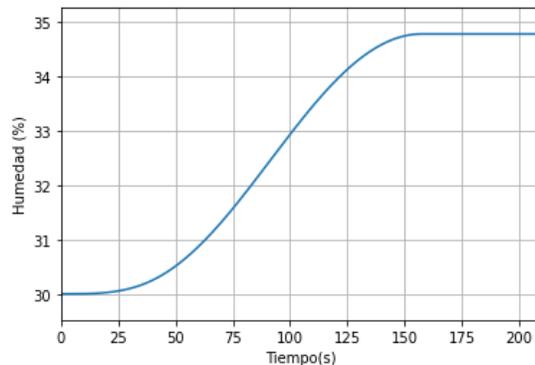
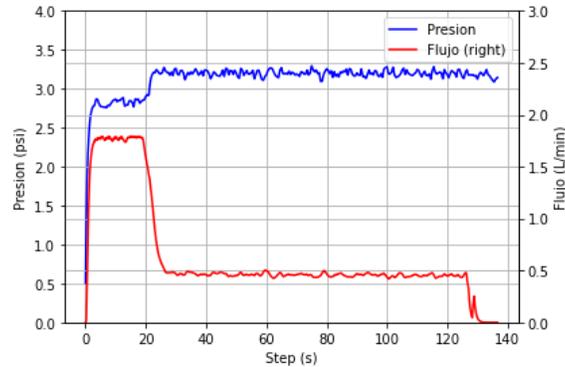


Figura 61 Planta simulada a un riego de 35 segundo

### 5.2. Resultados implementación del control PI

Una vez diseñado y simulado el controlador se procedió a su implementación en el circuito de control de velocidad y ejecución de sus respectivas pruebas, el primer inconveniente que se evidenció fue el tiempo de llenado de las mangueras de riego, ya que como se mencionó anteriormente, aunque los goteros sean auto compensados estos no son antidrenates, tal característica hacía que posterior al riego continuaran goteando y por ende vaciaran la manguera. En la Figura 62 se muestra la respuesta de presión y flujo cuando la manguera se encontraba casi vacía, donde se observa un pico en los primeros 20 segundos

de riego, el cual después disminuyó y se estabilizó en un valor constante, aunque el agua sí fluyó por los goteros aproximadamente a los 5 segundos de iniciado.



**Figura 62** Presión y flujo en el riego con goteros hacia abajo

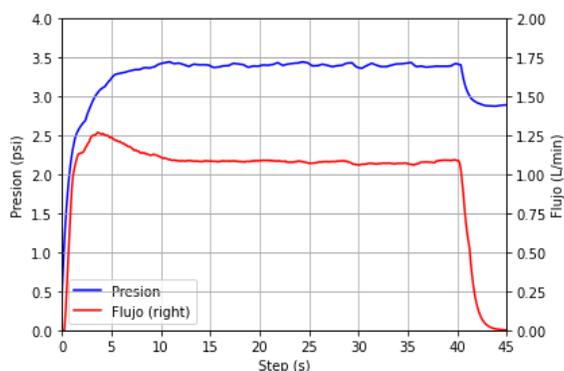
Según lo mencionado, el sistema no sería preciso al momento de regar una determinada cantidad de tiempo y dependiendo del estado de la manguera podría ser variable, dado lo anterior se decidió cambiar la posición de los goteros, los cuales en un principio se encontraban con su orificio dirigido hacia abajo, por una posición en la que se encontrarán dirigidos hacia arriba, haciendo que solo se regara cuando existiera presión en la manguera y se redujera el efecto drenante posterior al riego. Este es un método usado en algunos sistemas de riego por goteo, es importante resaltar que este cambio llevó a un ajuste en todas las líneas ya que fue necesario que las materas y goteros quedaran nivelados, en la Figura 63 se muestra la nueva posición posterior al ajuste planteado.



**Figura 63** Goteros corregidos

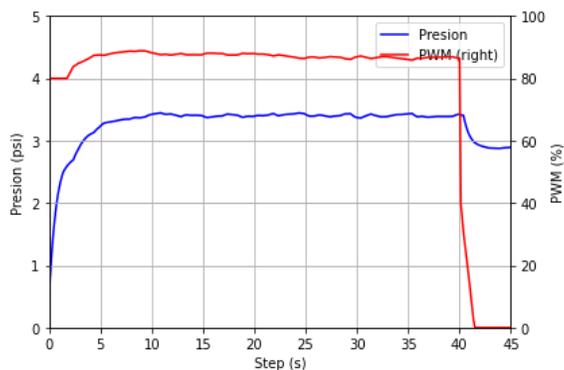
Con la nueva posición de los goteros en todo el cultivo se procedió a realizar una segunda prueba de riego, en la cual se midió: la presión, el flujo, el tiempo que tardaba en iniciar a

fluir el agua por los goteros y si existía alguna fuga posterior al riego. La Figura 64 muestra la presión y flujo con el ajuste, se evidencio que el pico por la presurización del sistema fue mucho menor, tardando 8 segundos en estabilizarse, también el tiempo que tardo en fluir el agua por los goteros no fue superior a 1 segundo en la línea más alejada, y este se compensa con el tiempo que tardo en detenerse el riego después de finalizar, siendo ambos muy similares.



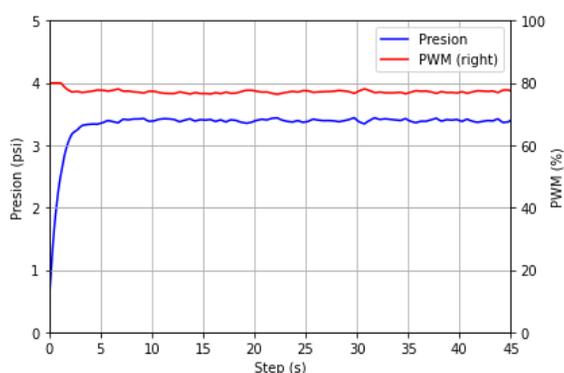
**Figura 64** Presión y flujo en el riego con goteros hacia arriba

La elección de la presión ideal a la salida de la bomba para asegurar el correcto funcionamiento de los goteros se llevó a cabo en campo, donde se midió presión, flujo total y con ayuda de un cronómetro y una probeta se verificó el flujo en los goteros, con este ejercicio se identificó que la presión en la que los goteros alcanzaban mayor uniformidad fue de 3,4 psi. En la Figura 65 se muestra la repuesta del riego en la línea de mayor distancia y tamaño la cual conto con un total de 8 plantas.



**Figura 65** PWM aplicado y presión de salida línea 3

En la anterior imagen se evidencia cómo el tiempo de llenado de las tuberías fue de aproximadamente 2 a 3 segundos, en este lapso se aplicó un valor constante de PWM a la bomba y una vez alcanzada la presión mínima de trabajo el controlador entro a funcionar. Para esta línea se observa que se requiero aumentar el PWM a 87% para mantener constante la presión y por ende asegurar el flujo en los goteros. En la Figura 66 se muestra la repuesta del riego en la línea de menor distancia y tamaño la cual conto con un total de 5 plantas.



**Figura 66** PWM aplicado y presión de salida línea 1

En el caso de la línea 1 se evidencia que el tiempo de llenado fue de 2 segundos y una vez se alcanzada la presión mínima de trabajo, el controlador mantuvo una PWM cercana al 78%. Con lo anterior se pudo asegurar un correcto riego garantizando los tiempos y flujos para todas las plantas en el cultivo.

Con el fin de evaluar la uniformidad y exactitud en la medición de consumo por planta, se realizó un riego de 40 segundos por línea en el que se recogió el agua de tres goteros, los extremos y el central, en el cual se verifico la medida de consumo evaluada por el sistema versus la real, en la Tabla 13 se muestran los resultados medidos por el sistema para cada una de las líneas.

**Tabla 13** Resultados de consumo por línea de riego

| Línea | # Plantas | Duración | Flujo medio (L/min) | Consumo total (mL) | Consumo por planta (mL) |
|-------|-----------|----------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| 1     | 5         | 40 s     | 1,5                 | 523                | 104,6                   |
| 2     | 7         | 40 s     | 2,1                 | 719                | 102,7                   |
| 3     | 8         | 40 s     | 2,4                 | 811                | 101,4                   |

Para la medida real se utilizó un envase medidor de 250 ml en el que se recogió la muestra de cada uno de los goteros durante los tres riegos, el resultado para todos los goteros fue de

100 ml tal como se muestra en la Figura 67, con esto se verificó que el sistema de riego por goteo aseguró uniformidad a lo largo del cultivo mediante el control de la presión a la salida de la bomba y únicamente se entregó agua en los intervalos en los que se encendía la bomba.



**Figura 67** Muestra de agua de un gotero

### **5.3. Resultados implementación panel solar**

Dado que este proyecto es un primer prototipo y con el fin de no arriesgar el funcionamiento de los controladores, se decidió que solo uno de los módulos fuera alimentado con un panel solar individual, debido principalmente a costos y que en el lugar del cultivo previamente ya se contaba con un panel grande de 12 voltios instalado, dicho panel aunque sobre dimensionado ya tenía una instalación previa y baterías que podían alimentar los módulos adicionales, disminuyendo costos y asegurando la integridad de las mediciones, sin embargo con el fin de evaluar el diseño de la alimentación y batería se instaló en la línea 1 un arreglo de paneles solares que pudieran alimentar el circuito y cargar la batería previamente escogida.

En un inicio se evaluó el uso de un único panel solar de 5 voltios a 300 mA, pero dado que este solo fue capaz de mantener la carga de la batería y la alimentación del circuito en horas del mediodía durante un día soleado, se construyó un arreglo de paneles solares, el cual fuera capaz de mantener cargada la batería y alimentar el circuito de 6 de la mañana a las 6 de la tarde sin depender demasiado de la intensidad de luz. Para esto fue necesario formar un arreglo de 4 paneles solares que cumplieron el anterior objetivo.

Para la instalación de los paneles se tuvieron en cuenta las dos características recomendadas por distintos autores y profesionales del área: inclinación y orientación, dado que Colombia se ubica en el hemisferio norte muy cerca de la línea ecuatorial, se recomienda que los paneles sean instalados en dirección al sur con el objetivo de aprovechar al máximo la radiación a lo largo del día, para la inclinación se utilizó la información recolectada por Acero et al. (2019), la cual afirma que el ángulo más eficiente en todos los meses varía entre 10° a 20°. La Figura 68 muestra el arreglo de paneles montados sobre un soporte con una inclinación de 15° en dirección sur.



**Figura 68** Arreglo de paneles solares instalado en el cultivo

Para la evaluación del sistema fotovoltaico se midió el voltaje de la batería desde las 6:00 am a 8:00 pm con una periodicidad de dos horas, con el fin de conocer el estado de la batería al iniciar y al finalizar el día, también se tomó el estado de los indicadores leds incluidos en el módulo de carga y descarga, aunque estos dan una idea de la carga se consideró conveniente tomar las mediciones de voltaje, las cuales permitieron tener una mejor perspectiva del sistema de alimentación. En la Tabla 14 se muestran los resultados de las mediciones realizadas a la batería del módulo 1.

**Tabla 14** Resultado estado carga de batería

| Hora       | Voltage | Led |
|------------|---------|-----|
| 6:00 a.m.  | 3,55 V  | 1   |
| 8:00 a.m.  | 3,61 V  | 2   |
| 10:00 a.m. | 3,82 V  | 3   |
| 12:00 p.m. | 4,19 V  | 4   |
| 2:00 p.m.  | 4,21 V  | 4   |

|           |        |   |
|-----------|--------|---|
| 4:00 p.m. | 4,19 V | 4 |
| 6:00 p.m. | 4,12 V | 4 |
| 8:00 p.m. | 4,07 V | 4 |

Se evidenció que el sistema es capaz de suplir la demanda energética durante toda una noche y dar sustento al circuito a lo largo del día, alcanzando el estado de carga completa después del mediodía y con un mínimo de carga a las 6 de la mañana hora en la que el panel solar inicia su funcionamiento.

#### 5.4. Resultados de los controladores

Para la evaluación de los controladores se verificó que se mantuviera la humedad a 15 cm en el rango de agua fácilmente disponible evitando respuestas donde se evidenciara una lixiviación o movimiento de agua a capas inferiores. Por otra parte, aunque se midió la humedad en la zona de lixiviación, estos datos no se incluyeron en el análisis dado que para todas las materas la medición fue superior al 50% y no existió variación significativa posterior al riego debido a su saturación.

##### 5.4.1. Controlador de lógica difusa

Este controlador fue implementado en la segunda línea de riego con 7 plantas y en la que el módulo de medición fue instalado en la matera central, A continuación, se presentan una secuencia de riegos en los que se explican detalles como su duración, respuesta, tiempo al siguiente riego, consumo, hora de riego, variables ambientales y un análisis de la respuesta del controlador.

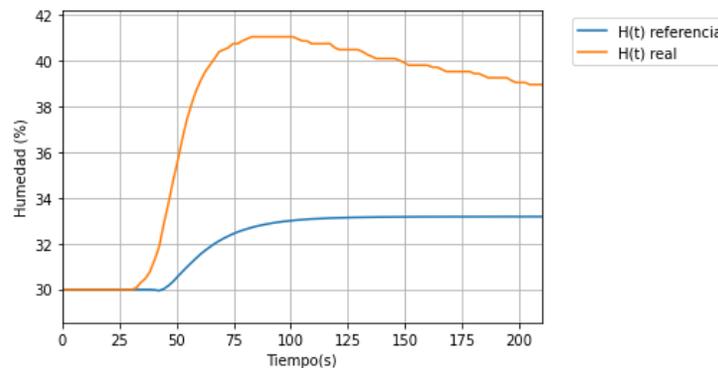
Los detalles del primer riego se presentan en la Tabla 15 donde se observa que fue realizado en horas de la tarde.

**Tabla 15** Especificaciones primer riego control difuso

| Especificación           | Valor   |
|--------------------------|---------|
| Duración                 | 34 s    |
| Humedad Inicial          | 29,9%   |
| Temperatura del sustrato | 21,8%   |
| Temperatura ambiente     | 17,3 °C |
| Humedad ambiente         | 80,4%   |
| Tiempo siguiente riego   | 109 min |
| Error medio              | 5,48 %  |

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Error final        | 5,78 %     |
| Consumo por planta | 80 ml      |
| Hora               | 4:33 p. m. |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos se muestra en la Figura 69, donde se observa un sobre pico y un elevado error medio, lo cual indica un tiempo de riego elevado que generó: primero, la saturación del sustrato superando el límite de capacidad de aireación; segundo, se evidencia como el agua baja a las capas más profundas del sustrato, tan solo 100 segundos después de iniciado el riego.



**Figura 69** Respuesta humedad primer riego control difuso

El tiempo que tardó la humedad en descender a 30% fue de 109 minutos, momento en el cual se inició el siguiente riego, un valor considerablemente pequeño con respecto a la elevada humedad que alcanzó después del riego, principalmente debido a la baja retención del sustrato. La acción del control fue disminuir el tiempo de riego en 8,1 segundos.

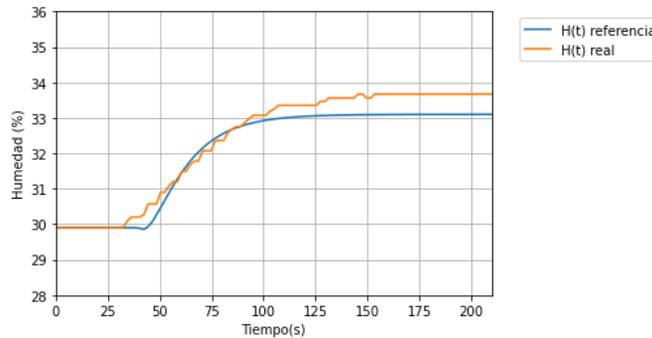
Los detalles del segundo riego se presentan en la Tabla 16 donde se observa que fue realizado en horas de la tarde.

**Tabla 16** Especificaciones segundo riego control difuso

| Especificación           | Valor   |
|--------------------------|---------|
| Duración                 | 26,0 s  |
| Humedad Inicial          | 29,9%   |
| Temperatura del sustrato | 21,7 °C |
| Temperatura ambiente     | 12,6 °C |
| Humedad ambiente         | 93,0%   |
| Tiempo siguiente riego   | 130 min |
| Error medio              | 0,28    |
| Error final              | 0,57    |

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Consumo por planta | 60 ml      |
| Hora               | 6:25 p. m. |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos se muestra en la Figura 70, en esta se observa cómo el retardo fue de 30s, principalmente debido a la humedad ambiente, la cual mantuvo más húmedas las capas superiores y aumento la conductividad hidráulica del sustrato, por otra parte, también se evidenció una respuesta muy similar en forma a la deseada. Sin embargo, esta alcanzó una humedad final de 33,4%, aunque es superior a la esperada se mantiene en el rango deseado y presenta un comportamiento estable, lo que indica que no hubo lixiviación significativa.



**Figura 70** Respuesta humedad segundo riego control difuso

Con respecto al siguiente riego, la humedad tardó 130 minutos en descender a menos de 30 %, un valor que comparado con el anterior riego fue superior y con un menor gasto de agua, aun así, sigue siendo bajo comparado con lo esperado. La acción del control fue disminuir el tiempo de riego en 0,2 segundos para el siguiente riego.

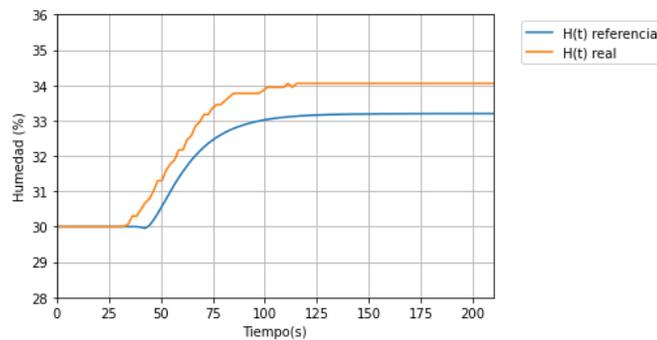
Los detalles del tercer riego se presentan en la Tabla 17 donde se observa que fue realizado en horas de la madrugada.

**Tabla 17** Especificaciones tercer riego control difuso

| Especificación           | Valor   |
|--------------------------|---------|
| Duración                 | 25,8 s  |
| Humedad Inicial          | 29,9%   |
| Temperatura del sustrato | 20,3 °C |
| Temperatura ambiente     | 11,5 °C |
| Humedad ambiente         | 99,0%   |
| Tiempo siguiente riego   | 129 min |
| Error medio              | 0,69    |

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Error final        | 0,85       |
| Consumo por planta | 58 ml      |
| Hora               | 8:40 p. m. |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos se muestra en la Figura 71, al igual que el segundo riego, este presentó un retardo de aproximadamente 30 segundos, sin embargo, el movimiento del agua por el perfil fue más rápido lo que se evidencio en la subida de humedad, debido principalmente a la humedad del ambiente al momento del riego aun así, la forma de la curva muestra una entrega adecuada de agua donde no se observa lixiviación significativa.



**Figura 71** Respuesta humedad tercer riego control difuso

Con respecto al siguiente riego, la humedad tardó 129 minutos en descender a menos de 30 %, el mismo valor que el anterior riego. La acción del control fue disminuir el tiempo de riego en 1,1 segundos para el siguiente riego.

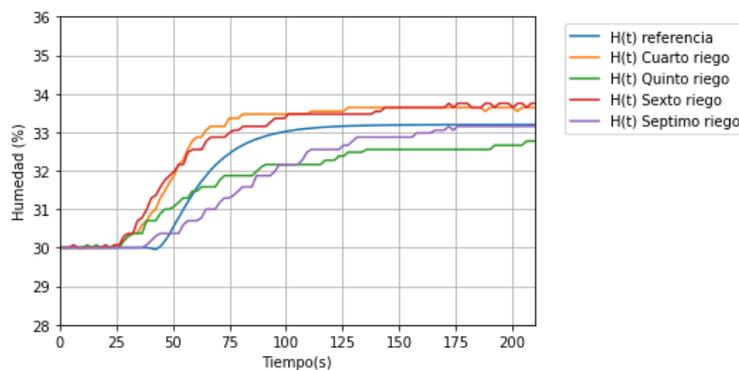
En los siguientes cuatro riegos se hizo un análisis conjunto con el fin de evaluar la respuesta del controlador en varios ciclos de riego a distintas horas y condiciones ambientales, la Tabla 18 muestra las especificaciones en cada una de las iteraciones.

**Tabla 18** Especificaciones conjunto de riegos control difuso

| Especificación           | Cuarto  | Quinto  | Sexto    | Séptimo |
|--------------------------|---------|---------|----------|---------|
| Duración                 | 23,6 s  | 23,4 s  | 23,8 s   | 27,4 s  |
| Humedad Inicial          | 29,9%   | 29,9%   | 29,9%    | 29,9%   |
| Temperatura del sustrato | 16,9 °C | 15,4 °C | 13,7 °C  | 15,9 °C |
| Temperatura ambiente     | 11,2 °C | 9,4 °C  | 14,0 °C  | 22,4 °C |
| Humedad ambiente         | 99,7%   | 99,7%   | 96,9%    | 55,4%   |
| Tiempo siguiente riego   | 178 min | 209 min | 1411 min | 200 min |
| Error medio              | 0,52    | -0,39   | 0,49     | 0,13    |
| Error final              | 0,44    | -0,43   | 0,55     | 0,16    |

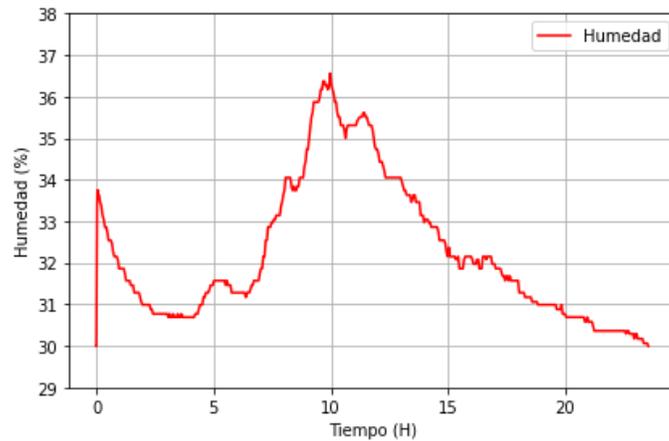
|                    |            |            |            |             |
|--------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Consumo por planta | 52 ml      | 51 ml      | 53 ml      | 82 ml       |
| Hora               | 1:25 a. m. | 4:23 a. m. | 7:52 a. m. | 12:30 p. m. |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos para los cuatro riegos se muestra en la Figura 72, donde se observa cómo las curvas presentan retardos muy similares cercanos a 25 segundos para las horas de la mañana donde las condiciones ambientales; baja temperatura y elevada humedad relativa, hacen que las capas superiores del sustrato se mantengan más húmedas y por ende la conductividad hidráulica del mismo sea mayor, obteniendo menores retardos en la respuesta de humedad, sin embargo el controlador logró mantener una forma de respuesta muy similar a la de referencia, con un rango de humedad dentro de la zona deseada. El séptimo riego fue realizado en horas del mediodía y presentó el menor error, se puede observar su gran similitud al modelo planteado ya que los dos se realizaron en horas muy cercanas y con condiciones de ambiente similares.



**Figura 72** Respuesta humedad secuencia de riegos control difuso

Sobre el tiempo entre los riegos se observa cómo aumento a medida que transcurría la noche, evidenciando claramente la baja evapotranspiración que se tiene a estas horas. Con respecto al sexto riego, se tuvo una duración de aproximadamente 23 horas, debido a que ese día en el lugar llovió durante la mayor parte del tiempo y ocasionó que la humedad en la materia inicialmente se mantuviera y después aumentara en dos picos, produciendo que el controlador no considerara necesario el riego, es importante resaltar que, aunque existiera lluvia y causara el aumento de humedad, el rango se mantuvo entre la zona saludable para la planta. En la Figura 73 se muestra cómo la humedad varió durante las 23 horas, y se observa el primer pico que corresponde al riego y dos adicionales que fueron ocasionados por la lluvia.



**Figura 73** Respuesta de la humedad frente a un día de lluvia

#### 5.4.2. Controlador proporcional al error cuadrático

Este controlador fue implementado en la tercera línea de riego con 8 plantas y en la que el módulo de medición fue instalado en la matera central. A continuación, se presentan una secuencia de riegos en los que se explican detalles como: su duración, respuesta, tiempo al siguiente riego, consumo, hora de riego, variables ambientales y un análisis de la respuesta del controlador.

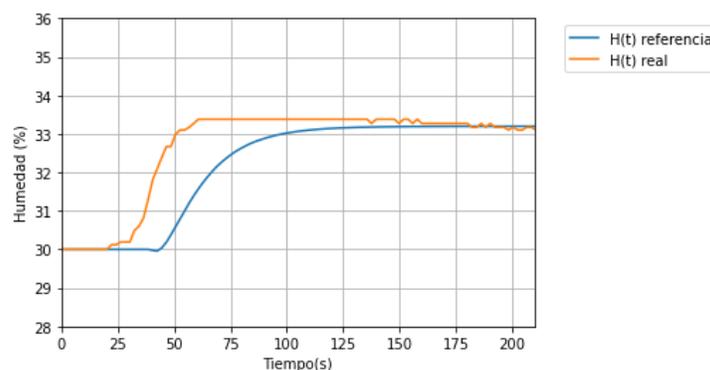
Los detalles del primer riego se presentan en la Tabla 19 donde se observa que fue realizado en horas de la tarde.

**Tabla 19** Especificaciones primer riego control proporcional

| Especificación           | Valor      |
|--------------------------|------------|
| Duración                 | 35,9 s     |
| Humedad Inicial          | 29,9%      |
| Temperatura del sustrato | 16,1 °C    |
| Temperatura ambiente     | 27,0 °C    |
| Humedad ambiente         | 51,1%      |
| Tiempo siguiente riego   | 524 min    |
| Error cuadrático         | 0,68       |
| Error final              | -0,02      |
| Consumo por planta       | 83 ml      |
| Hora                     | 1:54 p. m. |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos se muestra en la Figura 74, donde se observa un retardo de 20 segundos y un tiempo de subida de aproximadamente 25 segundos. Aunque el error final es muy pequeño y tiende a cero, el error cuadrático permite

identificar que aún existe un exceso en riego el cual ocasiona que en la parte final de la respuesta se evidencia una mínima lixiviación a capas inferiores, sin embargo, no fue significativo.



**Figura 74** Respuesta humedad primer riego control proporcional

El tiempo que tardó en descender la humedad a menos de 30% fue de 524 minutos, un valor elevado para lo planteado, lo cual indicó una mayor humedad y por ende saturación en las capas inferiores del sustrato. La acción del control fue disminuir el tiempo de riego en 0,6 segundos.

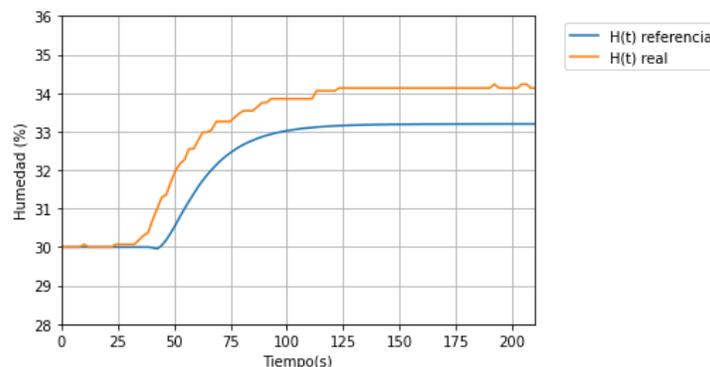
Los detalles del segundo riego se presentan en la Tabla 20 donde se observa que fue realizado en horas de la noche.

**Tabla 20** Especificaciones segundo riego control proporcional

| <b>Especificación</b>    | <b>Valor</b> |
|--------------------------|--------------|
| Duración                 | 35,2 s       |
| Humedad Inicial          | 29,9%        |
| Temperatura del sustrato | 17,76 °C     |
| Temperatura ambiente     | 10,6 °C      |
| Humedad ambiente         | 99,0%        |
| Tiempo siguiente riego   | 627 min      |
| Error cuadrático         | 0,76         |
| Error final              | 0,93         |
| Consumo por planta       | 75 ml        |
| Hora                     | 10:38 p. m.  |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos se muestra en la Figura 75, en este se observa como la forma es más parecida a la deseada y no evidencia lixiviación a las capas inferiores. Al evaluar el error en el cambio de humedad se obtiene un valor cercano

al 33%, aunque elevado alcanza la forma deseada en la curva y no es significativo con respecto al error en estado estacionario cercano al 1%, el cual fue causado debido a la diferencia significativa entre la humedad y temperatura ambiente con respecto al anterior riego.



**Figura 75** Respuesta humedad segundo riego control proporcional

Con respecto al siguiente riego, la humedad tardó 627 minutos en descender a menos de 30%, este tiempo aumentó dado que durante las horas de la noche la evapotranspiración es inferior a la del día. La acción del control fue disminuir el tiempo de riego en 1,8 segundos.

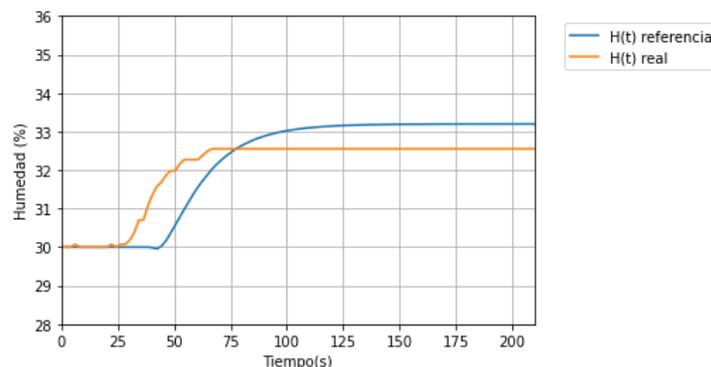
Los detalles del segundo riego se presentan en la Tabla 21 donde se observa que este fue realizado en horas de la mañana.

**Tabla 21** Especificaciones tercer riego control proporcional

| <b>Especificación</b>    | <b>Valor</b> |
|--------------------------|--------------|
| Duración                 | 33,5 s       |
| Humedad Inicial          | 29,9%        |
| Temperatura del sustrato | 13,223 °C    |
| Temperatura ambiente     | 19,8 °C      |
| Humedad ambiente         | 72,8%        |
| Tiempo siguiente riego   | 392 min      |
| Error cuadrático         | 0,44         |
| Error final              | -0,65        |
| Consumo por planta       | 70 ml        |
| Hora                     | 9:06 a. m.   |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos se muestra en la Figura 76, en la cual se observa una disminución en el retardo, llegando a ser de 25 segundos. Aunque a esas horas existía luz de sol en el área, se logró identificar que el muro de la casa aldeaña

al cultivo generaba sombra, la cual hacía que la luz del sol llegara a horas más tardías con respecto a las otras líneas y por ende sus capas superficiales se mantuvieran húmedas, haciendo que la conductividad hidráulica no disminuyera, afectando directamente el tiempo de retardo.



**Figura 76** Respuesta humedad tercer riego control proporcional

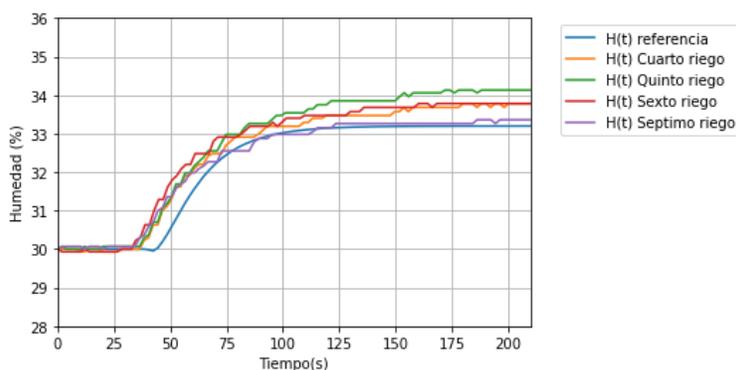
Con respecto al siguiente riego, la humedad tardó 392 minutos en descender a menos de 30 %, este tiempo disminuyó dado que durante las horas del día la evapotranspiración es mayor y el valor final de humedad fue menor al esperado. La acción del control fue aumentar el tiempo de riego en 1,2 segundos.

Para los siguientes cuatro riegos se hizo un análisis conjunto con el fin de evaluar la respuesta del controlador en varios ciclos de riego, la Tabla 22 muestra las especificaciones en cada una de las iteraciones.

**Tabla 22** Especificaciones secuencia de riegos riego control proporcional

| Especificación           | Cuarto     | Quinto     | Sexto      | Séptimo     |
|--------------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Duración                 | 34,7 s     | 33,8 s     | 32,3 s     | 31,4 s      |
| Humedad Inicial          | 29,9%      | 29,9%      | 29,9%      | 29,9%       |
| Temperatura del sustrato | 19,7 °C    | 10,3 °C    | 14,6 °C    | 15,9 °C     |
| Temperatura ambiente     | 18,5 °C    | 18,9 °C    | 10,0 °C    | 22,4 °C     |
| Humedad ambiente         | 78,2%      | 99,9%      | 99,9%      | 55,4%       |
| Tiempo siguiente riego   | 339 min    | 464 min    | 446 min    | 230 min     |
| Error cuadrático         | 0,15       | 0,41       | 0,28       | 0,07        |
| Error final              | 0,58       | 0,86       | 0,44       | 0,16        |
| Consumo por planta       | 79 ml      | 71 ml      | 70 ml      | 65 ml       |
| Hora                     | 3:39 p. m. | 9:18 p. m. | 5:03 a. m. | 12:30 p. m. |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos para los cuatro riegos se muestra en la Figura 77, donde se observa cómo las curvas presentan retardos muy similares cercanos a 32 segundos, aun así, se evidencia que la curva que presenta menor retardo fue la del sexto riego, dado que fue realizado en horas de la madrugada con las condiciones ambientales con menor evapotranspiración. Por otra parte, también se evidencia que la respuesta con mayor retardo fue la del séptimo riego, concordando con lo esperado dadas las condiciones ambientales de dicho momento.



**Figura 77** Respuesta humedad secuencia de riegos control proporcional

Se observa que el tiempo entre riegos realizados en horas de la noche o madrugada fueron mayores dada la baja evapotranspiración, mientras que el realizado en horas de la tarde tuvo un menor tiempo en el descenso de la humedad. Al igual que el anterior controlador el riego que menor error obtuvo fue aquel en la que las condiciones ambientales y hora eran las más parecidas a las del modelo, demostrando el impacto del ambiente sobre la respuesta al riego.

### 5.4.3. Respuesta del riego tradicional

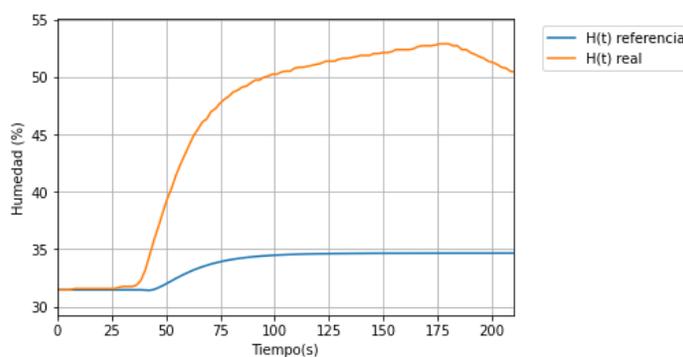
El riego tradicional fue implementado en la primera línea de riego con 5 plantas y con el módulo de medición instalado en la matera central, para este riego se mantuvieron los criterios establecidos por el agricultor, el cual incluía dos riegos diarios de 150 segundos cada doce horas, a las 7 de la mañana y 7 de la noche. Para este caso se midieron las mismas variables, pero se aplicó el riego sin importar el estado inicial de la planta, a continuación, se presenta un riego del cual se explican detalles como: su duración, respuesta, tiempo al siguiente riego, consumo, hora de riego, variables ambientales y su análisis.

Los detalles del riego se presentan en la Tabla 23 donde se observa que fue realizado en horas de la mañana.

**Tabla 23** Especificaciones riego tradicional

| Especificación           | Valor      |
|--------------------------|------------|
| Duración                 | 150 s      |
| Humedad Inicial          | 31,5%      |
| Temperatura del sustrato | 12,1 °C    |
| Temperatura ambiente     | 9,8 °C     |
| Humedad ambiente         | 90,8%      |
| Tiempo siguiente riego   | 12 horas   |
| Consumo por planta       | 240 ml     |
| Hora                     | 7:00 a. m. |

La respuesta de humedad durante los primeros tres minutos se muestra en la Figura 78, se observa claramente como esta sube rápidamente a un valor cercano a la saturación y posteriormente comienza a disminuir. Según lo visto en las pruebas del sustrato sin planta se evidencia una clara lixiviación ocasionada por la baja retención del sustrato, la cual aumenta a medida que el valor de la humedad lo hace.



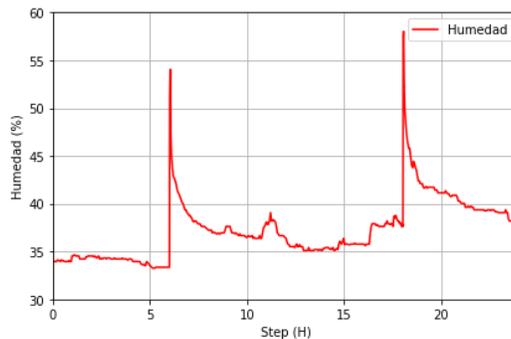
**Figura 78** Respuestas riego tradicional

No se tuvo en cuenta el valor de la humedad en la que se encontraba el sustrato para definir la frecuencia de riego en este caso, haciendo que a medida que pasaron los riegos, se mantuviera sobre la zona de agua fácilmente disponible, muy cerca del estado de saturación, y aunque en este punto la planta también tuvo disponibilidad de agua, la cantidad de oxígeno en las raíces se vio limitado, posiblemente afectando el desarrollo de la planta y por ende la del fruto.

## 5.5. Resultados consumo de agua y disponibilidad de nutrientes

Con el objetivo de evaluar el sistema y comportamiento en cada una de las líneas de riego, se verifico la disponibilidad de agua mediante la humedad, la disponibilidad de nutrientes mediante la conductividad eléctrica y el consumo por planta. Buscado que la humedad se mantuvieran en el rango de agua fácilmente disponible, la conductividad eléctrica del sustrato no superara  $1 \text{ dS/m}$  y comparando los consumos por planta entre líneas por día durante 5 días, resaltando que la conductividad eléctrica del agua se mantuvo en  $0,5 \text{ dS/m}$ .

La Figura 79 muestra la humedad durante 24 horas en la línea 1, donde se realizaron 2 riegos cada 12 horas con una duración de 150 segundos. Se evidencia como la humedad subió rápidamente a la zona de saturación y posterior al riego, comenzó a disminuir, logrando estabilizarse cerca del límite superior de la zona de agua fácilmente disponible. Sin embargo, se observó que la humedad no había bajado lo suficiente y ya se iniciaba un segundo riego.

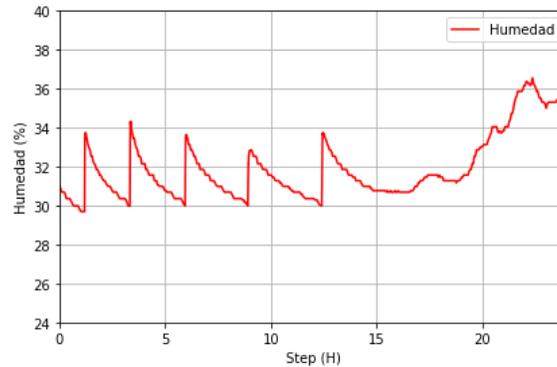


**Figura 79** Respuesta de la humedad en 24 Horas línea 1

La respuesta de humedad en la línea 1 muestra un evidente exceso de riego, en el cual la mayor parte de agua se mueve a las capas más profundas del sustrato, saturándolo a medida que pasó el tiempo y reduciendo la capacidad de aireación del mismo, comprometiendo la integridad de la planta y desperdiciando agua.

La Figura 80 muestra la humedad durante 24 horas en la línea 2, donde se implementó el controlador de lógica difusa. En este se evidencia como el rango de humedad se mantuvo en la zona deseada, con riegos de corta duración cada 2 horas. También se observó como la tasa de cambio con la que disminuye la humedad es mucho menor que la de la línea 1, lo cual

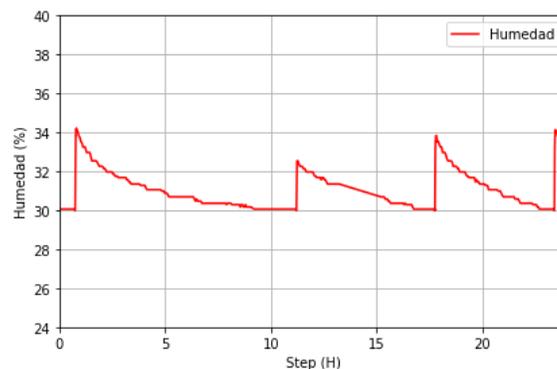
indica que la mayor parte del agua fue absorbida por la planta o eliminada por efecto de la evapotranspiración.



**Figura 80** Respuesta de la humedad en 24 Horas línea 2

En las ultimas horas de la anterior figura se observa un cambio en la humedad, el cual fue causado por la presencia de lluvia durante dicho intervalo.

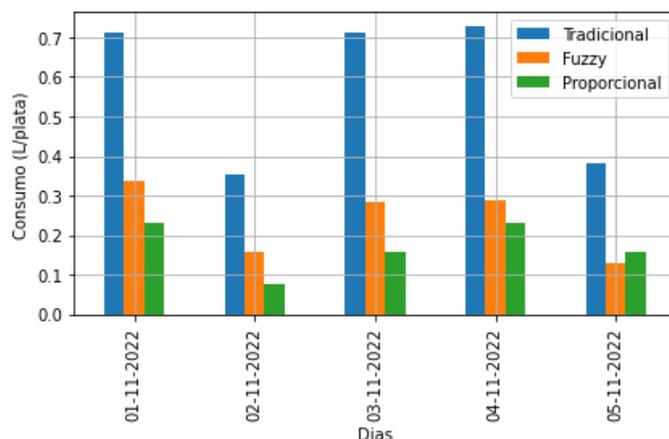
La Figura 81 muestra la humedad durante 24 horas en la línea 3, donde se implementó el controlador proporcional al error cuadrático. En este se evidencia cómo el rango de humedad se mantuvo en la zona deseada, con riegos de corta duración entre cada 5 a 8 horas, también se observó como la tasa de cambio con la que disminuye la humedad es menor comparada a la de las otras dos líneas, lo cual indica que la mayor parte del agua entregada es absorbida por la planta.



**Figura 81** Respuesta de la humedad en 24 Horas línea 3

En la Figura 82 se muestra el consumo por planta medido en cada una de las líneas. Donde el 2 de noviembre se presentaron lluvias durante toda la tarde, razón por la cual el agricultor

solicitó que no se realizara riego en la noche. Mientras que los datos del 5 noviembre solo se tomaron hasta el mediodía.



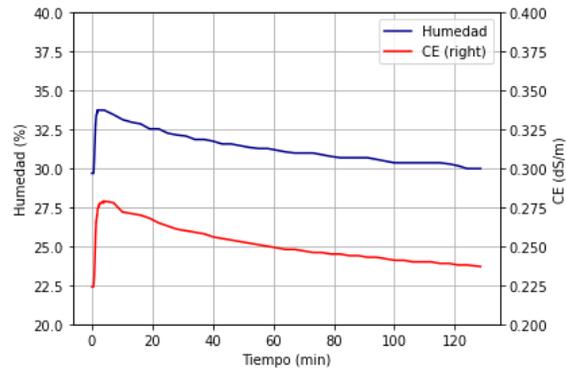
**Figura 82** Consumo por planta en las tres líneas de riego

Se observa que el método que tiene mayor consumo es el riego tradicional, en el cual se alcanza un consumo diario por planta de 710 ml en promedio cuando se realizaron los dos riegos y de 360 ml con solo uno, mientras que la segunda línea obtuvo un riego promedio en los días soleados de 290 ml por planta y en el día con lluvia 155 ml. Para finalizar la línea que presentó menor consumo fue la tercera, dado que en las anteriores pruebas presentó la mayor retención y por ende la menor demanda de riego, obteniendo un promedio de 207 ml en días soleados y con lluvia 76 ml.

### 5.5.1. Conductividad eléctrica control difuso

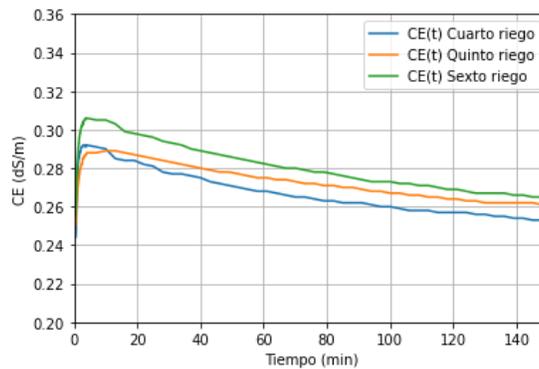
A continuación, se muestra el cambio en la conductividad eléctrica para algunos de los riegos mostrados en la sección 5.4.1, con el fin de evaluar la disponibilidad de nutrientes en la zona radicular.

La Figura 83 muestra la variación de conductividad eléctrica y humedad a 15 cm de profundidad durante un intervalo completo de riego, se evidencia que la conductividad eléctrica del sustrato fue impactada por el riego y a medida que la humedad disminuyó esta también lo hizo. Sin embargo, se resalta que el valor alcanzado en el sustrato no es igual al de la fuente de agua y tiende a estabilizarse en la mitad del mismo.



**Figura 83** Respuesta de humedad y CE control difuso

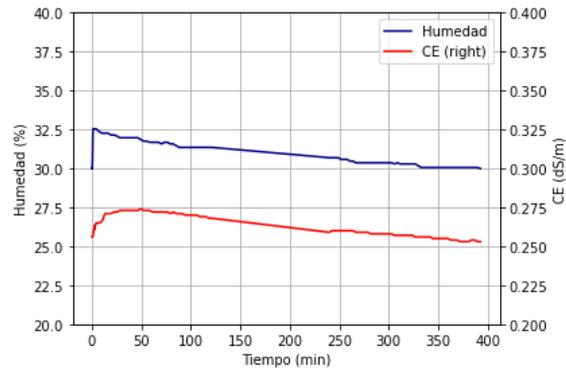
La Figura 84 muestra la respuesta de conductividad eléctrica para tres riegos de la Tabla 18, donde se observa un comportamiento muy similar, en el que las sales disueltas en el sustrato aumentan después del riego y disminuyen con el tiempo, evitando la saturación, la cual podría generar problemas en la nutrición de las plantas, aunque se evidencia un leve aumento entre riegos este puede ser controlado con la solución aplicada a la fuente.



**Figura 84** Respuesta CE secuencia de riegos control difuso

### 5.5.2. Conductividad eléctrica controlador proporcional al error cuadrático

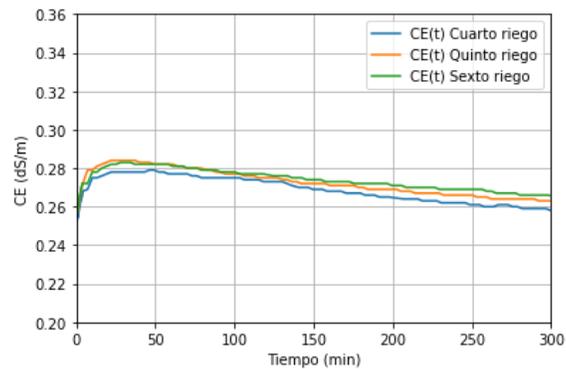
A continuación, se muestra el cambio en la conductividad eléctrica para algunos de los riegos mostrados en la sección 5.4.2, con el fin de evaluar la disponibilidad de nutrientes en la zona radicular.



**Figura 85** Respuesta de humedad y CE control proporcional

La Figura 85 muestra la variación de conductividad eléctrica y humedad a 15 cm de profundidad durante un intervalo completo de riego, al igual que la anterior sección se evidencia la acción del riego con la diferencia que la variación no es tan fuerte como la anterior, teniendo un menor impacto tanto en aumento como en el decremento y estabilizándose en un valor un menor.

La Figura 86 muestra la respuesta de conductividad eléctrica para tres riegos de la Tabla 22, donde se observa un comportamiento muy similar en el cual las sales disueltas en el sustrato aumentan después del riego y disminuyen con el tiempo, evitando la saturación, la cual podría generar problemas en la nutrición de las plantas. Se resalta que a diferencia del controlador difuso las respuestas son más homogéneas y alcanzan un pico más pequeño posterior al riego.

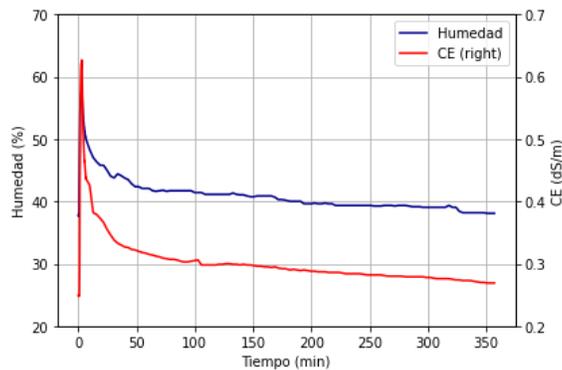


**Figura 86** Respuesta CE secuencia de riegos control proporcional

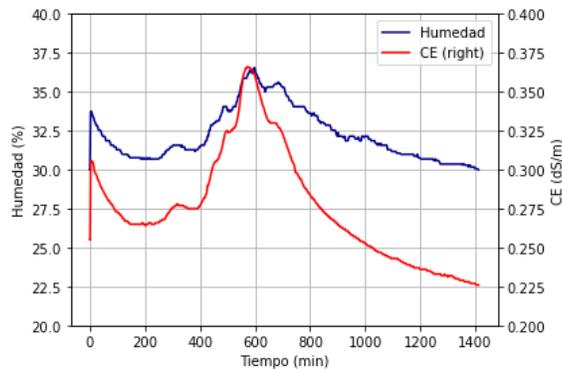
### 5.5.3. Conductividad eléctrica riego tradicional

A continuación, se muestra el cambio en la conductividad eléctrica para uno de los riegos mostrados en la sección 5.4.3, con el fin de evaluar la disponibilidad de nutrientes en la zona radicular.

La Figura 87 muestra la variación de conductividad eléctrica y humedad a 15 cm de profundidad durante un intervalo completo de riego, al igual que las anteriores secciones se evidencia la acción del riego, pero para este caso se observó un pico más pronunciado posterior al riego, el cual superó el valor en el agua de riego y se aproximó al valor umbral, que puede ser perjudicial para la planta.



**Figura 87** Respuesta de humedad y CE riego tradicional



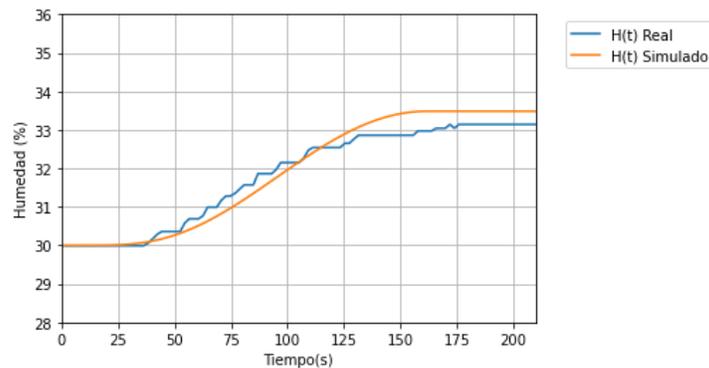
**Figura 88** Respuesta de humedad y CE por lluvia

Para finalizar el análisis de disponibilidad de nutrientes, se estudió la respuesta de humedad y conductividad eléctrica durante el intervalo de lluvia en la línea 2, la cual se muestra en la Figura 88, evidenciando como se aportaron sales al sustrato a medida que

aumentaba la humedad, pero con la principal diferencia que posterior a la lluvia la caída de sales fue considerablemente mayor que la posterior al riego, la cual se pudo identificar como un lavado de sales donde una parte de estas fue arrastrada a la zona profunda del sustrato.

#### 5.5.4. Comparación de resultados simulados y datos reales

Comparando los resultados obtenidos en las simulaciones del Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** contra los resultados obtenidos en la implementación del cultivo, se observa como una secuencia de 6 riegos en ambos controladores obtiene errores inferiores al 1%, sin evidenciar lixiviación en ninguno de los casos. La Figura 89 muestra la respuesta de la planta propuesta para un riego de 25,3 segundos y la respuesta del séptimo riego del controlador difuso, donde ambas curvas presenta retardos similares y no se evidencia una diferencia significativa entre lo simulado y verificado en campo, cumpliendo los objetivos planteados en la sección de los controles de humedad.



**Figura 89** Respuesta del riego real y simulado

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1. Conclusiones**

Mediante la aplicación de los conceptos y caracterización de las curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica, se identificó el comportamiento del agua en el sustrato y cómo se podía asegurar su disponibilidad para las raíces en una zona segura, donde el equilibrio entre sólido, líquido y gaseoso permitiera a la planta obtener los recursos necesarios para su desarrollo.

Se logró determinar que una de las principales características del sustrato, dada su composición, fue la baja retención de humedad, la cual se vio reflejada en la curva de conductividad hidráulica, donde valores superiores al 40% de humedad volumétrica, presentaban lixiviación a zonas más profundas y por ende tendía a la saturación, frente a riegos prolongados y poco continuos. Sin embargo, la baja retención del sustrato también evidenció el bajo esfuerzo de la planta para acceder al agua en intervalos de humedad inferiores al 37% y superiores al 15%, donde tendría un suministro constante de agua y aire.

Una vez identificados los rangos de humedad que aseguraran la disponibilidad de agua, se decidió trabajar en la zona de agua fácilmente disponible, debido al estado inicial del sustrato al realizar la instalación del sistema, el cual contenía un elevado valor de humedad causado principalmente por el riego tradicional que se había ejecutado durante los primeros meses y segundo a las precipitaciones de la zona en los meses de octubre y noviembre. Aun así, no se buscó trabajar en el rango completo, al contrario, se planteó que la humedad se moviera en un rango central al mismo, pero más pequeño, disminuyendo mínimo a 30% y llegando en cada riego a un máximo de 32,8%.

El diseño de los módulos inalámbricos y la implementación de la red Wifi, facilitó el monitoreo de las variables en el sustrato, haciendo que su instalación y ajuste fueran cómodos para el agricultor y no intervinieran en sus actividades diarias, adicionalmente el uso de energía foto voltaica permitió la independencia de los módulos a la red eléctrica, la cual presentó varios cortes de luz a lo largo del trabajo debido a tormentas y distintos

inconvenientes en su instalación, circunstancias que son factores comunes en zonas rurales donde se ubican los cultivos y el acceso a la energía eléctrica es complicado.

La implementación del control de velocidad permitió la incorporación de un control PI que aseguró una presión constante a la salida de la bomba, con la cual se garantizó un caudal uniforme para las 20 plantas, en el que se incluyó un sensor de flujo que sirvió como medidor de consumo y con el que se verificó la constancia del mismo en los distintos ciclos, el riego por goteo y el uso de goteros auto compensados permitió al sistema ser más preciso en la entrega del agua, optimizando y garantizando los tiempos.

El uso de la computadora de placa reducida Raspberry pi Zero, permitió al sistema administrar el flujo de datos y los momentos de medición de forma coordinada, en la que se evitó la pérdida de información y se incluyó una base de datos local, la cual facilitó la gestión en las distintas etapas del proyecto. Por otra parte, el uso del lenguaje Python permitió realizar un único algoritmo que gestionaba las distintas etapas del riego y monitoreo incluyendo el uso de librerías especializadas.

Se planteó una ley de control donde se definió una curva de respuesta de humedad ante el riego, minimizando la lixiviación y generando un delta que permitió asegurar la disponibilidad de agua en el intervalo deseado, los errores medio, cuadrático y final permitieron que los controladores difuso y proporcional hicieran los ajustes necesarios para obtener respuestas muy similares donde los errores no superaron el 1%.

Se evidenció que respecto al modelo planteado las respuestas de los riegos presentaban un menor tiempo de retardo estabilizando alrededor de los 25 segundos para ambos casos, esto se debió principalmente a la acción inmediata de los controlares por la disminución de humedad, la cual mantuvo más húmeda las capas superiores del sustrato haciendo que la conductividad hidráulica en función de la humedad fuera menor y por ende el agua se moviera más rápido hacia la profundidad deseada, disminuyendo el tiempo de reacción.

En comparación con el método tradicional, los controladores propuestos realizaron mayor cantidad de riegos al día, con duraciones más cortas, reflejando una respuesta de humedad con valores más estables en un rango saludable para la zona radicular y disminuyendo la

cantidad de agua lixiviada, lo que concordó con el análisis de las propiedades físicas del sustrato, aun así, el consumo diario por planta se vio claramente disminuido en las líneas 2 y 3, donde se pudo reducir el consumo.

La conductividad eléctrica fue otra variable que se vio impactada, en el método tradicional, posterior al riego se observó mayor saturación de sales, aunque esta no llegó a la zona perjudicial para la planta, continuar con riegos de este tipo podría ocasionar efectos negativos o exceso de sales en la zona radicular, por otra parte, los controladores propuestos mantuvieron una conductividad eléctrica más estable, donde tendió  $0,25 \text{ dS/m}$  y no evidencia picos abruptos posteriores al riego en ambos casos.

Se concluye que, basado en los parámetros hidrodinámicos del sustrato y el análisis de los mismos, se logró mejorar la respuesta de humedad en la zona radicular del cultivo de arándanos, manteniéndola en el rango de agua fácilmente disponible, mediante la implementación de dos controladores, los cuales variaron el tiempo de riego y la activación del mismo, donde el consumo versus un riego tradicional se vio disminuido en un 50% y la disponibilidad de nutrientes, en base a la medida de conductividad eléctrica se mantuvo en un rango adecuado.

## **6.2. Recomendaciones y trabajos futuros**

Durante el planteamiento y desarrollo de la tesis se propuso un segundo indicador de disponibilidad de nutrientes, el cual fue la medida de acidez del suelo. Aunque se compraron, validaron e instalaron tres sensores de pH en la zona radicular de cada una de las materas, al verificar la respuesta de estos en campo, se evidenciaron al pasar de los días lecturas erráticas, las cuales no pudieron ser utilizadas como referentes para los resultados y su respectivo análisis, pese a que fueron instalados siguiendo las indicaciones del fabricante y contaban con las protecciones necesarias para su uso en sitio. La medición de esta variable requiere de sensores más delicados los cuales debido a su costo, disponibilidad y modo de uso no son diseñados para mantenerse instalados en un sitio específico.

Aunque los controladores propuestos obtuvieron respuestas muy cercanas a la deseada, se evidenció un claro impacto de la humedad y temperatura ambiente en el estado del sustrato

y por ende en su conductividad hidráulica, la cual variaba especialmente los tiempos de respuesta, por tal razón se recomienda que futuros trabajos se concentren en proponer correcciones a las acción de los controladores basados en humedad, las cuales puedan anticipar mejor el impacto del ambiente especialmente sobre las capas superficiales del sustrato.

Para el presente trabajo los controladores fueron utilizados en época de lluvia, donde la humedad y temperatura contribuyeron a mantener la humedad del sustrato en un valor más elevado, por lo cual se podría plantear el uso de los controladores en épocas de sequía donde variando el rango de humedad y la respuesta también se podría asegurar la disponibilidad de agua y por ende hacer también un uso eficiente del recurso hídrico.

Otro aporte significativo que se podría evaluar en futuros trabajos es la implementación de los controladores propuestos en sustratos con distintas características físicas, como sería el caso de sustratos con mayor retención de humedad o menor conductividad hidráulica, en los cuales el rango de humedad se podría variar dependiendo de sus análisis, y continuar contribuyendo a la actividad agrícola del país.

La integración del conocimiento de los expertos, es otra variable que puede aportar al crecimiento e integridad de los proyectos posteriores, dado que permitirían incluir experiencias en sistemas con inteligencia artificial, aunque estos no se incluirían sirve la variable de humedad volumetría si lo podrían realizar sobre el estado visual de la planta, fruto o brote.

## Referencias Bibliográficas

- Abad, M., Noguera, P., & Carrión, C. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. *Tratado de cultivo sin suelo*, 3, 113–158.
- Acero Herrera, J., Puentes Acevedo, H. S., & others. (2019). Guía metodológica para la implementación y selección de paneles solares fotovoltaicos para edificios y viviendas en la ciudad de Bogotá DC.
- Aceros Orduz, D. F. (2020). Prototipo de una ruta tecnológica para el IOT, enfocada en las tecnologías de riego, para los agricultores de pequeña escala en Colombia.
- Acosta-Durán, C. M., Gallardo, C. S., Kämpf, A. N., & Bezerra, F. C. (2008). Materiales regionales utilizados en Latinoamérica para la preparación de sustratos. *Investigación Agropecuaria*, 5, 93–106.
- Alarcón Vera, A. (1997). Fertirrigación del pimiento dulce en invernadero. *Namesmy, A. Pimientos. Barcelona*, 45–52.
- Albites Paico, J. V., & Alvitez Figueroa, C. d. (2015). Diseño de un sistema de riego por goteo para el cultivo de palto Hass en parcela de 22ha del subsector de riego Ferreñafe.
- Arzola, N. C., Fundora, O., & De Mello, R. (2013). Manejo de suelos para una agricultura sostenible. *Jaboticabal. FCAV/UNESP*.
- Ayers, R. S., Westcot, D. W., & Alfaro, J. F. (1987). La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29. Rev. 1. *Food and Agriculture Organization. Roma, Italia*.
- Barbecho, J. G., & Calle Ortiz, J. E. (2012). Caracterización de la conductividad hidraulica de los suelos. *Caracterización de la conductividad hidraulica de los suelos*. Cuenca-Ecuador.

- Blueberries Consulting. (2018). China se convertirá en el mayor mercado mundial para los arándanos. *Blue Magazine*, 1. Obtenido de <https://blueberriesconsulting.com/china-se-convertira-mayor-mercado-mundial-los-arandanos/>
- Bryla, D. R. (11 de 2011). Crop Evapotranspiration and Irrigation Scheduling in Blueberry. En *Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications* (Vol. 134, págs. 166–178). InTech. doi:10.5772/18311
- Burés, S. (1997). Materiales procedentes de yacimientos naturales, explotación minera y construcción. Turberas. *Burés S.. Sustratos. Madrid: Ediciones Agrotécnicas*, 218–258.
- Bustillo Alvarez, A., & others. (2018). El cultivo del arándano (*Vaccinium corymbosum*) y su proyección en Colombia.
- Cabrera, R. I., & others. (1999). Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 5–11.
- Cáez Pérez, A. M., Cáez Pérez, J. C., Cáez Turizo, C. R., & others. (2020). *Tecnología e innovación en el agro colombiano*. B.S. thesis, Universidad EAN.
- Can Chulim, Á., Ramírez Ayala, C., Ortega Escobar, M., Trejo López, C., & Cruz Díaz, J. (2008). Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 26, 243–252.
- Carabalí, J. A., Gómez-García, J., Solano, M., Llumiquire, G., Burgos, C., & Carrera-Villacrés, D. (11 de 2019). Evaluación de la calidad de agua para riego y aprovechamiento del recurso hídrico de la quebrada Toglhuayco. *Siembra*, 6, 046–057. doi:10.29166/siembra.v6i2.1641
- Carrasco Castañeda, J. S. (2020). Planificación y diseño de un sistema de riego por goteo para el cultivo de arándano (*Vaccinium Myrtillus*) en fundo Lefkada de 116.64 Ha del sector de riego Olmos, utilizando software de diseño.

- Carrera, J. (2012). Manual práctico para la creación y desarrollo de plantaciones de arándanos en Asturias. *Tresalia Comunicación. Asturias*.
- Castellanos, J.-S., Jiménez, A.-F., Jiménez, F., Cárdenas, P.-F., & Herrera, E. (2020). Sistema inteligente de aplicación de agua con tasa variable en riego por goteo con conceptos de agricultura de precisión.
- Castellón Gómez, J. J., Bernal Muños, R., & Hernández Rodríguez, M. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería, 19*, 39–50.
- Chlingaryan, A., Sukkariéh, S., & Whelan, B. (8 de 2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture, 151*, 61–69. doi:10.1016/j.compag.2018.05.012
- Cohen-Manrique, C. S., Burbano-Bustos, A. F., Salgado-Ordosgoitia, R. D., & Merlano-Porto, R. H. (2020). Control de riego en cultivos de ahuyama en Sincelejo, Sucre (Colombia) gestionados a través del Internet de las Cosas. *Información tecnológica, 31*, 79–88.
- Colizzi, L., Caivano, D., Ardito, C., Desolda, G., Castrignanò, A., Matera, M., . . . Shi, H. (2020). Introduction to agricultural IoT. En *Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming* (págs. 1–33). Elsevier. doi:10.1016/b978-0-12-818373-1.00001-9
- Cronquist, A., & Takhtadziãñ, A. L. (1981). *An integrated system of classification of flowering plants*. Columbia university press.
- Cruz Crespo, E., Can Chulim, A., Sandoval Villa, M., Bugarin Montoya, R., Robles Bermudez, A., & Jaurez Lopez, P. (2013). Sustratos en la horticultura. *CONACYT*.
- Dalian Endeavour Technology Co., Ltd. (1 de 11 de 2021). *Dalian Endeavour Technology Co., Ltd*. Obtenido de Dalian Endeavour Technology Co., Ltd: <https://www.infwin.com/mec10-soil-moisture-ec-and-temperature-sensor-rs485-modbus/>

- De Boodt, M., Verdonck, O., & Cappaert, I. (1973). METHOD FOR MEASURING THE WATERRELEASE CURVE OF ORGANIC SUBSTRATES. *I Symposium on Artificial Media in Horticulture* 37, (págs. 2054–2063).
- Defas, R., & Guzmán, A. (2017). Implementación de un sistema de monitoreo y control de actuadores eléctricos AUMA utilizando protocolos de comunicación industrial Modbus RTU y Modbus TCP/IP. *Revista Anales*, 1, págs. 137–164.
- Díaz, F. (2004). Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernadero. *Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y producción Torreón, Coah, México, Octubre, 13*, págs. 44–52.
- Dumroese, R. K., Landis, T. D., & Wilkinson, K. M. (2012). Riego y fertirriego. In: *Contardi, L.; Gonda, H., coord. Produccion de plantas en viveros forestales. Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones; Comodoro Rivadavia: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco UNPSJB; Comodoro Rivadavia: Centro de Investigacion y Extension Forestal Andino Patagonico, Argentina. p. 115-125.*, 115–125.
- Eaton, F. M. (1954). Formulas for Estimating Leaching and Gypsum Requirements of Irrigation Waters. *Miscellaneous Publication/Texas Agricultural Experiment Station; No. 111*.
- ESPRESSIF SYSTEMS CO., LTD. (Junio de 2022). *ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO., LTD.* Obtenido de ESP8266: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266>
- Falconí Calle, C. L. (2020). Diseño del sistema de riego por goteo para arándanos en el campo Las Palmas, Sinaloa-México.
- Farfán Casallas, H. I. (2016). *Posibilidades de producción del cultivo de arándano (Vaccinium myrtillus) bajo las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en una finca del municipio de Villapinzón, Cundinamarca.* Bogotá D.C. Obtenido de [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1162&context=administracion\\_agronegocios](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1162&context=administracion_agronegocios)

- Fernández Luque, J. E., Romero Vicente, R., Pérez Martín, A., & Cuevas Sánchez, M. (2015). Estrategias y programación del riego: manual elaborado en el marco del Hito 1.3. 2: Bases tecnológicas de riego deficitario.
- Fernández Pérez, M. (2010). *Evaluación de sustratos de fibra de madera de pino frente a sustratos convencionales en cultivo hidropónico de tomate*. Universidad Pública de Navarra, Pamplona. España: Tesis. Ingeniero Agrícola.
- Flores, L., & Alcalá, R. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos Física de Suelos. *Instituto de Geología*, 56.
- Gamarra, C., Lezcano, M. I., de Ortíz, M. V., Galeano, M. D., & Cardús, A. J. (3 de 2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9. doi:10.29298/rmcf.v9i46.134
- García Hidalgo, Y. (2015). Calidad del agua con fines de riego. *Ojeando la Agenda*, 1.
- García Rubio, J. C., & González De Lena, G. G. (2011). El cultivo del arándano en Asturias. *El cultivo del arándano en Asturias*. Servicio Regional.
- García Rubio, J. C., García González de Lena, G., & Ciordia Ara, M. (2018). *El cultivo del arándano en el norte de España*. Asturgraf.
- García, A. (2012). Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 6, 27–36.
- García, J. C., & Verón, J. A. (2020). Evaluación de la calidad de agua para riego mediante el empleo de criterios actualizados. *Semiárida*, 30, 82.
- García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20, 1042.

- Gayosso-Rodríguez, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M. A., & Garruña-Hernández, R. (2016). Sustratos para producción de flores. *Agrociencia*, 50, 617–631.
- Hancock, J. (2009). Highbush blueberry breeding. *Latvian Journal of Agronomy/Agronomija Vestis*.
- Hernández Hipólito, R. A. (2012). Metodologías de evaluación, caracterización y programación del riego en sustratos. Coahuila.
- Hillel, D., Krentos, V. D., & Stylianou, Y. (1972). Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil science*, 114, 395–400.
- Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (2017). *Manual de manejo agronómico del arándano*. (C. G. Morales A., Ed.) Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- IPC. (2012). IPC-2221B. *Generic Standard on Printed Board Design*.
- Jamrey, P. K., & Nigam, G. K. (2018). Performance evaluation of drip irrigation systems. *The Pharma Innovation Journal*, 7, 346–348.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.
- JXCT. (31 de 10 de 2021). *JXCT*. Obtenido de JXCT: <http://www.jxctiot.com/product1/product1217.html>
- Khanna, A., & Kaur, S. (2 de 2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 218–231. doi:10.1016/j.compag.2018.12.039
- Khosla, R. (2010). Precision agriculture: challenges and opportunities in a flat world. *19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia*.

- Krishna, K. R. (2013). *Precision farming : soil fertility and productivity aspects*. Oaktown, ON Waretown, N.J: Apple Academic.
- Libardi, P. L., Reichardt, K., Nielsen, D. R., & Biggar, J. W. (1980). Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil science society of America journal*, 44, 3–7.
- Liotta, M. A., Carrión, R. A., Ciancaglini, N., & Olguin Pringles, A. (2015). *Riego por goteo*. Tech. rep., PROSAP; INTA.
- López, T., Duarte, C., González, F., & Cid, G. (2008). Actualización de propiedades físicas e hidrodinámicas para un sustrato en condiciones de organopónico. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17, 1–5.
- Lorduy, J. (6 de septiembre de 2019). Cultivos de Arándanos azules en Colombia se ha triplicado. *Agronegocios*, 1. Obtenido de <https://www.agronegocios.co/agricultura/cultivos-de-arandanos-azules-en-colombia-se-han-triplicado-en-dos-anos-2905108#>
- Manzano Juarez, J. (2008). *Análisis del inyector Venturi y mejora de su instalación en los sistemas de riego localizado*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia. doi:10.4995/thesis/10251/3901
- Marín, J. A. (2001). Forma y dimensiones del bulbo húmedo con fines de diseño de riego por goteo en dos suelos típicos de sabana. *Revista Científica UDO Agrícola*, 1, 42–47.
- Martínez Gamiño, M. Á., Jasso Chaverria, C., Osuna Ceja, E. S., Reyes Muro, L., Huerta Díaz, J., & Figueroa Sandoval, B. (2014). Efecto del fertirriego y labranza de conservación en propiedades del suelo y el rendimiento de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5, 937–949.
- Martínez, G. A., Moreno, F. G., Fierro, J. B., & others. (2013). Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano. *Tecnura*, 17, 33–47.

- Martínez, P. F., Roca, D., & others. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo.
- Mascarini, L., Lorenzo, G., Svartz, H., Pesenti, S., & Amado, S. (2012). Tamaño del contenedor y tipo de sustrato afectan la eficiencia en el uso del agua en *Gerbera jamesonii* para flor cortada. *Revista Brasileira de Horticultura Ornamental*, 18.
- Mekonnen, Y., Namuduri, S., Burton, L., Sarwat, A., & Bhansali, S. (1 de 2020). Review—Machine Learning Techniques in Wireless Sensor Network Based Precision Agriculture. *Journal of The Electrochemical Society*, 167, 037522. doi:10.1149/2.0222003jes
- Mendoza Martínez, A. E. (Marzo de 2013). Riego por Goteo. *CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal)*.
- Mesa Torres, P. A., & others. (2015). Algunos aspectos de la fenología, el crecimiento y la producción de dos cultivares de arandano (*Vaccinium corymbosum* L. x *V. darowii*) plantados en Guasca (Cundinamarca, Colombia).
- Meyer, H. J., & Prinsloo, N. (11 de 2003). Assessment of the Potential of Blueberry Production in South Africa. *Small Fruits Review*, 2, 3–21. doi:10.1300/j301v02n03\_02
- Microchip Technology Inc. (Junio de 2022). *Microchip Technology Inc.* Obtenido de PIC32MZ-W1 Wi-Fi® SoC and Module Family: <https://www.microchip.com/en-us/products/wireless-connectivity/embedded-wi-fi/pic32mz-w1-wi-fi-soc-and-module-family>
- Millán, F. (2016). Curso de Química II. Unidad 6: Calidad de aguas potabilizables. *Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, Extensión Mérida*.
- Morales-Maldonado, E. R., & Casanova-Lugo, F. (2015). Mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos, tamaño de partícula y proporción. *Agronomía Mesoamericana*, 26, 365–372.

- Muñoz-Carpena, R., & Dukes, M. D. (2005). Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Vegetable Crops1.
- Ortega Farías, S., & Acevedo Opazo, C. (1999). Programación del riego en sistemas por surco y goteo. *Universidad de Talca Facultad de ciencias Agrarias*, 1-19. Obtenido de <http://bosques.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/9924/CNR-0287.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1, 1–4.
- Pacheco, C. I., Álvarez, A. C., Martínez, J. A., Betancourt, D. E., & Pinzón, D. C. (2018). SISTEMA DE RIEGO AUTÓNOMO CON CAPACIDAD DE MEDIR VARIABLES AMBIENTALES USANDO SOFTWARE LIBRE. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.
- Perfetti, J. J., Balcázar, Á., Hernández, A., & Leibovich, J. (2013). *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia*. Bogotá, D.C: La Imprenta Editores S.A. Obtenido de [https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/61/LIB\\_2013\\_Pol%C3%ADticas%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agricultura\\_Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/61/LIB_2013_Pol%C3%ADticas%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agricultura_Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Phocaidés, A. (2007). *Handbook on pressurized irrigation techniques*. Food & Agriculture Org.
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. En *Advances in Agronomy* (págs. 1–85). Elsevier. doi:10.1016/s0065-2113(08)60513-1
- Pinochet, D., Artacho, P., & Maraboli, A. (2014). Manual de fertilización de arándanos cultivados en el sur de Chile. *Imprenta América. Valdivia, Chile*.
- Puñales, T. T., & Aguilar, C. B. (2016). La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. *Revista Científica Agroecosistemas*, 4, 46–61.

- Quesada Roldán, G., & Méndez Soto, C. (2005). Análisis fisicoquímico de materias primas y sustratos de uso potencial en almácigos de hortalizas.
- Quintero, M. F., González, C. A., & Guzmán, J. M. (2011). Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. *Flórez R., VJ (ed). Sustratos, Manejo del Clima, Automatización y Control en Sistemas de Cultivo sin Suelo. Universidad Nacional de Bogotá. Colombia. pp, 79–108.*
- Riot Technology Corp. (1 de 11 de 2021). *GroPoint G*. Obtenido de GroPoint G: <https://www.gropoint.com/products/soil-sensors/gropoint-pro>
- Rivadeneira, M., & Carlazara, G. (2011). Comportamiento fenológico de variedades tradicionales y nuevas de arándanos. *Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria, Argentina.*
- Sáez, J. N. (1999). Utilización de sustratos en viveros. *Terra Latinoamericana, 17, 231–235.*
- Salazar Castro, D., & Sánchez Arango, M. P. (2013). Propuestas de mejora del manejo logístico y tecnológico de sustratos con cascarilla de arroz usados en los cultivos de clavel en la sabana de Bogotá, con el apoyo de ASCOLFLORES. *PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.*
- Sanabria Bernal, F. F., & others. (2016). Efecto de la acidificación del agua de riego en un cultivo de arándano (*Vaccinium Corymbosum*) en la Sabana de Bogotá.
- Saud Toledo, J. P., & others. (2012). *Diseño de un sistema de riego por goteo para cultivos en zonas con escasas de agua*. B.S. thesis, Quito, 2012.
- Schilder, A., Isaacs, R., Hanson, E., & Cline, B. (2004). *A Pocket Guide to IPM Scouting in Highbush Blueberries*. Michigan State University Extension.
- Schugurensky, C., & Capraro, F. (2008). Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo. *Actas de XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA). Santiago, Chile.*

- Sebastián Gastañudi, E. J. (2019). Manejo de podas en el cultivo de “Arándano” *Vaccinium corymbosum* var. Biloxi en Chao, La Libertad.
- Sentek. (01 de 11 de 2021). *Sentek*. Obtenido de Sentek: <https://sentektechnologies.com/product-range/soil-data-probes/drill-drop/>
- Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla La-Mancha. (Junio de 2005). FERTIRRIGACIÓN. *Hoja informativa*(11), 1-8. Obtenido de <http://crea.uclm.es/siar/publicaciones/>
- Soil Survey Staff. (SSS). (1999). Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2a Ed. Agriculture Handbook N° 436. Soil Survey Staff. (2), 869.
- Strik, B., Dixon, E., Detweiler, A. J., & Sánchez, N. (2020). Growing Blueberries in Your Home Garden. *OREGON STATE UNIVERSITY EXTENSION SERVICE*(EC 1304), 26.
- Suarez, D. L. (1981). Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 469–475.
- Syscol Consultores S.A.S. (2020). Análisis Hidroclimatológico. *Fondo de Compensación Ambiental*, 1-157.
- Tejido, R. V., Cervantes, A. M., & Duarte, W. P. (2007). Evaluación hidráulica de algunos modelos de goteros comerciales. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16, 74–78.
- Tekbox Digital Solutions. (1 de 11 de 2021). *Tekbox Digital Solutions*. Obtenido de Tekbox Digital Solutions: <https://www.tekbox.com/product/tbsmp03-sdi-12-soil-moisture-temperature-probe/>
- Tombion, L., Puerta, A. V., Barbaro, L. A., Karlanian, M. A., Sangiacomo, M. A., & Garbi, M. (2016). Características del sustrato y calidad de plantines de lechuga (*lactuca*

- sativa l.) según dosis de lombricompuesto. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 32, 46–52.
- Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2012). *Nutrient solutions for hydroponic systems*. InTech Rijeka, Croatia.
- Undurraga, P., & Vargas, S. (2013). Manual de arándano.
- Uribe, H. (2013). Riego en arandano. *Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias*(263), 11.
- Valencia Pinzón, A. (16 de Octubre de 2019). MinAgricultura resalta el potencial de Colombia para convertirse en un gran proveedor de alimentos del mundo. *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. Obtenido de <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/MinAgricultura-resalta-el-potencial-de-Colombia-para-convertirse-en-un-gran-proveedor-de-alimentos-del-mundo.aspx>
- Valencia, K., & Proaño, J. (2005). Programación del riego para el cultivo de tomate (*lycopersicum esculentum m*) mediante la tina de evaporación y tres tensiones de humedad del suelo en la zona de milagro, provincia del guayas.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44, 892–898.
- Van Genuchten, M. v., Leij, F. J., Yates, S. R., & others. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. *U.S. Salinity Laboratory. Riverside: U.S. Department of Agricultural*.
- Vargas Benito, M. R. (2007). *Diseño y evaluación de inyectoras de fertilizante tipo venturi*. Tech. rep., Universidad Mayor de San Andrés, La Paz (Bolivia). Facultad de Agronomía.

Wilcox, L. (1955). *Classification and use of irrigation waters*. US Department of Agriculture.

Wilk, P., Carruthers, G., Mansfield, C., & Hood, V. (2009). Irrigation and moisture monitoring in blueberries. *Profitab. Sustain. Prim. Ind*, 827, 1–10.

