

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS

AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

AUTOMATIZACIÓN DEL RIEGO EN ARÁNDANO A PARTIR DE LAS PROPIEDADES DEL SUSTRATO

NURIA AIDE LÓPEZ HERNÁNDEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE :

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: Automatización del riego en arándano mediante las propiedades del sustrato

realizada por la alumna: Nuria Aide López Hernández

bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR



CONSEJERO

DR. PROMETEO SÁNCHEZ GARCÍA

ASESOR



DR. MANUEL SANDOVAL VILLA

ASESOR



DR. VICENTE ESPINOSA HERNÁNDEZ

ASESOR



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2020

AUTOMATIZACIÓN DEL RIEGO EN ARÁNDANO MEDIANTE LAS PROPIEDADES DEL SUSTRATO

**Nuria Aide López Hernández, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2020**

RESUMEN

El rendimiento y la calidad del fruto del arándano dependen en gran medida del sustrato, y de la aplicación suficiente y oportuna del riego, por esta razón se planteó que proporcionar el requerimiento hídrico en tiempo real, considerando las características del sustrato en el que se desarrolla, favorecería la productividad potencial del cultivo. Ergo, el objetivo general de este trabajo fue proponer un método de automatización del riego para la producción de arándano con base en las propiedades físicas del sustrato. Para poder alcanzar este objetivo se diseñó una metodología, que se dividió en dos fases. La primera consistió en la selección y generación de sustratos, y en la elaboración del algoritmo para automatizar el riego; y, la segunda en su implementación y evaluación bajo condiciones reales de invernadero, comparando el riego automatizado con un programa de riego diseñado a partir de la estimación de la ETo con el método empírico FAO Penman-Monteith. El diseño experimental fue completamente aleatorizado con un arreglo de 2 factores (tipo de riego y tipo de sustrato), obteniéndose 8 tratamientos y estableciéndose 6 repeticiones. La variable respuesta fue lecturas SPAD, por ser un indicador del vigor y vitalidad de las plantas de arándano. Los resultados mostraron que tanto la forma de aplicación del riego como el tipo de sustrato tienen efecto sobre el desarrollo de los arándanos, obteniéndose el mayor valor de lecturas SPAD en los tratamientos que corresponden al riego automatizado y al sustrato generado mediante la técnica de programación lineal Simplex Dual (70 % fibra de coco + 30 % tezontle). La innovación de este proyecto fue generar un prototipo único en su tipo para automatizar el riego de cultivos en sustrato, sin depender de algún método empírico ni de costosos y sofisticados instrumentos como los lisímetros de pesada. Se concluye que es posible automatizar los sistemas de riego para cultivo de arándano al correlacionar el contenido de humedad de los sustratos con la señal de los sensores capacitivos de humedad del suelo, favoreciendo la vigorosidad de las plantas.

Palabras clave: programación lineal, riego automatizado, sensor de humedad, sustratos.

AUTOMATION OF IRRIGATION IN BLUEBERRY THROUGH SUBSTRATE PROPERTIES

**Nuria Aide López Hernández, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2020**

ABSTRACT

The yield and quality of the blueberry fruit depend on the substrate, and on the sufficient and timely application of irrigation, therefore it was suggested that provide the water requirement in real time, considering the characteristics of the substrate in which it is developed, would benefit the potential productivity of the crop. Hence, the main objective of this work was to propose an irrigation automation method for the cultivation of blueberry based on the physical properties of the substrate. To achieve this objective, a two-phase methodology was designed. The first phase consisted in the selection and generation of substrates, and in the elaboration of the algorithm to automate irrigation. The second phase was the implementation and evaluation under real greenhouse conditions, comparing automated irrigation with an irrigation program designed with the empirical FAO Penman-Monteith method to estimate the ETo. The experimental design was completely randomized with an arrangement of 2 factors (type of irrigation and type of substrate), obtaining 8 treatments and establishing 6 repetitions. The response variable was SPAD readings, as it is an indicator of the vigor and vitality of the blueberry plants. The results showed that both the form of application of irrigation and the type of substrate have an effect on the development of blueberries, obtaining the highest value of SPAD readings in the treatments that correspond to automated irrigation and the substrate generated by the Simplex Duañ linear programming technique (70% coconut fiber + 30% tezontle). The innovation of this project was to automate irrigation without relying on any empirical method, or on expensive and sophisticated instruments such as weighing lysimeters. In conclusion, it is possible to automate irrigation systems for blueberry cultivation by relating the moisture content of the substrates with the signal from the capacitive soil moisture sensors, favoring the vigor of the plants.

Keywords: linear programming, automated irrigation, humidity sensor, substrates.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis:

A Dios por inspirar mi espíritu.

A mi amada mamá **Petra Hernández Rodríguez** como muestra de mi profundo amor, admiración, gratitud y respeto, y por ser mi más grande apoyo y ejemplo a seguir en esta vida. Gracias por ser la maestra que cada día que enseña a vivir de manera honesta y digna.

A mi querido hermano **Alfredo López Hernández** por ser el ángel que mi vida siempre necesitará y por ser un ejemplo de constancia, dedicación y perseverancia.

A mi amado **Omar Ángel Fuentes Franco** por mostrarme con amor lo bella que es la vida e impulsarme cada día a ser mejor. Te quiero y admiro profundamente.

A todos mis viejos **amigos** por los agradables momentos compartidos durante tanto tiempo y a los nuevos que conocí durante mis estudios de doctorado y que de una manera u otra alegraron mi corazón.

A los miembros de mi **Consejo Particular** y a todos los grandes maestros de quienes tuve la fortuna de aprender.

Cariñosa y respetuosamente,

Nuria Aide López Hernández

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profunda gratitud a todos los **mexicanos** que con sus impuestos y a través del **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT) financiaron mis estudios de doctorado.

Al **Colegio de Postgraduados** con acento especial al **Posgrado en Edafología** por su excelencia académica y por haberme brindado la oportunidad de continuar mi preparación durante estos cuatro provechosos años.

Al **Dr. Prometeo Sánchez García** por su excelencia como profesor y consejero, por todas sus enseñanzas y disposición en las asesorías otorgadas durante la realización de esta investigación.

Al **Dr. Manuel Sandoval Villa** por sus valiosas enseñanzas, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, y sus atinadas observaciones y sugerencias que lo mejoraron en gran medida.

Al **Dr. Vicente Espinosa Hernández** por guiarme en la realización de este trabajo con su amplia experiencia profesional, e inspirarme a siempre superarme.

Al **Dr. Mario Alberto Vázquez Peña** por el tiempo que dedicó a la revisión del presente trabajo y sus acertadas observaciones, así como por todas sus enseñanzas desde mi etapa en la universidad.

A los miembros de mi **Jurado Examinador**, recalcando la labor como sinodales del **Dr. Gerardo Sergio Benedicto Valdés** y del **Dr. Vicente Ángeles Montiel**.

A todos quienes contribuyeron de alguna manera en mi formación académica durante esta maravillosa etapa de mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE CUADROS	11
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. HIPÓTESIS	3
3.1 Hipótesis general	3
3.2 Hipótesis específicas	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1 Generalidades del cultivo de arándano.....	4
4.1.1 Origen	4
4.1.2 Importancia a nivel mundial	5
4.1.3 Importancia en México.....	5
4.1.4 Requerimientos de clima	6
4.1.5 Requerimientos edáficos	7
4.1.6 Requerimientos hídricos	7
4.1.7 Fertilización del arándano	8
4.2 Sustratos para el cultivo de arándano	9
4.2.1 Uso de sustratos en el cultivo de arándano.....	9
4.2.2 Caracterización de los sustratos.....	12
4.2.3 Obtención del sustrato ideal mediante programación lineal.....	15
4.3 Automatización del riego.....	17
4.3.1 Antecedentes de automatización del riego	17
4.3.2 Sensores de humedad del suelo	19
4.3.3 Tarjetas de desarrollo comerciales	22
5. MATERIALES Y MÉTODOS	24

5.1 FASE 1: Diseño del sistema de automatización del riego.....	24
5.1.1 Obtención de la mezcla de sustratos mediante programación lineal	24
5.1.2 Caracterización física y química de los sustratos	26
5.1.3 Calibración de los sensores de humedad	30
5.1.4 Determinación de la posición del sensor en la maceta	31
5.1.5 Desarrollo del algoritmo de riego e implementación en software y hardware	33
5.2 FASE 2: Implementación y evaluación del riego automatizado en arándano bajo condiciones de invernadero	33
5.2.1. Estimación del riego mediante un método indirecto	34
5.2.2. Establecimiento del experimento	36
5.2.3 Evaluación	37
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
6.1 FASE 1: Diseño del sistema de automatización del riego.....	38
6.1.1 Obtención de la mezcla de sustratos mediante programación lineal	38
6.1.2 Caracterización física y química de los sustratos	41
6.1.3 Calibración de los sensores de humedad	46
6.1.4 Determinación de la posición del sensor en la maceta	50
6.1.5 Desarrollo del algoritmo de riego e implementación en software y hardware	61
6.2 FASE 2: Implementación y evaluación del riego automatizado en arándano bajo condiciones de invernadero	67
6.2.1 Estimación del riego mediante un método indirecto	67
6.2.2 Establecimiento del experimento en invernadero.....	68
6.2.3 Evaluación	71
7. CONCLUSIONES	78
8. LITERATURA CITADA.....	80
ANEXOS	95
Anexo A. Valores de humedad gravimétrica y señal del sensor para la determinación de la posición del sensor.	95
Anexo B. Código de riego	99
Anexo C. Plano del sistema de riego automatizado para cultivo de arándano en sustrato.	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1.	Interfaz en MATLAB® del algoritmo del método Simplex Dual.....	40
Figura 6.2.	Curvas características de humedad de los sustratos.....	44
Figura 6.3.	Señales producidas en fibra de coco a diferentes tensiones de humedad.	47
Figura 6.4.	Señales producidas en tezontle a diferentes tensiones de humedad.....	48
Figura 6.5.	Señales producidas en el sustrato C (A+ pelita y turba, en volúmenes 1:1:1) a diferentes tensiones de humedad.....	49
Figura 6.6.	Señales producidas en el sustrato D (70 % A + 30 % B) a diferentes tensiones de humedad.....	49
Figura 6.7.	Distribución de los sensores de humedad en la maceta.....	50
Figura 6.8.	Disposición de las estacas para generar 3 distribuciones del riego.....	51
Figura 6.9.	Cortes transversales para presentar la distribución del agua a través del perfil vertical de la maceta.....	51
Figura 6.10.	Distribución del porcentaje de humedad en fibra de coco con una estaca (Caso 1) en los cortes A, B y C.....	52
Figura 6.11.	Distribución del porcentaje de humedad en fibra de coco con dos estacas (Caso 2) en los cortes A, B y C.....	53
Figura 6.12.	Distribución del porcentaje de humedad en fibra de coco con cuatro estacas (Caso 3) en los cortes A, B y C.....	53
Figura 6.13.	Distribución del porcentaje de humedad en tezontle con una estaca (Caso 1) en los cortes A, B y C.....	54
Figura 6.14.	Distribución del porcentaje de humedad en tezontle con dos estacas (Caso 2) en los cortes A, B y C.....	55
Figura 6.15.	Distribución del porcentaje de humedad en tezontle con cuatro estacas (Caso 3) en los cortes A, B y C.....	56
Figura 6.16.	Distribución del porcentaje de humedad en mezcla holandesa con una estaca (Caso 1) en los cortes A, B y C.....	56
Figura 6.17.	Distribución del porcentaje de humedad en mezcla holandesa con dos estacas (Caso 2) en los cortes A, B y C.....	57

Figura 6.18.	Distribución del porcentaje de humedad en mezcla holandesa con cuatro estacas (Caso 3) en los cortes A, B y C.....	58
Figura 6.19.	Distribución del porcentaje de humedad en 70:30 con una estaca (Caso 1) en los cortes A, B y C.....	59
Figura 6.20.	Distribución del porcentaje de humedad en 70:30 con dos estacas (Caso 2) en los cortes A, B y C.....	59
Figura 6.21.	Distribución del porcentaje de humedad en 70:30 con cuatro estacas (Caso 3) en los cortes A, B y C.....	60
Figura 6.22.	Diagrama de la conexión de los componentes del sistema de riego automatizado.....	61
Figura 6.23.	Diagrama de flujo del código para programar la automatización del riego.....	66
Figura 6.24.	Esquema de la tarjeta de programación UDOO NEO.....	66
Figura 6.25.	Representación del sistema embebido de control de riego.....	69
Figura 6.26.	Esquema de la distribución de los componentes del sistema de riego.....	70
Figura 6.27.	Efecto, en las lecturas SPAD, del tipo de sustrato (B) por cada tipo de riego (A).....	76
Figura 6.28.	Efecto, en las lecturas SPAD, del tipo de riego (A) por cada tipo de sustrato (B).....	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1.	Producción, área cosechada y rendimiento de arándano en los principales países productores, en el año 2018.....	5
Cuadro 4.2.	Niveles foliares estándar para arándano.....	8
Cuadro 4.3.	Niveles promedio de nutrimentos (mg L^{-1}) en la solución del suelo, recomendados para arándano.....	9
Cuadro 5.1.	Especificaciones del sensor de humedad.....	30
Cuadro 6.1.	Espacio poroso total (EPT), capacidad del aire (CA) y materia orgánica (MO) de la fibra de coco y roca volcánica (tezontle).....	38
Cuadro 6.2.	Espacio poroso total (EPT), capacidad del aire (CA) y materia orgánica (MO) de las restricciones y del sustrato formulado.....	41
Cuadro 6.3.	Análisis granulométrico, índice de grosor (IG) y diámetro medio de partícula (D_m) de sustratos.....	42
Cuadro 6.4.	Caracterización física de sustratos.....	43
Cuadro 6.5.	Caracterización química de sustratos.....	45
Cuadro 6.6.	Señales del sensor a diferentes contenidos de humedad en cada sustrato	47
Cuadro 6.7.	Asignación de los sensores a la tarjeta de programación para el riego.....	62
Cuadro 6.8.	Asignación y nomenclatura de las electroválvulas para el riego.....	63
Cuadro 6.9.	Estimación de ET_c del arándano mediante el método FAO Penman-Monteith, en Montecillo, Edo de México, con datos de 1982 a 2015....	67
Cuadro 6.10.	Programación de riegos para arándano.....	68
Cuadro 6.11.	Análisis de varianza con una confiabilidad del 95.0 %.....	71
Cuadro 6.12.	Prueba Tukey para comparar el efecto del tipo de riego con base en los valores promedio de las lecturas SPAD.....	72
Cuadro 6.13.	Prueba Tukey para comparar el efecto del tipo de sustrato con base en los valores promedio de las lecturas SPAD.....	74
Cuadro 6.14.	Prueba Tukey para comparar el efecto de las combinaciones de los factores (tipo de riego y sustrato) con base en lecturas SPAD.....	75

1. INTRODUCCIÓN

El máximo potencial de producción del arándano está asociado a varios factores entre los más relevantes se consideran el marco y densidad de plantación (Strik y Buller, 2005), la variedad (Bryla y Strik, 2007), el pH (Ferreyra *et al.*, 2001), la fertilización (Bryla y Machado, 2007; Pannunzio *et al.*, 2009; Pannunzio y Texeira, 2008) y el manejo del riego (Holzapfel *et al.*, 2004; Bryla, 2006; Pannunzio, 2008; Pannunzio *et al.*, 2011). Aunque es un cultivo bien adaptado a baja disponibilidad de nutrientes (Bryla y Strik, 2015), sus requerimientos de suelo tan específicos de pH ácido, alto contenido de materia orgánica y alta porosidad están conduciendo a que se produzca en sustratos (Sumedrea *et al.*, 2016).

La elección de dicho sustrato es muy importante dado que el rendimiento y la calidad del fruto, en cuanto a color, tamaño y composición química, es afectada por el tipo de sustrato empleado (Ochmian *et al.*, 2010). Una buena opción para su elección es el empleo de técnicas de programación lineal basadas en la minimización del precio del sustrato final que reúne los requerimientos para un buen desarrollo del cultivo (Burés *et al.*, 1988; Zamora *et al.*, 2005; Cruz *et al.*, 2010).

Otro factor de gran importancia a considerar dentro del manejo del cultivo es el riego debido al efecto que tiene la distribución del agua dentro del suelo o sustrato en la producción de arándanos, debido, principalmente, al sistema radicular superficial de esta especie. Estudios previos, muestran incrementos de hasta el 43% en el rendimiento de arándano, con la aplicación de riego (Yarborough, 2004; Seymour *et al.*, 2004).

Aunque se han perfeccionado y adaptado diversos indicadores de riego, con la ayuda de sensores y sistemas de monitoreo más sofisticados que permiten determinar con mayor confiabilidad el momento del riego a través de variables asociadas al estrés hídrico de los cultivos, en la mayoría de los casos el riego se aplica de forma empírica por lo que no existe un buen acoplamiento entre el riego y las demandas evapotranspirativas del cultivo,

y se presentan periodos de déficit/superávit de humedad que afectan la productividad potencial del cultivo y el uso racional del agua y los fertilizantes.

A partir de la problemática planteada en el párrafo anterior y considerando que tanto el rendimiento como la calidad del fruto del arándano dependen en gran medida del sustrato, y de la aplicación suficiente y oportuna del riego, se planteó que proporcionar el requerimiento hídrico en tiempo real, considerando las características del sustrato en el que se desarrolla, favorecería la productividad potencial del cultivo.

Para tal efecto se planteó el objetivo de proponer un método para automatizar el riego para la producción de arándano con base en las propiedades físicas del sustrato, con la intención de proporcionarle a las plantas el agua requerida en tiempo real, evitando así tanto excesos como déficits, sin depender de algún método basado en la estimación ni de costosos y sofisticados instrumentos como los lisímetros de pesada, y teniendo como meta primordial favorecer la vitalidad y vigorosidad de las plantas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Proponer un método de automatización del riego para la producción de arándano con base en las propiedades físicas del sustrato.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas del sustrato para cultivo de arándano.
- Correlacionar las propiedades físicas del sustrato con el riego en arándano para generar un algoritmo que permita automatizarlo.
- Evaluar la efectividad del algoritmo bajo condiciones de invernadero con base en la vigorosidad de las plantas de arándano.

3. HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis general

Es posible automatizar el riego en arándano a partir de las características físicas del sustrato.

3.2 Hipótesis específicas

- Las propiedades físicas del sustrato influyen en la programación del riego en arándano.
- Es posible relacionar el requerimiento de riego en arándano con las propiedades físicas del sustrato en que se produce.
- El riego automatizado en arándano permite proporcionar el agua requerida por el cultivo sin comprometer su calidad.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se presenta el estado del arte del arándano como cultivo agrícola, abarcando su origen, importancia a nivel internacional y nacional, sus requerimientos de clima, suelo y agua, la fertilización, y los sustratos que se emplean para su cultivo, así como revisión sobre la caracterización física y química de los mismos. También se incluye la investigación bibliográfica realizada sobre los avances en la automatización del riego.

4.1 Generalidades del cultivo de arándano

4.1.1 Origen

El arándano (*Vaccinium sp.*) es un arbusto perenne nativo del hemisferio Norte (Muñoz, 1988; Rivadeneira y Kirschbaum, 2012), pertenece a la familia Ericaceae (García *et al.*, 2018), al género *Vaccinium* y, en el caso del arándano azul, al subgénero *Cyanococcus* (Sudzuki, 2002).

De las más de 30 especies que constituyen el género *Vaccinium*, solo tres tienen importancia económica, como especie frutal, el arándano ojo de conejo o rabbiteye (*Vaccinium virgatum* Aiton), el arándano bajo o lowbush (*Vaccinium angustifolium*) y el arándano alto o highbush (*Vaccinium corymbosum*) (Muñoz, 1988; Undurraga y Vargas, 2013). Dentro de estos últimos se encuentran los arándanos altos del norte o Northern Highbush Blueberry y los arándanos altos del sur o Southern Highbush Blueberry; e incluso hay arándanos medio altos, que son híbridos interespecíficos del arándano alto y el bajo (Barbat, 2005).

Actualmente existe una gran cantidad de variedades comerciales, como la variedad “Victoria HT-929” de la Universidad de Georgia, que es una variedad de la especie Southern Highbush, vigorosa, de maduración medianamente tardía, con un arbusto abierto que sostiene fruta en el exterior de la planta para una fácil recolección (Fall Creek, 2018).

4.1.2 Importancia a nivel mundial

A nivel mundial el cultivo del arándano ha cobrado gran importancia en los últimos años. Las características nutricionales del fruto, rico en vitaminas, minerales, bajas calorías y una alta proporción de antioxidantes, lo hace un fruto apetecible, dada la demanda de los consumidores de mercados exigentes por alimentos sanos y que contribuyan a una mejor salud (Cerda, 2004).

Los datos oficiales más recientes indican que los principales países productores de arándano en el año 2018 fueron Estados Unidos, Canadá, Perú, España, México y Polonia, en ese orden, tal como se muestra en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Producción, área cosechada y rendimiento de arándano en los principales países productores, en el año 2018.

País	Producción (ton)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (ton/ha)
Estados Unidos	255,050	36,098	7.06
Canadá	164,205	40,998	4.00
Perú	94,805	6,011	15.77
España	43,516	3,722	11.69
México	40,251	3,611	11.15
Polonia	25,301	8,089	3.13

Fuente: FAOSTAT (2020).

4.1.3 Importancia en México

México está adquiriendo un lugar preponderante en la producción de “berries” a nivel mundial, por su posición geográfica, sus condiciones de clima y suelo apropiados, y su cercanía con uno de los mercados principales del mundo, los Estados Unidos de América (Medina, 2006).

En 2006, la producción nacional fue de aproximadamente 300 toneladas (SIAP, 2016), misma que disminuyó en 2007 y 2008, pero que aumentó significativamente en el año 2009 al alcanzar aproximadamente 1,060 toneladas. Ese aumento se mantuvo año con año, reportándose en 2018 una producción aproximada de 40,251 toneladas, pagadas a un precio medio rural (PMR) de \$52,344.12 por cada tonelada, lo que resultó en un valor de producción nacional de 2,107 millones de pesos (SIAP, 2020).

Se estima que en México el consumo de arándano per cápita es de 60 gramos por año; sin embargo, la importancia del fruto radica en la exportación, siendo Estados Unidos a donde se exporta 95.4 %, exportándose en 2018 alrededor de 40,251 toneladas; convirtiendo a México en el cuarto productor mundial de arándanos (SIAP, 2019).

En 2018 los estados con mayor producción fueron Jalisco, Sinaloa, Michoacán, Baja California, y Colima, siendo Jalisco el estado que encabeza el cultivo de arándano tanto en superficie sembrada como en valor económico, generando 708 millones de pesos en 2018 (SIAP, 2019).

4.1.4 Requerimientos de clima

El arándano se adapta a una amplia gama de climas y la principal restricción se relaciona con el requerimiento de horas frío (HF) (Caruso y Ramsdell, 1995). De acuerdo con Barbat (2005), los arándanos ojo de conejo requieren entre 400 y 800 HF, toleran mejor el calor y la sequía. Los arándanos bajos tienen altísimos requerimientos de frío y resisten temperaturas de -45 °C, crecen desde la latitud 44° latitud norte. Los arándanos medio altos tienen una tolerancia al frío comparable con los arándanos altos. Los altos del norte requieren de 800 a 1000 HF y resisten temperaturas de -30 °C. Los altos del sur requieren de 200 a 400 HF, lo que permite su cultivo en latitudes bajas.

4.1.5 Requerimientos edáficos

Requieren de suelos ácidos, con pH 4.5 - 5.5 (García *et al.*, 2018), con buen contenido de materia orgánica (3 a 5 %) y que sean sueltos y bien drenados, dado que el sistema radical del arándano está compuesto principalmente por raíces finas y fibrosas que se concentran en un 80 % en los primeros 50 cm de profundidad del suelo, con relativamente baja capacidad de absorción, incapaces de atravesar superficies de suelo compactas (Undurraga y Vargas, 2013), y con raíces absorbentes que pueden tener diámetros menores a 50 μm (Retamales y Hancock, 2018), incluso de 20 μm (Valenzuela-Estrada *et al.*, 2008), que es aproximadamente el doble del grosor del típico pelo radicular unicelular (Barber, 1984), por lo que se llega a considerar que carecen de pelos radicales (Undurraga y Vargas, 2013; Bryla *et al.*, 2017). Sin embargo, hay quienes consideran que las pequeñas raíces monarcas y diarcas carentes de crecimiento secundario y con diámetros cercanos a los 100 μm son los pelos radicales en las Ericaceae, como es el caso de los arándanos ojo de conejo Woodard y Tifblue (Baba *et al.*, 2018).

4.1.6 Requerimientos hídricos

Además de los requerimientos de suelo y de clima, el arándano requiere un buen manejo de la calidad y cantidad del agua de riego. En lo que a calidad respecta, para un buen desarrollo y producción, el arándano requiere aguas de riego con contenidos de bicarbonato (HCO_3^-) $< 1.5 \text{ mmol L}^{-1}$, de sodio (Na^+) $< 2.0 \text{ mmol L}^{-1}$ y de cloruro (Cl^-) $< 4.0 \text{ mmol L}^{-1}$, y un pH < 7.0 (Wright *et al.*, 1994). El pH del agua de riego es importante porque afecta el diámetro de frutos, peso unitario y producción total, que tienden a ser superiores cuando el pH del agua es ácido (Ferreya *et al.*, 2001).

En cuanto a cantidad, tanto un déficit como un exceso de agua tienen un efecto depresivo sobre el crecimiento de las plantas. El déficit de agua no permite que la planta alcance su rendimiento potencial, aunque la sensibilidad a los déficits hídricos dependerá de su estado fenológico (Mingeau *et al.*, 2001). Por otro lado, el exceso de agua puede favorecer el desarrollo de enfermedades fungosas (Bryla y Linderman, 2007).

La selección y la gestión de sistemas de riego es de suma importancia en el arándano (Holzapfel *et al.*, 2004; Holzapfel, 2009), ya que la distribución del agua dentro del suelo tiene un efecto importante en su producción, principalmente por el sistema radicular superficial de esta especie (Pannunzio *et al.*, 2009). En cultivos que desarrollan sus raíces muy superficialmente, como es el caso del cultivo del arándano, que tiene raíces de no más de 20 cm, una reducción del área mojada puede conducir a un severo déficit hídrico, con graves reducciones sobre la magnitud de la evapotranspiración real (Allen *et al.*, 2000; Hunt *et al.*, 2008).

Estudios muestran incrementos de hasta el 43 % en el rendimiento de arándano, con la aplicación de riego (Yarborough, 2004; Seymour *et al.*, 2004). El manejo del potencial del agua del suelo es importante para lograr altas tasas de crecimiento, siendo 10 cb, el potencial aconsejado para el mismo. La mayor demanda de agua ocurre previo a la cosecha con evapotranspiraciones reales de 19 L planta⁻¹ para cultivos regados por goteo (Jaureguiberry, 1991).

4.1.7 Fertilización del arándano

En comparación a otras especies frutales, el arándano tiene bajos requerimientos nutricionales, especialmente en el caso de K y Ca. Los niveles foliares estándar, es decir, aquellos valores bajos los cuales el crecimiento y producción de fruta se ven afectados, se muestran en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Niveles foliares estándar para arándano.

Macronutrientes					Micronutrientes				
(g kg ⁻¹)					(mg kg ⁻¹)				
N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	B	Zn
16.5	1.0	3.5	3.4	1.2	168	150	15	49	20

Fuente: Hancock y Hanson, 1986; Retamales, 1988.

Cuando se produce bajo fertirriego hay algunas recomendaciones de fertilización que se pueden seguir como la de Sánchez (2013), presentada en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Niveles promedio de nutrimentos (mg L^{-1}) en la solución del suelo, recomendados para arándano.

Etapa fenológica	CE (dS m^{-1})	Requerimiento nutrimental (mg L^{-1})					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Vegetativa	0.5	49	10	55	36	10	35
Inicio Floración	0.7	69	14	76	50	13	49
Inicio fructificación	1.0	98	19	109	72	19	70
	1.3	127	25	142	94	25	91
Fructificación plena	1.5	147	29	164	108	29	105

4.2 Sustratos para el cultivo de arándano

En el siguiente tema se exponen los tipos de sustratos más utilizados para el cultivo de arándano, así como la caracterización y la forma de obtener mezclas de los mismos mediante programación lineal.

4.2.1 Uso de sustratos en el cultivo de arándano

El suelo es el medio de crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, no posee características homogéneas que le permitan ser idóneo para todas (Parra *et al.*, 2016). Por este motivo, en horticultura, es frecuente reemplazar el suelo natural por sustratos de origen diverso, que ofrezcan al sistema radicular, y a la planta completa, una condición más cercana a la óptima para su alimentación hídrica y mineral (Martínez y Roca, 2011).

En México hay una amplia variedad de materiales (i. e., polvo de coco, tezontle, perlita, pumacita, tepezil, compostas, turba, corteza de pino, cascarilla de arroz, entre otros) que se emplean como sustratos; sin embargo, se le ha dado poca importancia a su

caracterización la cual desempeña un papel clave en el manejo agronómico del cultivo (Vargas *et al.*, 2008).

La importancia en la elección del sustrato para el cultivo de arándano radica en que el rendimiento y la calidad del fruto, en cuanto a color, tamaño y composición química, es afectada por el tipo de sustrato empleado (Ochmian *et al.*, 2010). Por ejemplo, se demostró que en el cultivar Elliott, la turba con pH de 3.46 genera frutos más grandes (diámetro > 12 mm), pero con menor contenido de polifenoles (287 mg 100 g⁻¹) que cuando el cultivar se establece en un sustrato mineral con pH de 5.32 (Ochmian *et al.*, 2015). En el caso de la variedad Sierra, al evaluar aserrín, turba y cáscara de cacao se encontró que con este último sustrato se obtienen los frutos más pequeños y de menor peso (64 g/100 frutos), pero con la firmeza más alta medida tanto vertical (512 G mm⁻¹), como horizontalmente (275 G mm⁻¹); los frutos cultivados en turba fueron los de mayor concentración de sólidos solubles (14.45 %); mientras que los frutos cultivados en aserrín tuvieron el menor contenido total de antocianinas (120.92 mg 100 g⁻¹) (Ochmian *et al.*, 2009).

Uno de los sustratos más usados en la producción de arándano es la turba debido, principalmente, a su bajo pH (Albert *et al.*, 2010). Sin embargo, al ser un recurso limitado (Caspersen *et al.*, 2016), deben buscarse alternativas para cultivar el arándano, como el tezontle (Salgado *et al.*, 2018), la fibra de coco (Cruzat y Mancilla, 2010) o una mezcla de turba, perlita y fibra de coco (Ristow *et al.*, 2012), conocida entre los productores mexicanos como mezcla holandesa.

El tezontle es una grava de origen volcánico porosa, de color rojo, amarillento o negro, abundante en varias regiones de México. Se considera un material químicamente inerte. Tiene pH de neutro a ligeramente alcalino, muy baja CIC, alta porosidad total, y mantiene su estructura inalterada a lo largo del tiempo, aunque sus propiedades físicas dependen mucho del tamaño de las partículas (Martínez y Roca, 2011).

La fibra de coco es utilizada como sustituto de la turba y sus propiedades físicas y químicas se desplazan dentro de rangos aceptables (Evans *et al.*, 1996).

La turba es, en la actualidad y principalmente en países de clima templado, uno de los sustratos más utilizados. Es un material orgánico difícilmente renovable proveniente de la deposición natural de los residuos vegetales que caen sobre el suelo, descomponiéndose lentamente durante cientos de años (Arenas *et al.*, 2002). Su característica principal es su elevada capacidad de retención de agua (Rivière y Caron, 2001).

La perlita es un tipo de arena volcánica de sílice que calentada a unos 1000 ° C se funde y se hincha formando copos muy porosos (Moinereau *et al.*, 1987). La densidad aparente es baja y la porosidad es elevada, aunque estas y el resto de las propiedades físicas varían según el tamaño de las partículas (Martínez y Roca, 2011). Absorbe tres a cuatro veces su peso de agua (Bosques, 2010); y es de muy fácil lavado cuando los niveles de salinidad aumentan (Martínez y Roca, 2011).

En cuanto a sus características químicas, la perlita es considerada prácticamente inerte, debido a que tiene una capacidad de intercambio catiónico muy baja (1.5 – 2.5 meq·100 g⁻¹) y una capacidad tampón para el pH muy limitada. Está compuesta principalmente por silicio y aluminio y se puede considerar desprovista de nutrientes, aunque si se utilizan soluciones nutritivas medianamente ácidas (pH ≤ 5), puede originar problemas de fitotoxicidad debidos a una excesiva solubilización del aluminio. Su pH es neutro o ligeramente alcalino (7 – 7.5) y su salinidad muy baja (Caja Rural Intermediterranea, 2017; Martínez y Roca, 2011). Un sustrato inerte no se descompone química ni bioquímicamente, no libera elementos solubles de forma notable ni tiene capacidad de adsorber elementos añadidos a la solución del sustrato, por lo que, no existe transferencia de materia entre el material sólido y la solución (Burés, 2002). Por eso, la perlita se clasifica dentro de los sustratos inertes, al poseer una capacidad de intercambio catiónico muy baja y no contener nutrientes minerales; además, de ser estéril y esencialmente neutra (Bosques, 2010).

Debido a que difícilmente un material reúne por si sólo las características apropiadas a las necesidades de las plantas, es una práctica frecuente el uso de mezclas que permitan obtener las propiedades buscadas (Burés, 1997).

4.2.2 Caracterización de los sustratos

García *et al.* (2001) indican que la calidad de las plántulas depende del tipo de sustrato utilizado, específicamente de sus características fisicoquímicas. Es decir, la aptitud de un sustrato puede ser definida con base en propiedades físicas, químicas y biológicas (López *et al.*, 2014).

La caracterización de mayor importancia para los sustratos abarca características físicas como distribución granulométrica, porosidad, densidad aparente, retención de agua; y características químicas como capacidad de intercambio catiónico, pH, relación carbono/nitrógeno y contenido de nutrientes (Bracho *et al.*, 2009; Pastor, 1999).

4.2.2.1 Granulometría

La granulometría de un sustrato es la distribución de partículas según su tamaño (Quesada y Méndez, 2005). La mayoría de los sustratos están constituidos por partículas de diferentes tamaños cuya distribución incide en la porosidad y, por tanto, en el contenido de aire y agua del sustrato. Partículas con tamaño superior a 0.9 mm retienen poca agua, pero tienen buena aireación, caso contrario ocurre en partículas con tamaño inferior a 0.2 mm, por lo que es recomendable una mezcla de partículas de 0.2 a 2.5 mm, que retienen suficiente agua fácilmente disponible y además, tienen una adecuada aireación (Castellanos, 2009).

La distribución del tamaño de partícula de los sustratos se expresa frecuentemente como un único parámetro: el Índice de Grosor. Este índice se define como el porcentaje acumulado (en peso o en volumen) de partículas con diámetro superior a 1 mm, y suele estar bien correlacionado con la porosidad de aire y la capacidad de retención de agua (Ansorena, 1994).

4.2.2.2 Porosidad

El espacio poroso o porosidad total es la proporción no sólida del volumen del sustrato. Representa el volumen de aire del material, seco en estufa, expresado como un porcentaje

del volumen total (Pire y Pereira, 2003). Su valor óptimo se produce cuando alcanza niveles superiores a 85 % (Ríos, 2010).

La porosidad de aireación o espacio drenable de poros, es el volumen del sustrato ocupado por aire cuando su nivel de humedad corresponde a la “capacidad del recipiente”, es decir, cuando el sustrato se ha saturado de agua y se ha permitido drenar libremente (Pire y Pereira, 2003).

4.2.2.3 Densidad aparente

La densidad aparente representa el peso seco del sustrato con relación al volumen total que ocupa (Pire y Pereira, 2003).

4.2.2.4 Curva de liberación de agua

De Boodt *et al.* (1974) propusieron el uso de la curva característica de liberación de humedad que permite conocer la capacidad de un sustrato de retener agua bajo potenciales hídricos de 10, 50 y 100 cm. Ríos (2010) y Abad *et al.* (1993) describen los puntos relevantes de esta curva característica, correspondientes a las modificaciones de Martínez (1993).

- Agua fácilmente disponible (AFD), cantidad de agua (% en volumen) que se libera al aplicar una tensión al sustrato entre 10 y 50 cm de columna de agua. Se considera como rango óptimo de 20 a 30 %.
- Agua de reserva (AR), cantidad de agua (% en volumen) liberada al aplicar al sustrato una tensión entre 50 y 100 cm de columna de agua. Se considera como rango óptimo de 4 a 10 %.
- Agua total disponible (ATD), es la suma del AFD y el AR.
- Agua difícilmente disponible (ADD), cantidad de agua (% en volumen) retenida en el sustrato después de aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua.

- Capacidad de aireación (CA), proporción del volumen del sustrato ocupado por aire cuando se ha saturado de agua y se ha permitido drenar libremente, normalmente a 10 cm de columna de agua. Se considera como rango óptimo de 10 a 30 %.
- Capacidad de retención de humedad (CRH), máxima cantidad de agua que puede retener un sustrato colocado en un contenedor, cuando se ha saturado de agua y se ha permitido drenar libremente. También se le conoce como capacidad de contenedor y es equiparable al concepto de capacidad de campo en suelos agrícolas (Martínez *et al.*, 1993; Ríos, 2010).

La desventaja del método propuesto por De Boodt *et al.* (1974), es que requiere de un equipo especial de tensión de humedad, el cual no está disponible en muchos laboratorios (Pire y Pereira, 2003). En este sentido, Ansorena (1994), propuso el uso de porómetros para determinar la capacidad de retención de humedad y de aireación de los sustratos. Adicionalmente, permite determinar la porosidad total, densidad aparente y real del medio poroso (Pire y Pereira, 2003).

4.2.2.5 pH

La reacción de acidez o alcalinidad, también llamada pH, determina la relación de concentración entre el hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-) en un medio acuoso. En términos químicos el pH se determina como el logaritmo negativo de la concentración de H^+ en solución y su escala se encuentra entre 0 y 14 (Hirzel, 2012).

En términos agronómicos, el pH del suelo (o sustrato) afecta directamente la mayor o menor disponibilidad de nutrientes hacia las plantas. El pH ácido (menor de 5.5) reduce la disponibilidad de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), boro (B) y molibdeno (Mo), e incrementa la disponibilidad de hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y aluminio (Al). El pH básico (mayor a 8.0) reduce la disponibilidad de Fe, Zn, Mn, y en muchos casos N, P y K, aumentando la disponibilidad de Mo y de otros

iones que en cierta concentración pueden afectar indirectamente el crecimiento de las plantas como los carbonatos y bicarbonatos. Asimismo, cuando el pH se encuentra entre 6.0 y 7.0 se presenta la mayor disponibilidad de la mayoría de los nutrientes esenciales (dentro de su fracción disponible o biodisponible) para la mayoría de las plantas cultivadas con fines agrícolas (Hirzel, 2012).

4.2.2.6 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo (CE) es una medida de la cantidad de sales en el suelo (salinidad del suelo). Es un indicador importante de la salud del suelo. Afecta los rendimientos de los cultivos, la disponibilidad de nutrientes de las plantas y la actividad de los microorganismos del suelo que influyen en los procesos clave del suelo, incluida la emisión de gases de efecto invernadero como los óxidos de nitrógeno, el metano y el dióxido de carbono (USDA, 2005).

4.2.2.7 Materia orgánica

La materia orgánica del suelo es cualquier material producido originalmente por organismos vivos (plantas o animales) que se devuelve al suelo y pasa por el proceso de descomposición. Consta de una gama de materiales que van desde los tejidos originales intactos de plantas y animales hasta la mezcla sustancialmente descompuesta de materiales conocidos como humus (FAO, 2005).

4.2.3 Obtención del sustrato ideal mediante programación lineal

Durante la Segunda Guerra Mundial se inició, en Inglaterra, la investigación de operaciones (IO), con la finalidad de optimizar la utilización del material bélico. Al término de la guerra, las ideas formuladas en operaciones militares se adaptaron para mejorar la eficiencia y productividad en el sector civil. La técnica de IO más importante es la programación lineal (PL), misma que está diseñada para modelos con funciones objetivo y restricciones lineales. La implementación de esta técnica en la práctica considera las siguientes fases:

1. Definición del problema.
2. Construcción del modelo, que consta de tres componentes básicos: las variables de decisión que pretendemos determinar, el objetivo que necesitamos optimizar (minimizar o maximizar) y las restricciones que la solución debe satisfacer.
3. Solución del modelo.
4. Validación del modelo.
5. Implementación de la solución.

Dentro de la PL existen diversos métodos para encontrar la solución óptima, es decir, aquella que satisface todas las restricciones (solución factible) y produce el mejor valor (máximo o mínimo) de la función objetivo, como son: método gráfico, el simplex, simplex dual, método M, de las dos fases, cada método con sus propias características. Actualmente, las aplicaciones más comunes de PL son en inversiones, planificación de la producción, mano de obra y desarrollo humano, control de inventarios, y mezclas. Dado que varias aplicaciones de PL tienen que ver con la mezcla de diferentes materiales para fabricar productos que satisfagan ciertas especificaciones, al mismo tiempo que se minimiza el costo y se maximiza la utilidad, es por lo que se pensó en formular la mezcla de sustratos mediante PL (Taha, 2012).

La idea de usar programación lineal surgió con la intención de minimizar el precio de un sustrato que reúna los requerimientos de un cultivo en específico, y ha sido aplicada con éxito (Burés *et al.*, 1988; Zamora *et al.*, 2005; Cruz *et al.*, 2010). Las variables de diseño son propiedades físicas y químicas como materia orgánica (MO), espacio poroso total (EPT) y capacidad de aireación (CA) (Zamora *et al.*, 2005), y las restricciones suelen ser los valores considerados como óptimos para los cultivos (EPT > 58 %, MO: 5-19 %, CA: 10-30 %) (Cruz *et al.*, 2010).

4.3 Automatización del riego

4.3.1 Antecedentes de automatización del riego

Al tener un mejor control en las variables ambientales y agronómicas, la producción bajo condiciones de invernadero es mejor, en calidad y cantidad, que la producida a campo abierto (Papadopoulos, 1991; Snyder, 1992). Uno de los principales factores que afectan el rendimiento de cualquier cultivo es la aplicación oportuna y suficiente del riego. Una mala programación de riego también promueve la presencia de enfermedades y desórdenes fisiológicos (Adams y Ho, 1993; Peet y Willits, 1995).

Aunque se han perfeccionado y adaptado diversos indicadores de riego, con la ayuda de sensores y sistemas de monitoreo más sofisticados que permiten determinar con mayor confiabilidad el momento del riego a través de variables asociadas al estrés hídrico de los cultivos (López *et al.*, 2001), en la mayoría de los casos el riego se aplica de forma empírica por lo que no existe un buen acoplamiento entre el riego y las demandas de evapotranspiración del cultivo, y se presentan periodos de déficit o superávit de humedad que afectan la productividad potencial del cultivo y el uso racional del agua y los fertilizantes (Flores *et al.*, 2007).

Se han realizado, con anterioridad, trabajos de investigación con el objetivo de desarrollar sistemas de riego automatizados, algunos de ellos para realizar el riego en tiempo real, empleando un método de balance hídrico con base en la evapotranspiración de referencia, lisímetros de pesada, y diversos sensores como los de humedad del suelo; y cuyos resultados muestran que es posible automatizar y controlar la aplicación del agua considerando un programa de riego, una unidad de control y usando tecnologías de información (Castro *et al.*, 2008); sin embargo, hasta el momento no existe evidencia de sistemas de riego automatizado para sustratos.

En el caso de emplear el balance hídrico, se han propuesto prototipos para riego multicultivo, en donde el riego se lleva a cabo como resultado de la función de abatimiento del agua en el suelo en conjunción con el balance hídrico, entonces el software envía

señales digitales de salida por el puerto serial RS232 de una computadora hacia un dispositivo electrónico, para accionar los dispositivos físicos de riego y complementarios, como lo son electroválvulas, ventiladores, lámparas (Lugo *et al.*, 2011).

En el caso de uso de sensores, una opción explorada han sido los sensores de visión, con el objetivo de aplicar el riego al activarse unos aspersores de acuerdo a los parámetros de una foto tomada con una cámara IP colocada a 15 metros de altura y que escanea la humedad del campo. Además, con parámetros de clima en tiempo real es posible controlar que los aspersores no enciendan cuando se pronostica lluvia. De esta manera, el sistema de riego funciona como un detector de humedad (Rendón *et al.*, 2015).

Otro ejemplo de uso de sensores, se presenta en el caso de riego en huertos, donde se han implementado sistemas de riego automatizado con sensores de humedad del suelo y sensores de temperatura del aire, ambos conectados, vía bluetooth, a una tarjeta Arduino donde un código de programación permite controlar el riego. La implementación de ese sistema permite reducir el consumo de agua y mejorar la productividad de los cultivos (Guijarro *et al.*, 2018).

Específicamente, en una huerta de manzana, se logró incrementar en un 73 % la eficiencia en el uso económico del agua, comparado con el riego manual, al automatizarse el riego mediante sensores dentro de sistemas de control basados en la retroalimentación en tiempo real, comprobándose que la introducción de tecnología en el riego permite mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura, lo que tiene repercusiones benéficas tanto a nivel económico como ambiental; además, de ahorro en trabajo y tiempo de los irrigadores (Ooi *et al.*, 2016).

La innovación del proyecto de este trabajo de tesis es que se generó un prototipo de automatización del riego para sustratos (medios muy porosos) y no para suelo como todos los trabajos previamente realizados, y que, adicionalmente, el riego no depende de ningún método empírico como los basados en balance hídrico, ni de costosos y sofisticados instrumentos como los lisímetros de pesada.

4.3.2 Sensores de humedad del suelo

Los sensores para determinar la humedad del suelo son uno de los recursos más utilizados en la automatización del riego. El desarrollo de estos ha permitido tener un mejor control de cuánto y cuándo regar (Bórquez-López *et al.*, 2013). De manera general, en función de del parámetro de medición utilizado, los sensores de humedad se clasifican en resistivos y capacitivos (Serna *et al.*, 2010). Otras formas de clasificarlos están en función de su material de construcción, modo de operación, método de medición, etc. A continuación se exponen los diferentes tipos de sensores de humedad del suelo actualmente empleados en los sistemas de riego.

- Capacitivos

En este tipo de sensores la permitividad eléctrica del material dieléctrico (suelo) cambia con el cambio de humedad. Dentro de los sensores capacitivos se encuentran los TDR, FDR, y los sensores DFRobot® V1.2. Estos últimos sensores se eligieron para este trabajo porque entre sus ventajas se encuentra que están fabricados en un material resistente a la corrosión, el voltaje de salida es casi lineal, proporcionan resultados estables durante un uso prolongado, puede detectar un amplio rango de humedad y su medición no es afectada por la salinidad ni temperatura del medio (DFRobot, 2020), lo que en este trabajo fue fundamental por los fertilizantes a los que estuvieron expuestos.

- Sensores TDR (Time-domain Reflectometer)

Estos sensores miden los cambios en la constante dieléctrica del suelo con un capacitor que consta de dos placas de un material conductor que están separadas por una distancia corta (menos de 1 cm). La mayoría de los materiales del suelo, tales como la arena, arcilla y material orgánico poseen una constante dieléctrica de 2 a 4, mientras que el agua tiene la constante dieléctrica más alta, que es de 78, como consecuencia, al medir los cambios en una constante dieléctrica, el contenido de agua se mide indirectamente. Estos sensores pueden usarse en una amplia gama de tipos de suelos; sin embargo, para suelos con alto contenido de arena (texturas gruesas) y suelos con altos contenidos de sal, la calibración

estándar no será exacta (Encino *et al.*, 2018). Debido a que los sustratos empleados en este proyecto son de textura gruesa, los sensores TDR no se emplearon.

- Sensores por reflectometría en el dominio de frecuencias (Frequency-domain Reflectometer o FDR)

Estos sensores se basan en la medida de la capacitancia del sistema aire – agua – suelo, que transforma los cambios de frecuencia de resonancia de un circuito en medidas volumétricas de la humedad del suelo. La sonda de capacitancia mide la constante dieléctrica del volumen de suelo usando un sensor conectado por un cable de fibra óptica a un logger. Entre sus ventajas destaca la posibilidad de obtener un registro de datos de humedad continuo a lo largo del perfil del suelo sin disturbar las propiedades del mismo. Sin embargo, estas sondas precisan de una calibración previa en suelos arcillosos o con altos contenidos de materia orgánica (Lagunas, 2013). Una de sus grandes desventajas es que sus mediciones son altamente sensibles a las propiedades del volumen de suelo (densidad aparente, granulometría, etc.) que rodea al sensor (Curto *et al.*, 2016), y en el caso de este proyecto en específico las propiedades de los sustratos empleados varían considerablemente, especialmente cuando es el resultado de mezclas.

- Resistivos

Una de las mayores ventajas de los sensores resistivos es su bajo costo, sin embargo, son sensibles a la salinidad y en general a cualquier contaminante que tenga el agua, haciendo que las lecturas de salida varíen si se usan productos solubles al agua, esta característica hizo imposible su uso en este proyecto de investigación por la necesaria adición de fertilizantes al agua de riego.

- Sensores de resistencia eléctrica o bloques de yeso

Funcionan como indicadores del potencial matricial (Bórquez-López *et al.*, 2013), y responden a los cambios de humedad del suelo de acuerdo a la profundidad en que éstos son colocados en el suelo al medir la resistencia eléctrica entre dos círculos de malla de alambre que están conectados por un material poroso. La resistencia eléctrica aumenta a medida que se incrementa la succión del agua en el suelo, o a medida que disminuye la

humedad del suelo (Encino *et al.*, 2018). Su uso práctico es limitado puesto que operan muy bien cuando la humedad disponible en el suelo es alta, pero su precisión disminuye cuando es baja (Martin, 2010), lo que es una desventaja para emplearlos en este trabajo de tesis pues es importante detectar cuando el sustrato para el cultivo de arándano tiene un bajo contenido de humedad para así poder efectuar el riego. Es sustancial considerar que algunos sustratos, como la fibra de coco, tienen una baja retención de humedad (17.4 %), lo que implica que el sustrato estará frecuentemente presentando baja humedad lo que será un indicador de necesidad de riego.

- **Sensores de matriz granular (SMG)**

Son una modificación patentada en 1985 de los bloques de yeso, por lo que son indicadores del potencial matricial (Bórquez-López *et al.*, 2013). Los sensores comerciales de este tipo más populares son los patentados Watermark®, que consisten en un par de electrodos que se encajan dentro de una matriz granular, con un yeso internamente instalado que funciona como búfer para el efecto de los niveles de salinidad que se encuentran en cultivos agrícolas de regadío. Estos sensores funcionan como una resistencia eléctrica que mide la tensión del agua del suelo (Irrometer, 2020), en un rango de 0 a 199 cb. La tensión debe ser interpretada cuidadosamente de acuerdo a las propiedades del suelo, por ejemplo, una lectura de 10 cb puede corresponder a la capacidad de campo en suelos de textura gruesa (arena), mientras que 30 cb pueden corresponder a la capacidad de campo en suelos de textura más fina (limosos, arcillosos), por esta razón es recomendable calibrar los sensores Watermark® a cada tipo específico de suelo (Encino *et al.*, 2018). Actualmente, su precio oscila los \$1,500 MNX (\$70 USD) (Irrometer, 2020). Su mayor desventaja es su falta de precisión en suelos arenosos debido a las partículas grandes (Encino *et al.*, 2018), lo que hace imposible que se empleen en este trabajo de tesis, ya que los sustratos empleados se caracterizan por su textura gruesa.

- **Tensiómetros**

El tensiómetro mide la tensión o la succión del agua del suelo. Este instrumento consiste de un tubo de plástico lleno de agua y herméticamente cerrado, equipado con un manómetro de vacío en la parte superior y una cápsula de cerámica porosa en el extremo

inferior. El límite funcional del tensiómetro es de aproximadamente 80 cb, más allá de esta tensión, el aire entra a través de la cápsula de cerámica y provoca la falla del instrumento, por lo tanto, son más prácticos cuando se tienen cultivos sensibles a la sequía (Encino *et al.*, 2018), esta característica no permite usar los tensiómetros en este proyecto, debido a la alta porosidad de los sustratos y a que el arándano es un cultivo que se caracteriza por sus bajos requerimientos hídricos.

- Sonda de neutrones

La sonda de neutrones se ha utilizado extensamente en trabajos de investigación para determinar la humedad del suelo. Esta contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos, que son aproximadamente del tamaño de un átomo de hidrógeno, un componente esencial del agua. Cuando los neutrones rápidos chocan contra los átomos de hidrógeno se vuelven más lentos, y un detector dentro de la sonda mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los neutrones lentos que regresan, con lo que se estima el contenido de la humedad en el suelo. Estas sondas son bastante caras (aproximadamente \$6,400 USD) y, debido a que contienen material radioactivo, se necesita una licencia para operarlas. Además, si el suelo tiene otras fuentes de hidrógeno que no están relacionadas con agua se genera un error (Martín, 2010), y debido a que en este proyecto de tesis se emplea fertirriego, habrá otras fuentes de hidrógeno y, por ende, variación en la sonda de neutrones haciendo inviable su uso en este caso en específico.

4.3.3 Tarjetas de desarrollo comerciales

Una tarjeta de desarrollo es una pequeña placa electrónica con circuitos impresos, fabricada para distintas aplicaciones dependiendo de las características que posea. Ofrece compatibilidad con un sin número de dispositivos, entre los cuáles están los sensores, los módulos inalámbricos con tecnologías específicas y las tarjetas de memoria micro SD, lo que hace viable su uso en diseños de redes de sensores inalámbricos de forma rápida y sencilla. Consta de E/S (entradas y salidas) análogas y digitales, puertos de conexiones, seriales, USB, plug para alimentación externa, reguladores de voltaje, indicadores de transmisión y recepción, memoria, entre otras características propias incluidas por cada

diseñador. A más de que integran un software de programación según el sistema operativo (Windows, Linux) que esté implementado dentro de la placa (Altamirano y Puente, 2016).

Dentro de las tarjetas de desarrollo más empleadas en la automatización de procesos, y que pudieron emplearse en este trabajo de investigación, se encuentran las tarjetas Arduino, Raspberry Pi y UDOO Neo, mismas que se describen a continuación.

- Arduino

Los dispositivos Arduino se basan en los microcontroladores Atmel y tienen la particularidad de enlazar lo físico con lo virtual. Se caracterizan por su factibilidad y accesibilidad, multiplataforma, entorno amigable con el usuario, y hardware y software flexible de código abierto desarrollado en java (Altamirano y Puente, 2016), lo que la hace la tarjeta de desarrollo microcontrol de mayor uso en el mundo. Varios proyectos enfocados a la automatización del riego para cultivos en suelo se han realizado con este tipo de tarjeta de desarrollo (Guijarro *et al.*, 2018; Escalas, 2014).

- Raspberry Pi

Es un ordenador de bajo costo, del tamaño de una tarjeta de crédito. Consta de una placa base sobre la que se monta un procesador, un chip gráfico y memoria RAM. Se puede considerar un ordenador completo, con la excepción de que no tiene cable de alimentación, caja ni disco duro. Se le pueden instalar diferentes sistemas operativos como Kernel de Linux, Android, Firefox OS, Raspbian, Unix. Su precio es cerca de \$ 35 USD (Escalas, 2014).

- UDOO Neo

La tarjeta UDOO Neo es una tarjeta que conjunta las mejores características de Arduino, como las entradas y salidas tanto digitales como analógicas, y de Raspberry Pi, como la posibilidad de elegir casi cualquier lenguaje de programación y ejecutar un entorno Linux completo con interfaces gráficas, y adicionalmente, incluye conexión wifi y bluetooth (Udoo, 2020). Esta tarjeta se eligió para este proyecto de investigación por poseer tales cualidades; sin embargo, es posible elegir alguna otra con características similares.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue dividido en dos fases, la primera consistente en el diseño del sistema de automatización del riego, y la segunda corresponde a la implementación y evaluación del riego automatizado en arándano cultivado en sustratos bajo condiciones de invernadero.

5.1 FASE 1: Diseño del sistema de automatización del riego

Esta fase del experimento se llevó a cabo, en su mayoría, en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, ubicado en Texcoco, Edo. de México, México. La fase incluyó:

- A) Aplicación de la técnica de programación lineal para obtener un sustrato ideal para arándano, y evaluación en laboratorio de la mezcla resultante.
- B) Caracterización física y química de los sustratos: tezontle, fibra de coco, una mezcla en volúmenes iguales de turba, perlita y fibra de coco, y la mezcla resultante al aplicar la técnica de programación lineal.
- C) Calibración de los sensores de humedad.
- D) Determinación de la posición del sensor de humedad en la maceta.
- E) Desarrollo del algoritmo de riego y su implementación en software y hardware.

5.1.1 Obtención de la mezcla de sustratos mediante programación lineal

La formulación del sustrato ideal para el cultivo de arándano a partir de tezontle y fibra de coco, se llevó a cabo en cuatro pasos. El primer paso fue determinar las propiedades físicas: espacio poroso total (Ansorena, 1994) y capacidad del aire (De Boodt *et al.*, 1974), y la propiedad química: materia orgánica por calcinación a 550 °C (Ansorena, 1994), de manera individual tanto para el tezontle como para la fibra de coco. Las metodologías empleadas se explican detalladamente en la sección 5.1.2 sobre caracterización física y química de los sustratos. Posteriormente, para formular el sustrato óptimo, el algoritmo utilizado fue el propuesto por Burés *et al.* (1998), que utiliza la programación lineal paramétrica (Ec. 1 y 2), para minimizar la función de costo del sustrato final.

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n c_j * x_j = f(x) \quad \text{Ec. (1).}$$

Dónde:

c_j = coeficiente de la variable j en la función objetivo (costo de los materiales en \$ m⁻³ o \$ kg⁻¹).

x_j = variable j (m³ o kg de sustrato).

Restricciones:

$$R_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} * x_j >, < \text{ or } = b_i \quad \text{Ec. (2).}$$

Dónde:

a_{ij} = coeficiente de la variable j en la fila i (con la unidad de la restricción).

b_i = segundo miembro de la fila i (unidad natural de la restricción por m³ de sustrato)

El segundo paso, consistió en establecer, mediante revisión de literatura, los valores de las restricciones, que corresponden a las propiedades del sustrato (EPT, CA, MO) que más favorecen al cultivo de arándano.

El método para la solución de la función objetivo fue el método Simplex Dual, mismo que puede dar como resultado valores negativos, por lo que fue necesario programar el algoritmo del método de programación lineal, siendo este el tercer paso. Para la programación del algoritmo se empleó el sistema de cómputo numérico MATLAB (MATLAB, 2016), ya que es un software que, además, de tener un lenguaje de programación propio también ofrece un entorno de desarrollo integrado y amigable.

Una vez obtenida la mezcla empleando el algoritmo, se procedió a realizar el cuarto paso, consistente en la elaboración, y evaluación de la mezcla, para lo cual se midió en laboratorio el EPT (Ansorena, 1994), la CA (De Boodt *et al.*, 1974), y la MO (Ansorena,

1994) de la mezcla resultante, empleando las metodologías explicadas a detalle en el tema 5.1.2 de caracterización de sustratos.

El objetivo de esta parte del trabajo fue formular, mediante programación lineal, un sustrato óptimo para el cultivo de arándanos, es decir, que cumpla con los requerimientos óptimos de EPT, CA y MO, minimizando el costo de producción del mismo. Para evaluar la efectividad del método se evaluaron las propiedades (EPT, CA y MO) de la mezcla resultante y los resultados se analizaron mediante un análisis estadístico de comparación de medias independientes.

5.1.2 Caracterización física y química de los sustratos

Esta parte de la metodología se emplea en el primer y último paso del tema anterior (tema 5.1.1), sobre la obtención de la mezcla ideal para el cultivo de arándano. Sin embargo, en ese tema solo se hace mención y no se explica cómo realizar la caracterización de los sustratos. Se presenta más explícitamente en este tema con la intención de que en el tema 6 se puedan mostrar y analizar, en conjunto, los resultados de los pasos 1 y 4 del tema anterior, y además, se puedan comparar con la caracterización de los otros sustratos.

Se determinaron las características físicas y químicas de los cuatro sustratos empleados. El sustrato A correspondió a fibra de coco procedente de Pinotepa Nacional, Oaxaca, en pacas de 200 L con una compresión de 2:1 (el volumen original es reducido a la mitad), una conductividad eléctrica (CE) de 1.4 dS m^{-1} y un pH de 5.9, por lo que previo a la caracterización se lavó con agua acidulada (pH = 4.5) con ácido sulfúrico hasta que la fibra alcanzó una CE de 0.27 dS m^{-1} y un pH de 4.9; el sustrato B fue una piedra volcánica conocida como tezontle proveniente de una mina de Texcoco, Edo. de México; el sustrato C fue una mezcla en volúmenes iguales de fibra de coco, perlita y turba (A + perlita y turba, 1:1:1), conocida como mezcla holandesa. La perlita empleada fue de la marca mexicana Agrolita® en presentación de 100 L, y la turba fue canadiense de la marca Promix FLX® en presentación comprimida de 107 L. Finalmente, el sustrato D correspondió a una mezcla de los sustratos A y B, obtenida mediante la técnica de

programación lineal explicada en el tema 5.1.1. La fibra de coco empleada en los sustratos C y D se tomó de la misma paca del sustrato A una vez lavado.

La caracterización incluyó granulometría, porosidad, curva de liberación de agua, densidad aparente, CE, pH y MO. El objetivo de realizar la caracterización, además de obtener información útil para la obtención de mezclas y la calibración de los sensores, fue encontrar que sustrato tiene las propiedades más cercanas al óptimo para el cultivo de arándano. El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones, la normalidad se verificó con la prueba de Shapiro-Wilks, la homogeneidad de varianzas con la prueba de Bartlett, y la comparación de medias se hizo mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), con el programa estadístico SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2002).

5.1.1.1 Granulometría

Se empleó la metodología presentada por Martínez (1993), por lo que, de cada sustrato, previamente secado en estufa a 35 °C hasta alcanzar peso constante, se pesaron 100 gramos y se agitaron durante 5 minutos en una tamizadora Tyler Ro-Tap® con una batería de tamices de acero inoxidable de 0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 3.36, 4.76 y 6.36 mm, operando a máxima amplitud. Posteriormente, el contenido de cada tamiz y del colector del fondo se pesó en una balanza Mettler PC 2000®. El peso del sustrato se expresó en porcentaje con relación al peso inicial, para posteriormente determinarse el índice de grosor (IG), como porcentaje en peso de partículas con diámetro mayor a 1 mm (Richards *et al.*, 1986).

5.1.1.2 Porosidad

La porosidad total se obtuvo por el método de Ansorena (1994). Luego de saturar el sustrato en agua por 24 h, se colocó en un porómetro, de peso y volumen conocido (Vc) cuyos orificios se mantuvieron sellados, y se midió el peso del sustrato saturado (Pssat) en una balanza. Posteriormente, se retiró el sello de los porómetros y se dejó drenar el agua libremente por 3 horas, se midió el peso del sustrato drenado (Psd), para después

secarse en estufa a 75 °C hasta alcanzar peso constante y se obtuvo el peso del sustrato seco (Pss). Finalmente se aplicaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Porosidad} = \frac{P_{\text{ssat}} - P_{\text{ss}}}{V_c * D_a} \quad \text{Ec. (3)}$$

Dónde:

Porosidad = Porosidad total del sustrato, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

P_{ssat} = Peso del sustrato saturado, g.

P_{ss} = Peso del sustrato seco, g.

V_c = Volumen del cilindro, cm^3 .

D_a = Densidad del agua, 1 g cm^{-3} .

La porosidad de aireación se obtuvo mediante la fórmula presentada por Piere y Pereira (2003).

$$\text{Porosidad de aireación (\%)} = \frac{P_{\text{ssat}} - P_{\text{sd}}}{V_c * D_a} * 100 \quad \text{Ec. (4)}$$

Dónde:

P_{ssat} = Peso del sustrato saturado, g.

P_{sd} = Peso del sustrato drenado, g.

V_c = Volumen del porómetro o cilindro, cm^3 .

D_a = Densidad del agua, 1 g cm^{-3} .

La porosidad de retención de agua, se consideró como la diferencia de la porosidad total y la porosidad de aireación.

5.1.1.3 Curva de liberación de agua

Para obtener la curva de liberación de agua se empleó la metodología propuesta por De Boodt *et al.* (1974) que consiste en colocar el sustrato previamente saturado en agua en embudos bajo presión de succión. Además, se incluyeron las modificaciones de Martínez

(1993) que incluyen capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua total disponible (ATD) y agua difícilmente disponible (ADD).

5.1.1.4 Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente se empleó la metodología propuesta por Ansorena (1994). El sustrato se saturó en agua por 24 horas, para luego colocarse en un porómetro, de peso y volumen conocido (V_c) cuyos orificios se mantuvieron sellados para medir el peso del sustrato saturado (P_{ssat}) en una balanza. Posteriormente, se retiró el sello del porómetro y se dejó drenar el agua libremente por 3 horas, se puso a secar en estufa a 75 °C hasta alcanzar peso constante y se obtuvo su peso seco (P_{ss}). Finalmente, se aplicó la fórmula presentada por Piere y Pereira (2003).

$$\text{Densidad aparente (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{P_{ss}}{V_c} * 100 \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

P_{ss} = Peso del sustrato seco, g.

V_c = Volumen del porómetro o cilindro, cm^3 .

5.1.1.5 Conductividad eléctrica

Se determinó empleando el método de extracto de saturación (Warncke, 1986), agua-sustrato de relación 1:1 en base a volumen, con un conductímetro marca Conductronic® modelo CL35.

5.1.1.6 pH

Se determinó empleando el método de Warncke (1986), en una suspensión agua-sustrato de relación 1:1 en base a volumen, con un electrodo de vidrio de un potenciómetro marca Conductronic® modelo PC45 con compensación automática a la temperatura.

5.1.1.7 Materia orgánica

Se obtuvo por el método de calcinación a 550 °C (Ansorena, 1994).

5.1.3 Calibración de los sensores de humedad

La calibración consistió en relacionar el contenido de humedad de cada uno de los cuatro sustratos con la señal del sensor de humedad. Se utilizaron sensores de humedad del suelo tipo capacitivo, con baja sensibilidad a la conductividad eléctrica para evitar cualquier efecto en la medición cuando se usen fertilizantes en el riego. Las especificaciones del sensor se muestran en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Especificaciones del sensor de humedad.

Nombre	Sensor de humedad del suelo tipo capacitivo DFRobot®
Versión	V 1.2
Voltaje operativo	3.3 – 5.5 V DC
Voltaje de salida	0 – 3 V DC
Dimensiones	98 x 23 mm
Peso	15 g
Rango de valores	Seco: 1023; húmedo: 0
Definición de pin	Salida análoga
Software	Arduino IDE
Otros	Recubierto con material anticorrosivo

Los sensores transmiten lecturas de tensión (en voltios). Cuando el sensor está completamente húmedo el valor transmitido es de 3.3 voltios, y cuando el sensor está en contacto con un ambiente completamente seco su valor es de 5.0 voltios. Las lecturas de tensión son valores análogos, que mediante un conversor (ADC) se vuelven valores digitales, que es el lenguaje de las computadoras. Dado que la resolución de la tarjeta de desarrollo empleada para coleccionar los valores enviados por el sensor es de 10 bits, cuando el voltaje detectado por el sensor es 3.3 v (humedad del 100%) se representa en sistema binario como B0000000000, y cuando el voltaje es de 5.0 v (humedad del 0%) en sistema binario se representa como B1111111111. Es sistema binario es útil para el procesamiento de datos en computadas. Finalmente, es posible pasar del sistema numérico binario al sistema decimal para hacerlo más entendible e interpretarlo, de esa manera el valor

B0000000000, en sistema decimal es cero, y el valor B1111111111 es 1023. Por lo que el rango de lecturas obtenidas por los sensores estará entre 0 cuando el sensor este sumergido en agua, y de 1023 cuando este en un ambiente totalmente seco.

Para realizar la calibración se puso en práctica la metodología propuesta por De Boodt *et al.* (1974), para obtener muestras de sustrato en los diferentes niveles de humedad que hay en la curva de liberación de agua cuando el sustrato es sometido a presiones de 0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua. Se tomaron muestras del sustrato cuando se estabilizó su contenido de humedad en cada punto de medición de la curva de liberación de agua. Posteriormente, cada muestra se pesó en una balanza Metter PC 2000®, se colocó el sensor de humedad y se registró el valor de la señal.

Al concluir la medición con los sensores cada muestra se secó en estufa a 75 °C hasta alcanzar peso constante, mismo que se midió con la balanza Metter PC 2000®. Por diferencia de pesos se conoció el contenido de humedad de la muestra de sustrato, de manera de que obtuvo la señal del sensor correspondiente a diferentes contenidos de humedad de los cuatro sustratos.

El diseño experimental fue completamente aleatorizado y se realizó de manera independiente por cada tipo de sustrato, por lo que el único factor correspondió al contenido de humedad en el sustrato. Por cada tratamiento se realizaron tres repeticiones, la normalidad se verificó con las pruebas de Shapiro-Wilks, la homogeneidad de varianzas con la prueba de Bartlett, y la comparación de medias se hizo mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), con el programa estadístico SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2002).

5.1.4 Determinación de la posición del sensor en la maceta

La estrategia para definir la posición más favorable del sensor en la maceta fue graficar la distribución del agua en cada sustrato, para lo cual se diseñó y elaboró una maceta con 27 sensores, distribuidos en 3 capas. Los primeros 9 sensores se colocaron a 5 cm de la superficie de la maceta (sensores superiores), 9 más a 15 cm (sensores medios), y los

últimos 9 a 25 cm (sensores inferiores). Los 9 sensores que se colocaron por cada capa se distribuyeron en 3 hileras, quedando 3 sensores a 5 cm de lado derecho de la maceta (hilera 1), 3 sensores más en medio (hilera 2), y los últimos 3 sensores a 5 cm del lado izquierdo de la maceta (hilera 3). La distribución de los sensores se hizo pensando en garantizar amplia cobertura en la maceta. Las dimensiones de la maceta fueron de 28.5 x 23 x 30 cm, de largo, ancho y altura, respectivamente.

Una vez colocados los 27 sensores en la maceta, cada sensor se conectó a un amplificador de señal, y posteriormente a una tarjeta de desarrollo UDOO NEO, a donde los sensores emitían las señales correspondientes al contenido de humedad.

La maceta se llenó con cada uno de los sustratos. El riego se realizó en un lapso de 20 minutos con un gotero de 4 L h⁻¹, bajo 3 casos diferentes, en el primer caso el gotero se conectó a una estaca en el centro de la maceta, en el segundo caso el gotero se conectó a dos estacas, distribuidas de manera uniforme, y en el tercer caso se conectó a 4 estacas, distribuidas uniformemente. En cada uno de los casos, el riego se realizó en lapsos de 20 minutos y con el sustrato inicialmente seco.

Además de registrar la distribución del agua mediante la señal de los sensores, esta se corroboró midiendo el contenido de humedad, para lo que se tomó una muestra del sustrato al concluir los 20 minutos de riego en cada punto de la maceta donde se colocaron los sensores. Dichas muestras del sustrato húmedo se pesaron en una balanza Metter PC 2000®, y se secaron en estufa a 75 °C hasta alcanzar peso constante. Por diferencia de pesos se conoció el contenido de humedad de las muestras de sustrato (Ec. 6), misma que se expresó como humedad volumétrica (Ec. 7).

$$\% \text{ humedad gravimétrica} = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100 \quad \text{Ec. (6)}$$

Dónde:

P_{sh} = peso del sustrato húmedo, g.

P_{ss} = peso del sustrato seco, g.

$$\% \text{ humedad volumétrica} = \% \text{ humedad gravimétrica} * Da \quad \text{Ec. (7)}$$

Dónde:

Da = densidad del sustrato, g cm^{-3}

Una vez que se corroboró que tanto los sensores como el contenido de humedad coincidían con la calibración realizada en el tema anterior, se graficó la distribución del agua con el software Surfer® 16 (Golden Software, LLC), y se eligió el punto que se consideró el más óptimo para la colocación del sensor.

5.1.5 Desarrollo del algoritmo de riego e implementación en software y hardware

Una vez calibrado el sensor de humedad, y determinada la posición en la que debería colocarse el sensor en el sustrato, se generó el algoritmo de riego, que consistió en programar cuánto y cuándo regar, y en este caso estuvo determinado por el contenido de humedad en cada sustrato. A partir de la calibración se definieron dos límites de riego, un límite de humedad mínimo que inicia el riego (encendido) correspondiente a la señal del sensor cuando el contenido de humedad de cada sustrato se encuentra en el punto de 50 cm de columna de agua de la curva de liberación de agua, y un límite máximo que lo detiene (apagado), correspondiente a la señal del sensor con el contenido de humedad del sustrato a 10 cm de columna de agua.

Para la implementación del software y hardware, se buscó una tarjeta de desarrollo (UDOO Neo) que se adaptara al tipo de señal enviada por los sensores y se implementó un sistema embebido para su control.

5.2 FASE 2: Implementación y evaluación del riego automatizado en arándano bajo condiciones de invernadero

La fase 2 del experimento consistió en implementar y evaluar la efectividad del algoritmo diseñado. Con la intención de comparar el riego automatizado con el riego tradicional, se

calculó el requerimiento de riego del arándano mediante un método indirecto, al que se denominó riego estimado (A1). Posteriormente, se estableció un experimento completamente aleatorizado con un arreglo factorial bajo condiciones de invernadero, el día 4 de agosto de 2018. Finalmente, se evaluó la condición de las plantas mediante un medidor de clorofila SPAD-502, el día 5 de enero de 2019.

5.2.1. Estimación del riego mediante un método indirecto

El requerimiento de riego total (R_t), incluye dos componentes, el requerimiento de riego neto y la eficiencia de aplicación del riego (E_a), tal y como se expresa en la Ec. (8).

$$R_t = \frac{R_n}{E_a} \quad \text{Ec. (8)}$$

Dónde:

- R_t = requerimiento de riego total (L).
- R_n = requerimiento de riego neto (L)
- E_a = eficiencia de aplicación del riego (%)

En este trabajo por tratarse de riego por goteo se considera una E_a del 80 %. Cuando los cultivos están en invernadero, el requerimiento neto de los cultivos se considera igual a la evapotranspiración del cultivo (Ec. 9).

$$R_n = Etc \quad \text{Ec. (9)}$$

Dónde:

- R_n = requerimiento de riego neto (L).
- Etc = evapotranspiración de cultivo (L).

Para calcular la evapotranspiración de cultivo (Etc) es preciso primero estimar la evapotranspiración de referencia (Eto), la cual en este trabajo se estimó mediante el método FAO56-Penman-Monteith (Ec. 10), con base en los registros históricos de 1982 a 2015 de la estación agrometeorológica Montecillo, ubicada en Montecillo, Texcoco, Estado de México; con coordenadas 19° 27' 38" latitud N, y 98° 54' 01" longitud W, a una altitud de 2250 m.

$$Eto = \frac{1}{\lambda} * \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad \text{Ec. (10)}$$

Dónde:

- Eto = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).
- λ = calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹).
- Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹).
- G = flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹).
- ρ_a = densidad media del aire a presión constante (kg m⁻³).
- c_p = calor específico a presión constante (MJ kg⁻¹ °C⁻¹).
- e_s = presión de vapor de saturación (kPa).
- e_a = presión real de vapor (kPa).
- r_a = resistencia aerodinámica (s m⁻¹).
- r_s = resistencia superficial (s m⁻¹).
- γ = constante psicométrica (kPa °C⁻¹).

Posteriormente, es considerado un coeficiente de cultivo (Kc). Por tratarse de un frutal, debe tomarse en cuenta el área de sombreado generada por el cultivo, mediante un factor de corrección (Fc) (Ec. 11). En este trabajo se considera que por estar cultivados en macetas relativamente pequeñas toda la superficie quedará sombreada (Fc =1).

$$Etc = Eto * Kc * Fc \quad \text{Ec. (11)}$$

Dónde:

Etc = evapotranspiración de cultivo (mm día⁻¹).

Eto = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

Kc = coeficiente de cultivo.

Fc = factor de corrección = $A' + 0.15 (1 - A')$.

A' = fracción de área sombreada.

Finalmente, el tiempo de riego se calcula a partir del requerimiento de riego y el caudal del gotero empleado (Ec. 12).

$$Tr = \frac{Rt}{Qe * Ne} \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde:

Tr = tiempo de riego (horas).

Rt = requerimiento de riego (L).

Qe = gasto del emisor (L hora⁻¹)

Ne = número de emisores

5.2.2. Establecimiento del experimento

Esta parte del experimento se llevó a cabo en una superficie de aproximadamente 28 m², dentro de un invernadero dos aguas, con cubierta de plástico, dentro de las instalaciones del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Campus Montecillo, en Texcoco de Mora, Edo. de México, México, ubicado en latitud 19° 27' N y longitud 98° 54' W, con una altitud de 2250 m. Los principales materiales requeridos fueron plantas de arándano variedad “Victoria HT” de la Universidad de Georgia colocadas en sustratos: fibra de coco, tezontle, una mezcla en volúmenes iguales de fibra de coco, agrolita y turba, conocida como mezcla holandesa, y la mezcla resultante de programación lineal.

El 4 de agosto de 2018 se estableció el experimento aplicando un diseño experimental completamente aleatorizado con arreglo factorial, donde los factores a evaluar fueron el tipo de riego (A1: riego estimado; A2: riego automatizado), y el tipo de sustrato (B1: fibra de coco; B2: tezontle; B3: mezcla holandesa; B4: mezcla resultante de programación lineal). Las unidades experimentales fueron macetas con una planta de arándano y se realizaron 6 repeticiones, dando un total de 48 unidades experimentales. El riego estimado (A1) fue controlado mediante un reloj electrónico (“timer”) encargado de activar la bomba para iniciar y detener el riego en lapsos de tiempo previamente programados, mientras que el riego automatizado (A2) fue controlado mediante el sistema electrónico embebido, considerando la humedad presente en el sustrato y enviando señales de activación y desactivación del riego.

5.2.3 Evaluación

Para evaluar la eficiencia del sistema automatizado propuesto, el 5 de enero de 2019 se realizaron mediciones empleando un dispositivo portátil SPAD-502 Minolta[®], equipo que mide la intensidad del color verde. En cada planta, se midió una hoja madura en la parte central. Se tomaron cuatro lecturas SPAD de cada muestra de hoja y se registró el promedio de las lecturas.

Los datos se analizaron de acuerdo al diseño experimental establecido de 2 factores en un diseño completamente aleatorizado, donde los tratamientos a evaluar fueron la combinación del tipo de riego (A1: riego estimado; A2: riego automatizado), y tipo de sustrato (B1: fibra de coco; B2: tezontle; B3: mezcla holandesa; B4: mezcla resultante de programación lineal), resultando 8 tratamientos: A1B1, A1B2, A1B3, A1B4, A2B1, A2B2, A2B3 y A2B4. Las unidades experimentales fueron macetas con una planta de arándano y se realizaron 6 repeticiones, dando un total de 48 unidades experimentales. La normalidad se verificó con la prueba de Shapiro-Wilks, la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene, y la comparación de medias se realizó con la prueba Tukey ($P \leq 0.05$) empleando los programas estadísticos SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2002) y Minitab[®] 18.1 (Minitab, 2017).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al aplicar la metodología expuesta en el Capítulo 5. Los resultados se presentan divididos en dos partes, la primera correspondiente a la fase de diseño del sistema de automatización del riego, y la segunda fase correspondiente a la implementación y evaluación del sistema aplicado al riego de arándano cultivado en sustratos bajo condiciones de invernadero.

6.1 FASE 1: Diseño del sistema de automatización del riego

Los resultados del diseño del sistema de automatización del riego incluyen la caracterización de los sustratos empleados, misma que sirvió tanto para definir el riego en los sustratos como para obtener una mezcla cercana al requerimiento óptimo del arándano, es decir, que cubriera la porosidad, aireación y materia orgánica específicos para el cultivo de arándano. Además, incluye los resultados de la calibración de los sensores y el desarrollo del algoritmo de control del riego.

6.1.1 Obtención de la mezcla de sustratos mediante programación lineal

El primer paso consistió en determinar las propiedades físicas (EPT, CA) y químicas (MO) de los sustratos individuales que se emplearan en la mezcla. Los resultados de la determinación de dichas propiedades de cada material se muestran en el Cuadro 6.1.

Cuadro 6.1. Espacio poroso total (EPT), capacidad del aire (CA) y materia orgánica (MO) de la fibra de coco y roca volcánica (tezontle).

Material	EPT (%)	CA (%)	MO (%)
Fibra de coco (A)	97	70	91.8
Tezontle (B)	57	24	0.0

La fibra de coco (A), tiene los mayores valores de EPT y CA, lo que es favorable para el arándano debido a su sistema radical, delgado, fibroso (Malik y Cawthon, 1998) y con finas raíces que pueden llegar a considerarse pelos radicales (Baba *et al.*, 2018), y debido

a que los valores altos, tanto de la capacidad de aireación (Muñoz *et al.*, 1993) como de la porosidad total, son los que favorecen el crecimiento de arándanos en contenedores (Zarate *et al.*, 2017). En el caso de la MO, la fibra de coco (A) es el único que cumple con el requerimiento del arándano, lo que es importante para el desarrollo de la planta. El tezontle (B) tiene los valores menores de EPT y CA, aunque estos valores sean más grandes que los reportados en otro estudio, 37 y 9.7 %, respectivamente (Zamora *et al.*, 2005).

En general, para cumplir con el suministro de agua y aire, los sustratos deben poseer una elevada porosidad (más del 85 %) y capacidad de retención de agua, aunado a un drenaje rápido y una buena aireación (entre 10 y 30 %) (Ansorena, 1994); por lo que, es común que en programación lineal se usen valores similares a esos (Burés *et al.*, 1988; Cruz *et al.*, 2010; Zamora *et al.*, 2005).

En el caso específico del arándano parece acertado emplear valores cercanos a los anteriormente mencionados para encontrar un sustrato óptimo, debido a que el crecimiento de arándanos en contenedores es favorecido con valores altos de porosidad total (78-86 %), capacidad de aireación (20 - 33 %) (Zarate *et al.*, 2017), y materia orgánica (2-5 %) (Zhao-Shen y Xiao-Chum, 2009). En base a esos estudios previos, que presentan los rangos favorecedores para el arándano, el segundo paso consistió en establecer las restricciones como: espacio poroso total (EPT) ≥ 85 ; capacidad de aireación (CA) ≥ 30 ; y materia orgánica (MO) ≥ 3 .

El tercer paso fue programar el algoritmo del método Simplex Dual, en el software MATLAB. Los resultados del Cuadro 6.1, los valores para las restricciones presentados anteriormente y el costo de los sustratos individuales, que fue de \$1.20 MXN para la fibra de coco y de \$0.50 MXN para tezontle, fueron las variables del método. En la Figura 6.1, se muestra la interfaz en MATLAB® del método Simplex Dual.

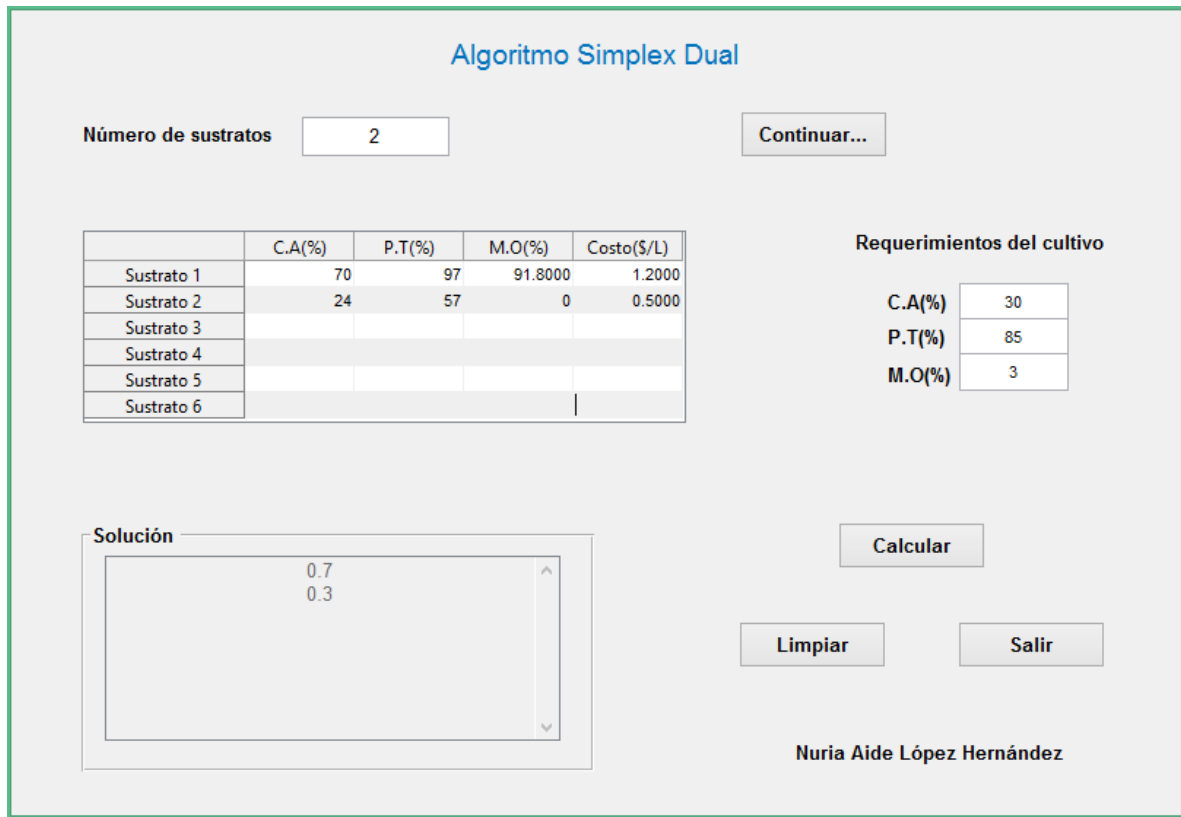


Figura 6.1. Interfaz en MATLAB® del algoritmo del método Simplex Dual.

Como se puede apreciar en la esquina inferior izquierda, en el recuadro de Solución, de la Figura 6.1, el resultado fue una mezcla compuesta por 70 % de fibra de coco y 30 % de roca volcánica (70 % A + 30 % B).

El cuarto paso fue la evaluación en laboratorio de la mezcla resultante, para corroborar que las propiedades del sustrato propuestas como restricciones en el método de programación se cumplieran en realidad en la mezcla obtenida. En el Cuadro 6.2 se muestran los resultados de la determinación de las propiedades EPT, CA y MO de la mezcla, y la comparación con las restricciones, mismas que corresponden a los valores de las propiedades del sustrato ideal para el cultivo de arándano.

Cuadro 6.2. Espacio poroso total (EPT), capacidad del aire (CA) y materia orgánica (MO) de las restricciones y del sustrato formulado.

Variable	Restricciones	Sustrato formulado
EPT (%)	≥ 85	84
CA (%)	≥ 30	50
MO (%)	≥ 3	44

El único valor que no cumple con las restricciones es el EPT porque es menor que el valor requerido, pero según la comparación estadística de dos muestras independientes con $\alpha = 0.05$, no es una diferencia estadísticamente significativa. La mezcla cumple con los requisitos del arándano indicados por otros autores (Sumedrea *et al.*, 2016; Zarate *et al.*, 2017; Zhao-Shen y Xiao-Chum, 2009), por lo que el método de programación lineal resultó útil para formular el sustrato, lo que coincide con lo informado por otros autores (Burés *et al.*, 1988; Zamora *et al.*, 2005; Cruz *et al.*, 2010).

6.1.2 Caracterización física y química de los sustratos

La caracterización física incluyó granulometría, porosidad, densidad aparente y curva de liberación de agua. La caracterización química incluyó CE, pH, MO,

En el Cuadro 6.3 se muestra que hay diferencias estadísticas entre la granulometría de los sustratos, lo que indica que la distribución y dimensión de sus partículas es diferente para cada uno. Sin embargo, el IG y el diámetro medio de partícula indican una condición estadísticamente igual entre la fibra de coco (A), el tezontle (B) y el sustrato D (70% A + 30% B); lo que, se refleja en la distribución de la humedad, dado que hay reportes de que la retención de agua y capacidad de aireación de los sustratos es función del tamaño de sus partículas (Martínez y Roca, 2011; Vargas-Tapia *et al.*, 2008).

El sustrato C (A + perlita y tuba, en volúmenes 1:1:1), presentó el mayor IG, lo que indica que está conformado en su mayoría por partículas superiores a 1 mm, caso contrario del sustrato B (tezontle). Con base en estos resultados se infiere que el sustrato C es el más

favorable para el arándano, ya que este cultivo prefiere, e incluso crece de manera natural, en suelos arenosos (Pauluiski, 2014), condición similar que ofrecen los sustratos con partículas superiores a 0.9 mm (Martínez y Roca, 2011).

Cuadro 6.3. Análisis granulométrico, índice de grosor (IG) y diámetro medio de partícula (Dm) de sustratos.

Sustrato	Diámetro de partícula								IG ^{††}	Dm
	< 0.25	(0.25 - 0.50]	(0.50 - 1.00]	(1.00 - 2.00]	(2.00 - 3.36]	(3.36 - 4.76]	(4.76 - 6.36]	> 6.36		
	% en peso								%	
A [†]	10.7b	1.9c	15.3a	7.2b	7.8c	8.4d	3.2c	45.6a	24.3b	4.2a
B	10.5b	0.4c	9.1c	7.4b	12.4b	16.9b	7.2a	36.0b	19.6b	4.2a
C	14.6a	11.0a	13.4b	23.3a	17.1a	12.1c	1.4c	6.9c	51.0a	2.0b
D	5.9c	5.0b	5.9d	10.5b	12.4b	21.1a	7.9a	31.2b	23.3b	4.1a
DSH	2.428	1.572	1.741	3.422	2.006	2.767	1.219	7.142	7.252	0.399

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). [†]A: fibra de coco; B: tezontle; C: A + perlita y turba, en volúmenes 1:1:1; D: 70 % A + 30 % B; ^{††}IG: índice de grosor; Dm: Diámetro medio de partícula.

La caracterización física también incluyó la determinación de la porosidad, y los resultados se presentan en el Cuadro 6.4, en donde se muestra que el sustrato A (fibra de coco) es el que tiene el mayor porcentaje de poros, siendo estos, en su mayoría, parte de la porosidad de aireación, convirtiéndolo en un buen sustrato para el arándano pues debido a su sistema radicular fibroso, fino, poco profundo, requiere medios porosos y bien drenados (Malik y Cawthon, 1998). Tal como lo demuestran, quienes encontraron que sustratos a base de corteza de pino con altos valores de porosidad total son los que más favorecen al crecimiento de arándano en contenedores (Zarate *et al.*, 2017).

Cuadro 6.4. Caracterización física de sustratos.

Sustrato	PT [†]	PA	PRH	Da
	%	%	%	g cm ⁻³
Fibra de coco (A)	96.3a	78.9a	17.4c	0.04c
Tezontle (B)	57.2c	30.8c	26.4b	1.17a
A + perlita y turba (1:1:1)	80.9b	27.4c	53.6a	0.11c
70 % A + 30 % B	80.4b	54.7b	25.7b	0.44b
DSH	6.3187	7.2974	4.11	0.1102

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). [†] PT: porosidad total; PA: porosidad de aireación; PRH: porosidad de retención de humedad; Da: densidad aparente.

El caso contrario es el sustrato B (tezontle), que cuenta con el menor número de poros; sin embargo, tiene a su favor un mayor equilibrio entre la porosidad de aireación y de retención de humedad, lo que puede llegar a favorecer al cultivo de arándano, situación semejante al sustrato D (70 % A + 30 % B), pues cuenta con una capacidad de retención de humedad e incluso una mayor porosidad total, por lo que se sugiere permitiría un buen desarrollo al cultivo. En el sustrato C (A + perlita y turba, en volúmenes 1:1:1) se observa que predomina la porosidad de retención de agua. Previamente se ha demostrado que en sustratos para arándano Northblue la perlita incrementa la porosidad de aireación, mientras que la turba incrementa la capacidad de retención de agua (Zhao-Sen y Xiao-Chun, 2009), por lo que en este caso se considera que la mezcla de perlita y turba favorece el equilibrio entre drenaje y retención de humedad.

En general, en este estudio se encontró que, en lo que respecta a porosidad, los cuatro sustratos son recomendados para el cultivo de arándano, pues para su óptimo desarrollo se requiere que el sustrato tenga una porosidad total mínima de 40 % (Cruzat y Mancilla, 2010), y una porosidad de retención de agua mayor del 25 % (Zhao-Sen y Xiao-Chun, 2009).

Los valores óptimos de densidad aparente se considera que deben ser inferiores a 0.4 g cm^{-3} . Esto es importante a los efectos del transporte y la manipulación y también de la estabilidad de las plantas ante el viento en los viveros (Martínez y Roca, 2011). En el caso de los sustratos caracterizados, el sustrato B (tezontle) es de mayor densidad y el único que excede el valor recomendado; sin embargo, es posible compensar su alta densidad con su precio económico si se está cerca del lugar de origen del material. El resto de los sustratos cumplen con el valor óptimo.

Finalmente, como parte de la caracterización física el comportamiento de sus curvas características de humedad (Figura 6.2), indican características similares en los cuatro sustratos, en cuanto a la aireación y la retención de la humedad.

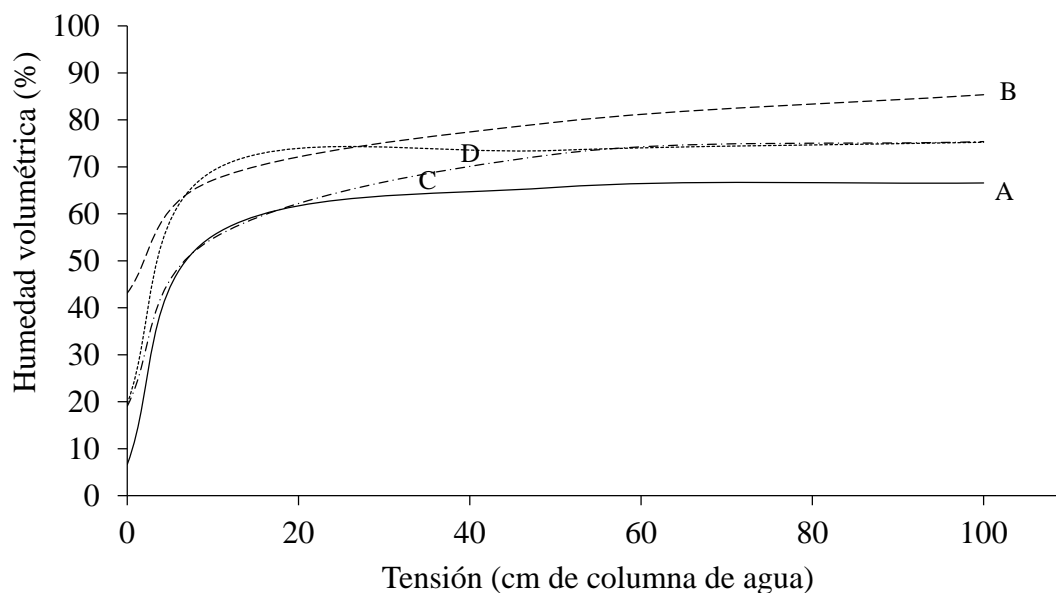


Figura 6.2. Curvas características de humedad de los sustratos A: fibra de coco; B: tezontle; C: mezcla en volúmenes iguales de fibra de coco, perlita y tuba; D: mezcla formada por 70 % fibra de coco y 30 % tezontle con base en volumen.

El agua fácilmente disponible para las plantas se maneja entre los 10 y los 50 cm de columna de agua (De Boodt *et al.*, 1974). Se considera óptimo un intervalo de valores de agua fácilmente disponible entre 20 y 30 % (Martínez y Roca, 2011), y en el caso de los 4 sustratos tienen una capacidad de contener agua fácilmente disponible de aproximadamente el 10 % respecto a volumen, lo que indica que en todos es importante hacer un buen manejo de riego, para que los 4 sustratos sean aptos para el cultivo de arándano.

En el Cuadro 6.5 se muestran los resultados de la caracterización química que incluye conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.

Cuadro 6.5. Caracterización química de sustratos.

Sustrato	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	pH	Materia orgánica (%)
Fibra de coco (A)	0.27ab	4.86c	94a
Tezontle (B)	0.15c	7.75a [†]	0c
A + perlita y turba (1:1:1)	0.32a	5.08c	48b
70 % A + 30 % B	0.20bc	6.67b	44b
DSH	0.089	0.2457	7.1208

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). [†]El tezontle es un material prácticamente inerte por lo que el pH determinado corresponde al del agua empleada en el método de determinación.

Considerando la conductividad eléctrica (CE) de los sustratos analizados se sugiere que, a pesar de que existen diferencias estadísticas significativas entre ellos, todos son buena opción para el cultivo de arándano, dado que su CE oscila entre 0.20 y 0.32 dS m⁻¹, valores que permiten manejar la CE requerida por el cultivo, siendo esta de 1.5 dS m⁻¹ para el cv. rabbiteye (Patten *et al.*, 1989) y no mayor a 2 dS m⁻¹ para arándanos tipo highbush (Machado *et al.*, 2014). Es necesario considerar que la CE del sustrato es importante ya que se ha comprobado que el medio salino disminuye el crecimiento (biomasa seca total),

debido a la pérdida de turgencia, del arándano cv. Biloxi (Salgado *et al.*, 2018) y del tipo highbush (Bryla y Machado, 2011).

En el caso del pH, en este estudio se encontró que, tanto el sustrato A (fibra de coco lavada y acidulada), como el sustrato C (A+ perlita y turba, en volúmenes 1:1:1), se encuentran dentro del rango de pH óptimo para el cultivo de arándano, que de acuerdo con Cruzat y Mancilla (2010) está entre 4 y 5.6, aunque puede desarrollarse de manera óptima con pH de 6 en algunos casos. Queda claro que el arándano prefiere sustratos con pH bajo (Black y Zimmerman, 2002), por lo que han llegado a indicar que la turba (pH 3.5-4.0) es el mejor medio de crecimiento para este cultivo (Ochmian *et al.*, 2015). Sin embargo, en este estudio se sugiere que bastaría con acidular el sustrato a emplear para eliminar la limitación de pH, tal como sería necesario en el caso de los sustratos B (tezontle) y D (70 % A + 30 % B).

Respecto al contenido de materia orgánica (MO) de los sustratos caracterizados en este trabajo, a excepción del sustrato B (tezontle), la mayoría cumplen el requerimiento mínimo que necesita el arándano, de al menos 5 % (Cruzat y Mancilla, 2010). Estudios demuestran que la incorporación de MO favorece al crecimiento de las plantas de arándano (Sciarappa *et al.*, 2017).

6.1.3 Calibración de los sensores de humedad

En el Cuadro 6.6 se muestran los resultados de la calibración, que en los cuatro sustratos el sensor es capaz de detectar y registrar la variación en el contenido de humedad que existe bajo la tensión de 0, 10 y 50 o 100 cm de columna de agua; sin embargo, la señal no varía de manera estadísticamente significativa entre los 50 y 100 cm de columna de agua, lo que para fines prácticos de este trabajo no es relevante, dado que los límites de riego están definidos por las señales producidas a 10 cm y 50 cm de columna de agua.

Cuadro 6.6. Señales del sensor a diferentes contenidos de humedad en cada sustrato.

Sustrato	Señal a diferentes contenidos de humedad				
	0 cm c.a.	10 cm c.a.	50 cm c.a.	100 cm c.a.	DSH
Fibra de coco (A)	411c	503b	525a	531a	18.005
Tezontle (B)	255c	329b	478a	502a	33.022
A + perlita y turba (1:1:1)	264c	331b	472a	498a	32.84
70 % A + 30 % B	327c	667b	848a	974a	188.92

En la Figura 6.3 se muestra el comportamiento de las señales del sensor en el sustrato A (fibra de coco). De acuerdo a ese comportamiento, el límite de inicio de riego se estableció cuando la señal registrada es de 525, y el límite para detener el riego es cuando la señal es de 500.

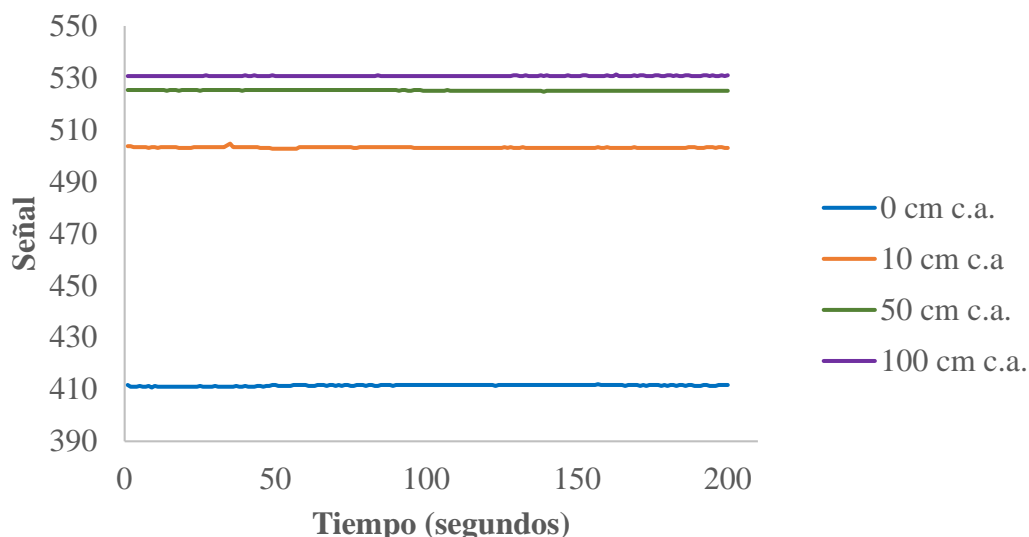


Figura 6.3. Señales producidas en fibra de coco a diferentes tensiones de humedad.

La Figura 6.4 muestra el comportamiento de las señales del sensor en el sustrato B (tezontle). Considerando las señales producidas en este sustrato se definió como límite de inicio de riego cuando la señal registrada es de 480, y el límite para detener el riego cuando la señal es de 329.

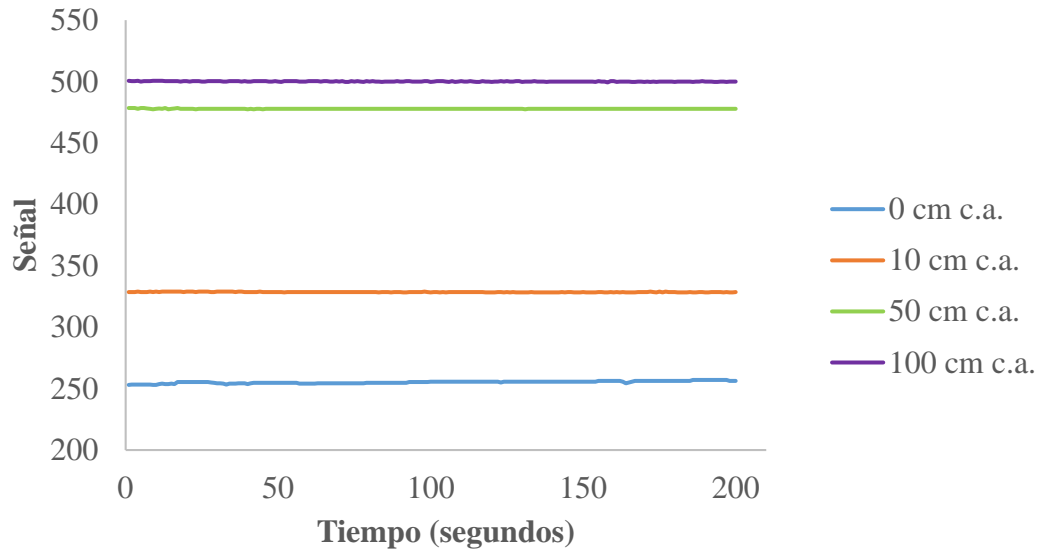


Figura 6.4. Señales producidas en tezontle a diferentes tensiones de humedad.

En la Figura 6.5 se presentan las señales detectadas y registradas por el sensor en el sustrato C conocido como mezcla holandesa (A+ pelita y turba, en volúmenes 1:1:1) a diferentes contenidos de humedad, permitiendo definir que el inicio del riego sea cuando la señal es de 475, y que se detenga cuando el sensor detecte una señal de 330.

Finalmente, la Figura 6.6 muestra el comportamiento de las señales del sensor de humedad en el sustrato D (70 % A y 30 % B) obtenida por programación lineal. En este cuarto sustrato el riego se inicia cuando la señal es de 850 y se detiene cuando la señal detectada es de 665.

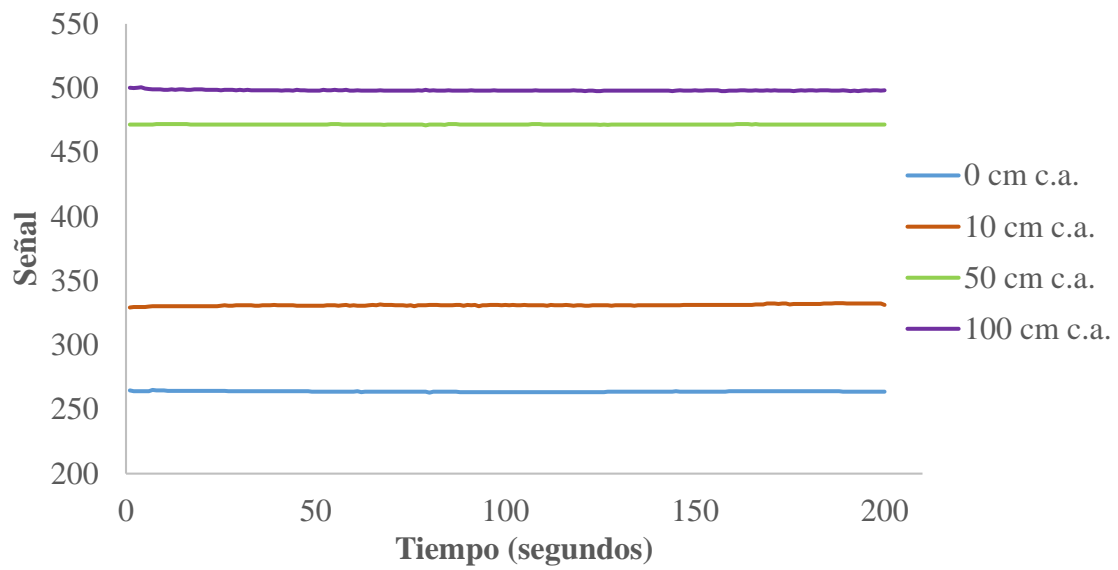


Figura 6.5. Señales producidas en el sustrato C (A+ pelita y turba, en volúmenes 1:1:1) a diferentes tensiones de humedad.

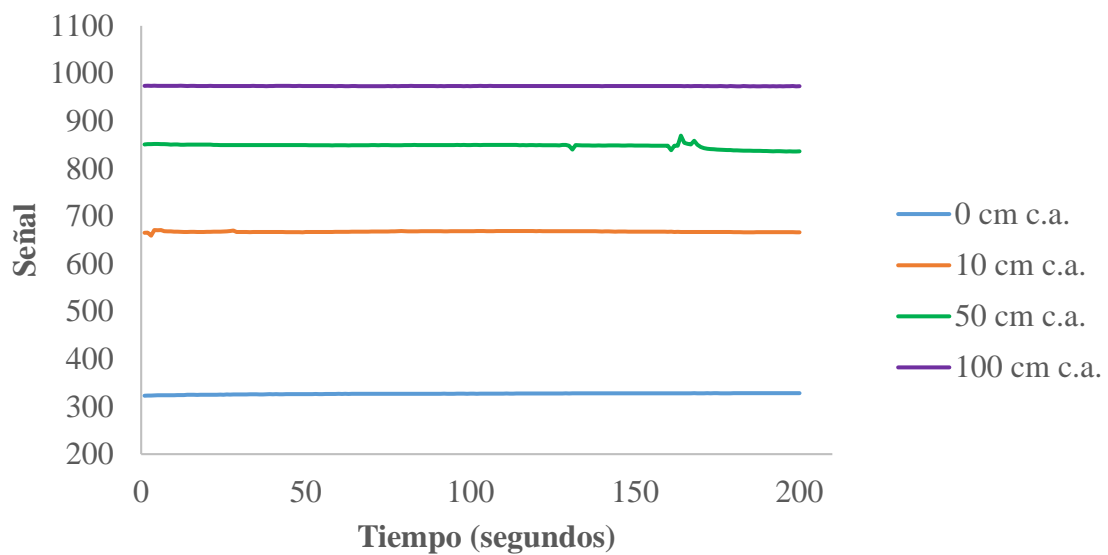


Figura 6.6. Señales producidas en el sustrato D (70 % A + 30 % B) a diferentes tensiones de humedad.

6.1.4 Determinación de la posición del sensor en la maceta

Tomando en cuenta que el manejo del riego depende de la capacidad de contener agua del sustrato, y esta a su vez depende tanto de las propiedades del sustrato como del contenedor usado (Vence *et al.*, 2013), se consideró necesario determinar la posición más favorable para el sensor, de tal manera que se encuentre en una zona donde el movimiento y cantidad de agua sea representativa para la zona de raíces.

En la Figura 6.7 se representa la distribución de 27 sensores colocados en la maceta para medir el contenido de humedad en diferentes puntos. Nueve sensores, denominados sensores superiores, se colocaron a 5 cm del borde superior de la maceta; otros nueve sensores, nombrados sensores medios, se colocaron a la mitad de la altura total de la maceta; y los nueve sensores restantes, llamados sensores inferiores, se colocaron a 5 cm del borde inferior de la maceta. En la figura también se representa, mediante pequeños cubos, la porción que le corresponde sensar a cada uno de los 27 sensores.

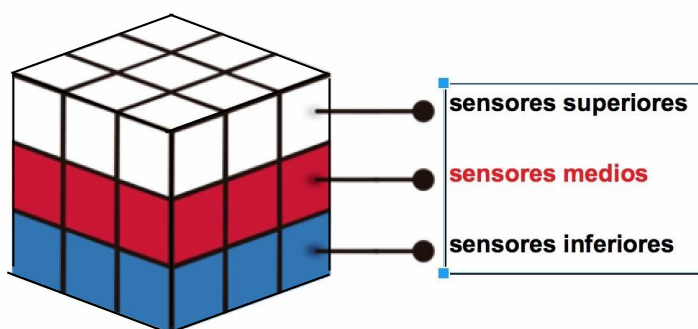


Figura 6.7. Distribución de los sensores de humedad en la maceta.

Para realizar el riego se optó por el método de riego por goteo, debido a que es el método más eficiente en términos de uso del agua y crecimiento de las plantas de arándano (Bryla *et al.*, 2011). Posteriormente, se decidió estudiar 3 disposiciones diferentes de las estacas provenientes de un gotero de 4 L h^{-1} . En la Figura 6.8 se muestran los 3 casos de distribución de las estacas, donde se llamará “Caso 1” cuando el gotero se conecta a una sola estaca, “Caso 2” cuando se conecta a 2 estacas, y “Caso 3” cuando se conecta a 4 estacas. La figura muestra la posición de las estacas según el caso.

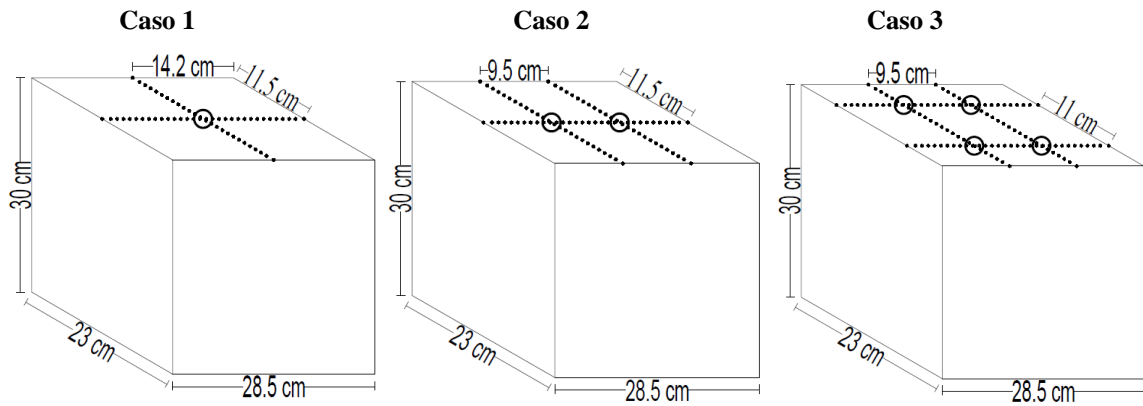


Figura 6.8. Disposición de las estacas para generar 3 distribuciones del riego.

En el Anexo A, se presentan los valores de la señal obtenida por el sensor y el contenido de humedad del sustrato obtenido por diferencia de pesos. En los cuadros del Anexo A, se aprecia que el contenido de humedad inicial, es decir, antes de la aplicación del riego es de 5, 3, 4 y 2 %, para los sustratos A (fibra de coco), B (tezontle), C conocido como mezcla holandesa (A + turba y perlita, en volumen 1:1:1), y el sustrato D (30 % A + 30 % B), respectivamente. De acuerdo con las curvas de liberación de cada sustrato, presentadas en el punto 6.1.2, los cuatro sustratos iniciaron con un contenido de humedad conocido como “agua no disponible” (AND).

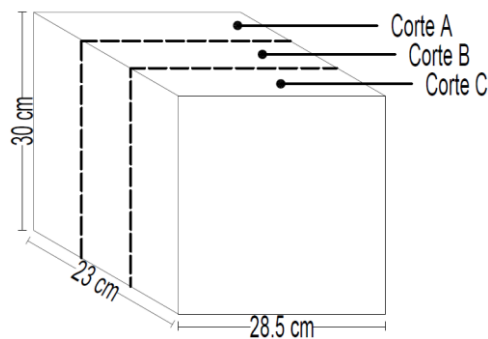


Figura 6.9. Cortes transversales para presentar la distribución del agua a través del perfil vertical de la maceta.

Para conocer cómo se distribuyó el agua en cada sustrato, bajo los 3 casos de disposición de las estacas provenientes de un gotero de 4 L h^{-1} , se graficó el perfil de tres cortes de la sección transversal de la maceta (Figura 6.9), denominados como cortes A, B y C. Dichos perfiles se presentan de la Figura 6.10 a la 6.21.

En la Figura 6.10 se muestra la distribución del porcentaje de humedad en fibra de coco, cuando el riego es aplicado usando el Caso 1. Se aprecia que la humedad se concentra en el centro de la maceta, por lo que se considera que bastaría un sensor de humedad colocado en el corte B a una profundidad de 10 a 15 cm, respecto al borde superior de la maceta.

La Figura 6.11 muestra la distribución del agua en fibra de coco cuando el riego se aplica con dos estacas. La figura muestra que el agua se concentra, principalmente, en los dos puntos donde se colocan las estacas y, en el caso del corte C, en el centro. Por la forma en que se aprecia la distribución de la humedad se requerirían 2 sensores en el corte B, pues es en donde se encuentra el mayor porcentaje de agua, y a partir de este se redistribuye, tanto en dirección vertical como horizontal.

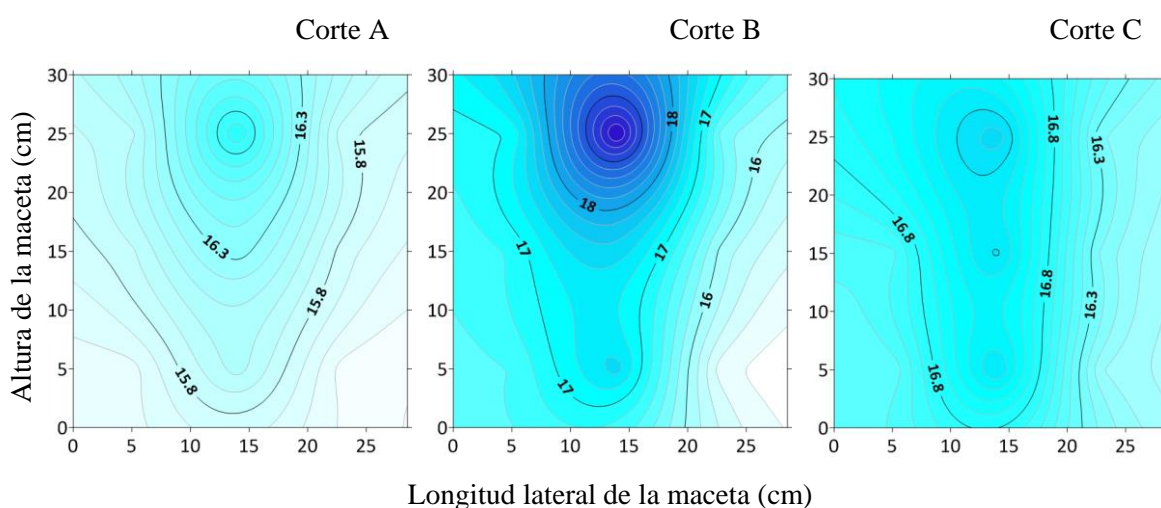


Figura 6.10. Distribución del porcentaje de humedad en fibra de coco con una estaca (Caso 1) en los cortes A, B y C.

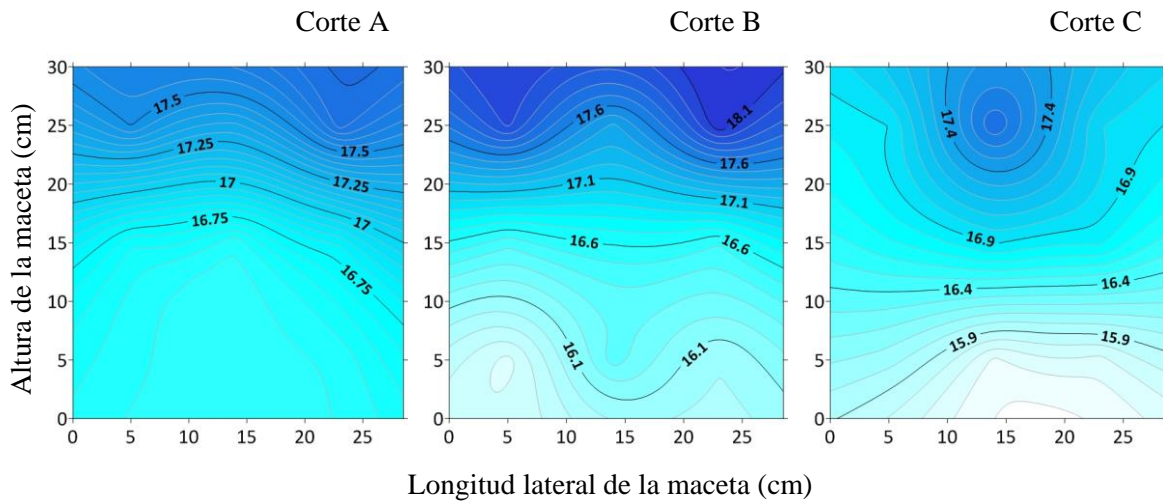


Figura 6.11. Distribución del porcentaje de humedad en fibra de coco con dos estacas (Caso 2) en los cortes A, B y C.

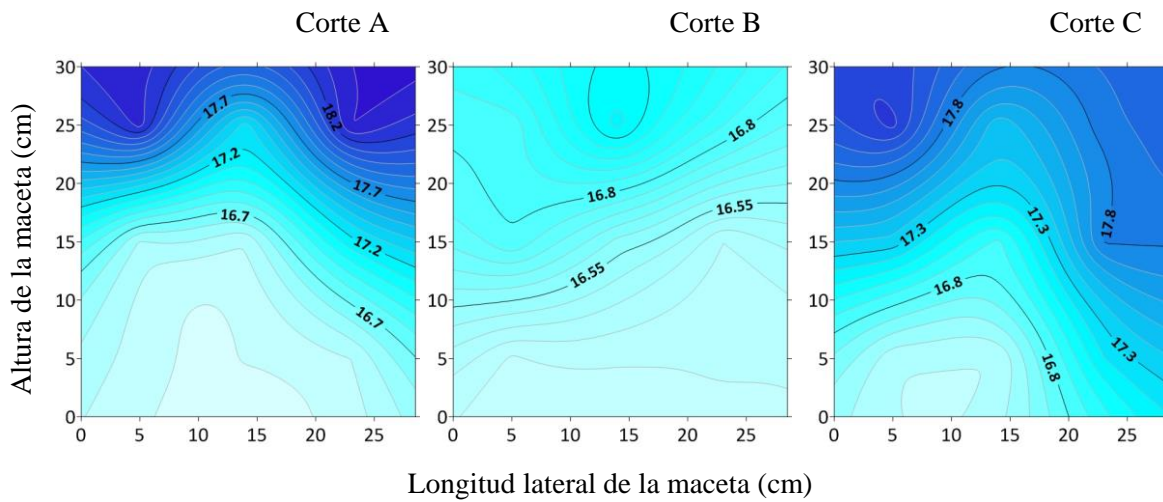


Figura 6.12. Distribución del porcentaje de humedad en fibra de coco con cuatro estacas (Caso 3) en los cortes A, B y C.

La Figura 6.12 muestra la distribución del agua de riego en fibra de coco cuando éste se aplica con cuatro estacas. En este caso, el agua no fluye rápidamente al centro de la maceta, resultando menos húmedo que el resto, por lo que sería importante colocar un sensor en cada punto de riego y otro más en la zona menos húmeda, para garantizar un

contenido de humedad suficiente en esa área por ser de gran interés debido a que el sistema radicular se desarrolla en gran parte ahí, por lo que, en total se deberían colocar 5 sensores.

En la Figura 6.13 se muestra la distribución del agua en el tezontle, cuando el gotero de 8 L h^{-1} se conectó a una única estaca (Caso 1). Se observa que el agua se concentró principalmente en el corte B, especialmente en donde se colocó el gotero. Los cortes A y C permiten apreciar que el agua no se mantiene retenida en un solo lugar; aunque, en el tiempo que se mantuvo el riego, sí se concentra en mayor cantidad de la parte superior a la parte media de la maceta. En este caso convendría colocar el sensor en el centro (representado por el corte B) de la maceta, a una profundidad entre los 5 a 15 cm respecto al borde superior de la maceta.

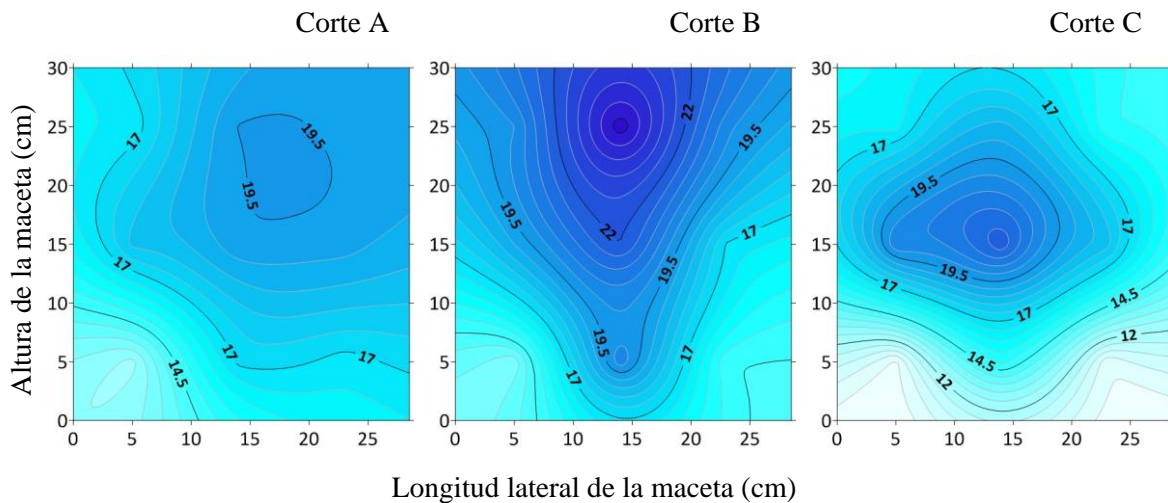


Figura 6.13. Distribución del porcentaje de humedad en tezontle con una estaca (Caso 1) en los cortes A, B y C.

En la Figura 6.14 se muestra la distribución del agua en el tezontle, cuando el gotero de 8 L h^{-1} se conectó a dos estacas (Caso 2). La mayor concentración de agua se observó en donde se colocaron las estacas, y la tendencia se mantuvo en los cortes A y C. Además, en los tres cortes se aprecia que en el fondo de la maceta es donde está menos húmedo el sustrato, lo que es lógico pues el agua se mueve de la parte superior a la inferior. Comparando el porcentaje de humedad de este caso con el Caso 1, se aprecia que en

promedio es menor debido a que el caudal se distribuye en dos puntos, mientras que en el Caso 1, solo había un punto de mayor concentración y por tanto también el porcentaje de humedecimiento es mayor. En este caso sería recomendable emplear dos sensores en los dos puntos de mayor humedecimiento y otro más en la zona central donde se espera una mayor concentración de raíces.

En la Figura 6.15 se presenta la distribución del porcentaje de humedad en el tezontle cuando el gotero de 4 L h^{-1} se conectó a cuatro estacas (Caso 3). Se observa que la mayor parte de la humedad se concentró en los cortes A y C, principalmente en los costados de la maceta. En el corte B la humedad se concentra principalmente en el centro, reflejando el flujo horizontal del agua. En este caso se considera que serían necesarios sensores para cada uno de los cuatro puntos de mayor concentración de humedad o al menos en 2 de ellos, y un sensor más en el centro donde se espera una mayor cantidad de raíces.

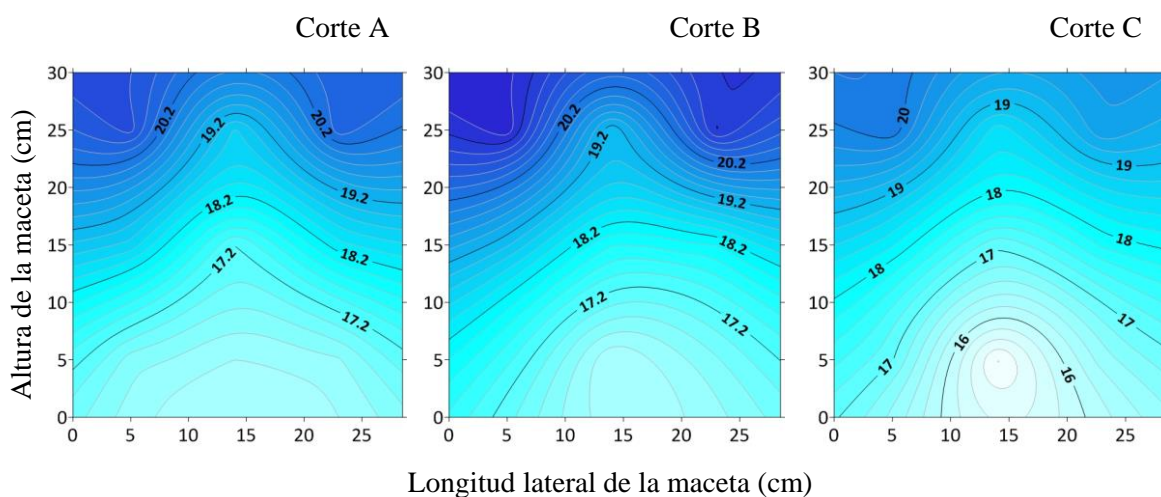


Figura 6.14. Distribución del porcentaje de humedad en tezontle con dos estacas (Caso 2) en los cortes A, B y C.

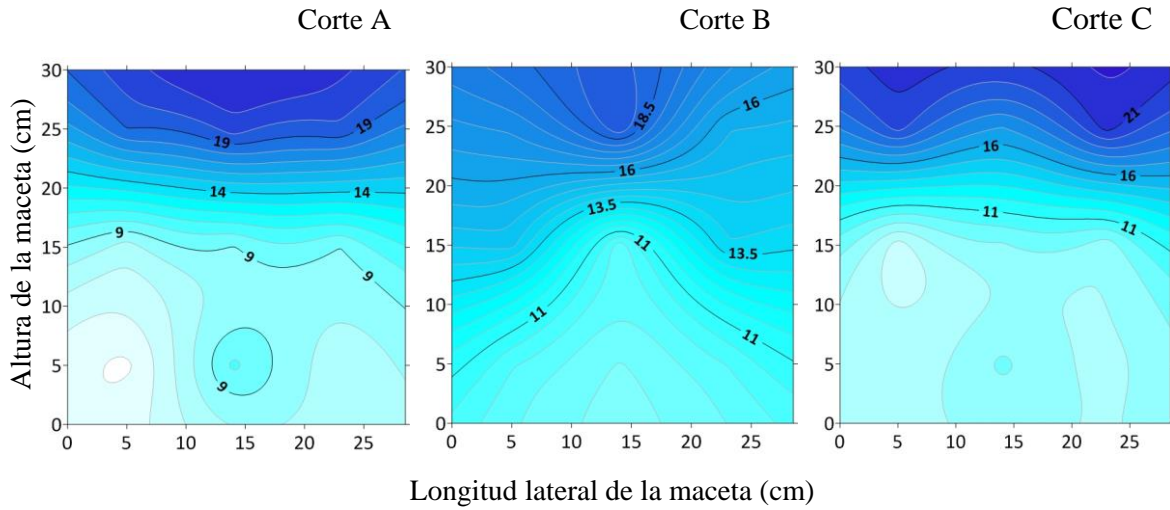


Figura 6.15. Distribución del porcentaje de humedad en tezontle con cuatro estacas (Caso 3) en los cortes A, B y C.

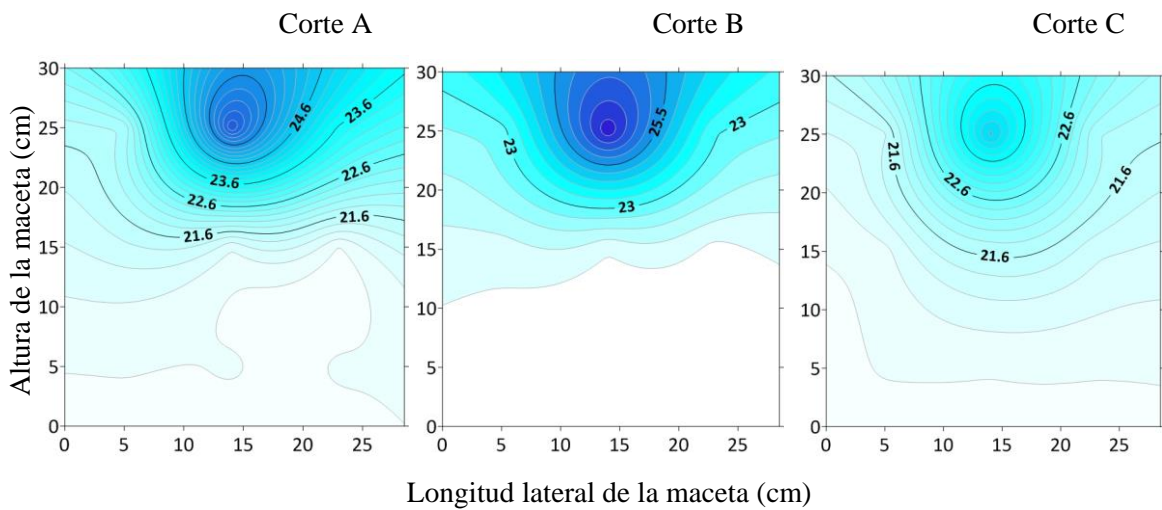


Figura 6.16. Distribución del porcentaje de humedad en mezcla holandesa con una estaca (Caso 1) en los cortes A, B y C.

El tercer sustrato empleado es conocido como mezcla holandesa, se compone de fibra de coco, perlita y tuba, mezclados en volúmenes iguales (1:1:1). La Figura 6.16 muestra la distribución del riego cuando el gotero de 4 L h^{-1} se conecta a una sola estaca (Caso 1), y se aprecia que se requeriría un sensor en la parte de la maceta representada por el corte B,

en los primeros 15 cm a partir del borde superior. Además, es posible apreciar que el corte A presenta una humedad más alta que el corte B, a pesar de que las condiciones de humedecimiento son las mismas, este resultado puede deberse a una humedad inicial más alta en el corte A, o a que la estaca pudo haberse colocado con una cierta inclinación que favoreció que el agua se moviera más hacia ese lado de la maceta. Por lo que, debe asegurarse una colocación correcta de cada estaca, puesto que esto influye directamente en el flujo del agua de riego.

La Figura 6.17 muestra la distribución de agua de riego en la mezcla holandesa cuando el gotero se coloca a dos estacas. Se evidencia que el agua se concentra en los dos puntos del corte B donde se colocan las estacas, aunque los cortes A y C muestran el movimiento horizontal del agua. Por la forma en que se mueve y se concentra el agua en este sustrato y para esta disposición de estacas, se sugiere colocar dos sensores, uno en cada punto de riego.

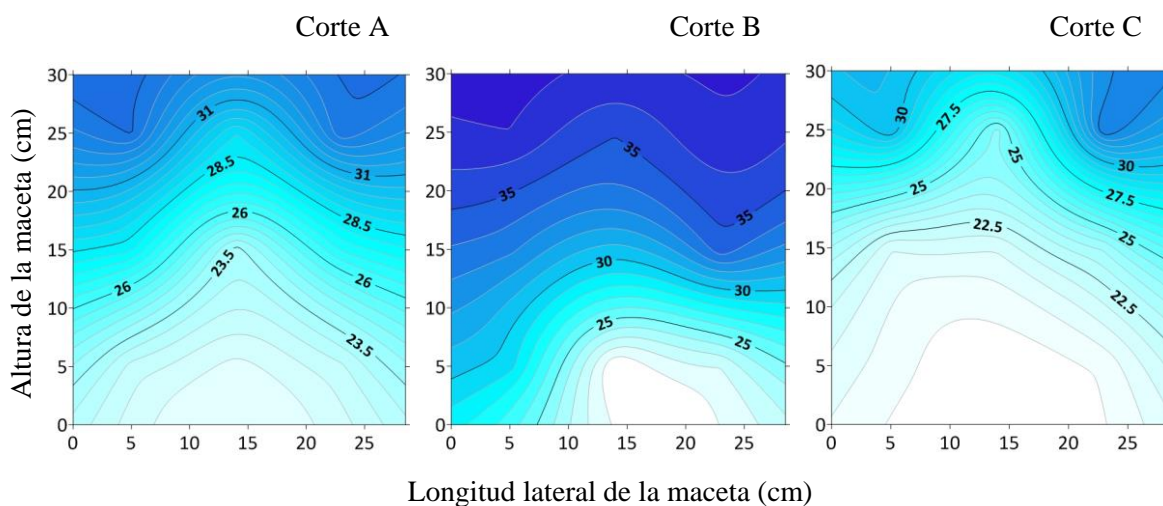


Figura 6.17. Distribución del porcentaje de humedad en mezcla holandesa con dos estacas (Caso 2) en los cortes A, B y C.

En la Figura 6.18 se muestra la distribución del agua de riego en la mezcla holandesa cuando el gotero se colocó a 4 estacas. Esta figura muestra que el agua se concentró,

principalmente, en los cortes A y C, debido a que ahí se colocaron las estacas. El comportamiento del movimiento del agua es muy similar al resto de los sustratos bajo esta misma disposición de las estacas, por lo que, la recomendación del número y posición de los sensores también es similar, y se sugiere colocar cinco sensores, dos de ellos en el corte A, cerca de los puntos de riego, otros dos en el corte C junto a los puntos de riego, y otro sensor más en el corte B, para asegurar suficiente humedad en esa porción de sustrato.

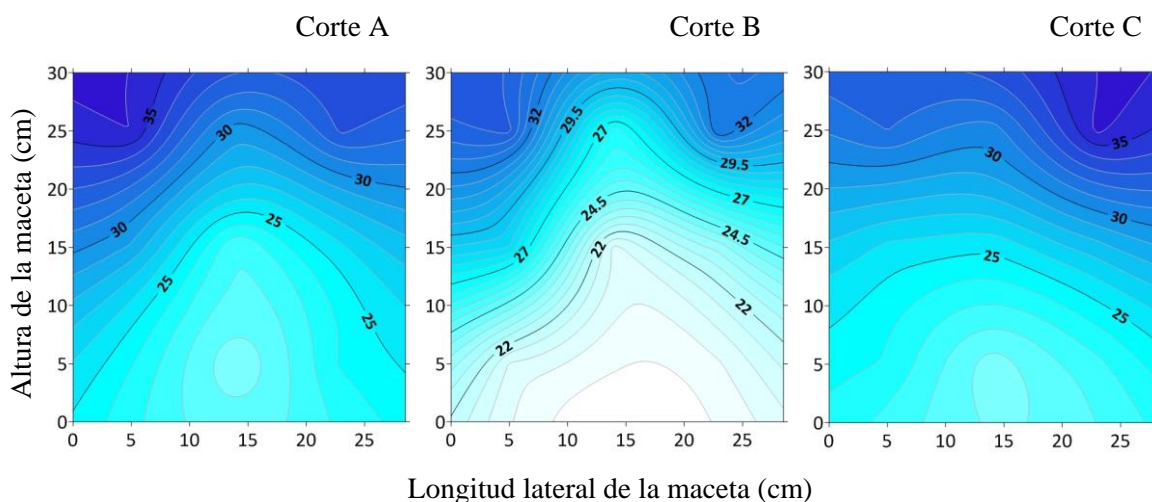


Figura 6.18. Distribución del porcentaje de humedad en mezcla holandesa con cuatro estacas (Caso 3) en los cortes A, B y C.

En la Figura 6.19 se presenta la distribución de la humedad en el sustrato formulado mediante programación lineal, y compuesto por 70 % fibra de coco + 30 % tezontle (70 % A + 30 % B), cuando el riego se aplica mediante una sola estaca. El agua se concentra, principalmente, en el corte B, observándose que, a partir de esa zona se distribuye hacia los lados y hacia el fondo de la maceta. Si el riego se efectúa empleando una sola estaca en el centro, se requería colocar un sensor cercano al punto de riego.

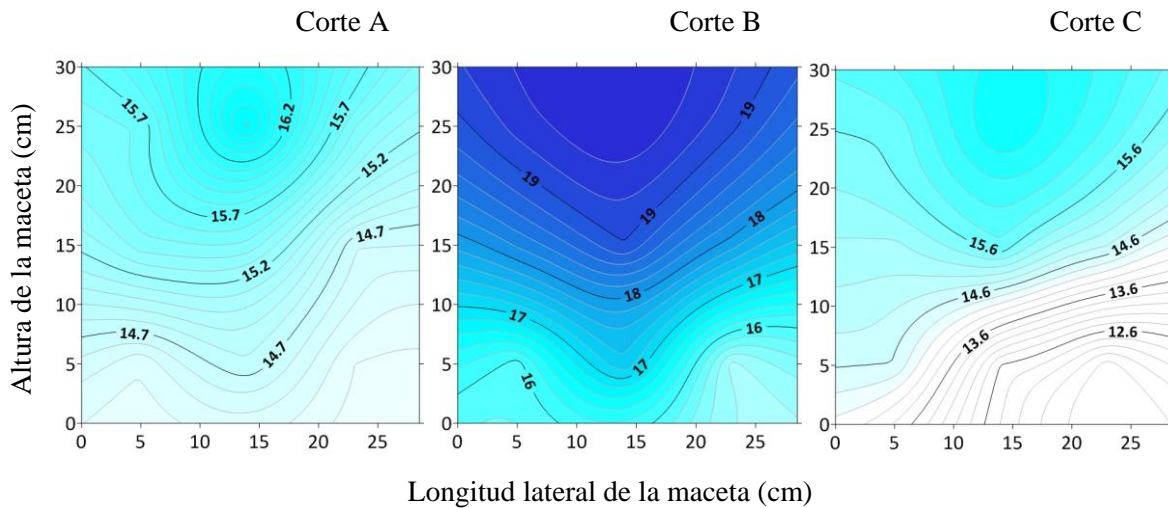


Figura 6.19. Distribución del porcentaje de humedad en 70:30 con una estaca (Caso 1) en los cortes A, B y C.

En la Figura 6.20 se presenta la distribución del agua de riego cuando este es aplicado con dos estacas, en el sustrato denominado 70 % A + 30 % B. Por la forma en que se mueve el agua a través del sustrato se recomienda colocar dos sensores en los puntos de riego o uno en el centro de la maceta, para asegurar suficiente humedad en la zona de raíces.

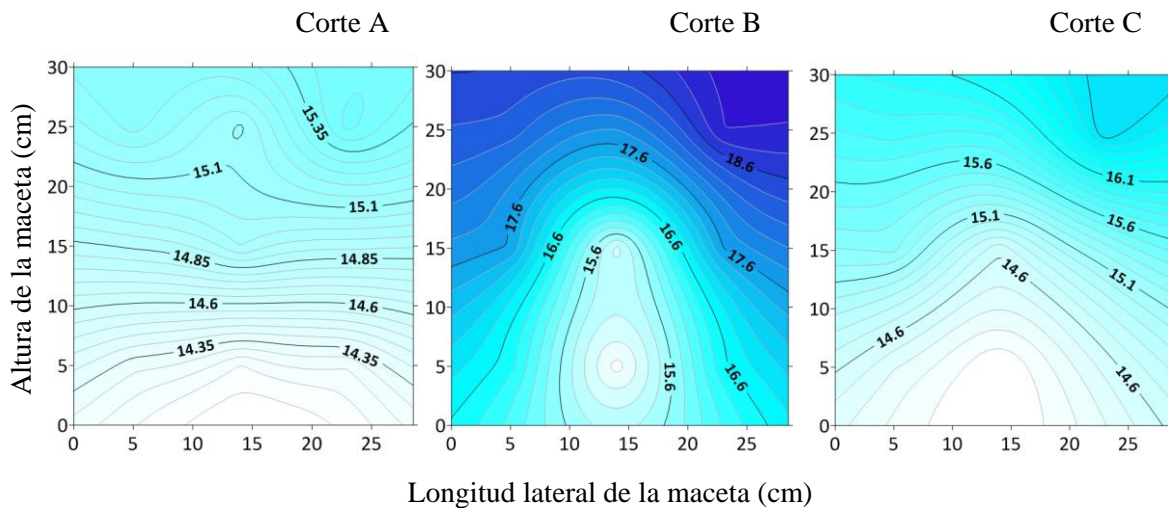


Figura 6.20. Distribución del porcentaje de humedad en 70:30 con dos estacas (Caso 2) en los cortes A, B y C.

Finalmente, la Figura 6.21 también muestra la distribución del agua de riego en el sustrato 70 % A + 30 % B, pero cuando éste se aplica mediante cuatro estacas. En este caso, se observa que es necesario sensor el riego en cada punto de riego para evitar excedentes y en el centro de la maceta, para evitar déficit, resultando en total un requerimiento de 5 sensores.

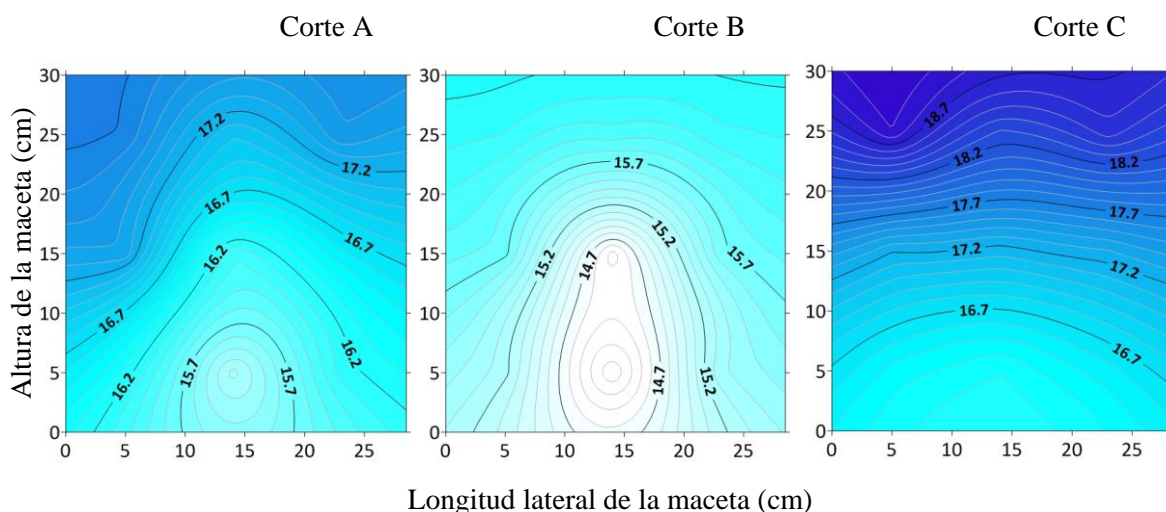


Figura 6.21. Distribución del porcentaje de humedad en 70:30 con cuatro estacas (Caso 3) en los cortes A, B y C.

En este trabajo se encontró que la distribución del agua de riego a través del sustrato varía según el tipo de sustrato y la configuración de emisores empleada. Lo que es de importancia, ya que la distribución del agua dentro del suelo tiene un efecto importante en la producción del arándano debido, principalmente, al tipo de sistema radicular de esta especie (Pannunzio *et al.*, 2008). Aunque, por otro lado, hay quienes sostienen que cuando las plantas se encuentran cultivadas en suelo, a campo abierto, el número de líneas de riego y el espaciamiento entre emisores no tienen efecto sobre el rendimiento y la calidad de los frutos de arándano (Ehret *et al.*, 2012), resultado que probablemente varíe según el tipo de suelo y la precipitación del lugar, ya que el experimento citado se realizó en un período que presentó precipitaciones más altas de lo normal, lo que podría sugerir que el suelo se encontró constantemente humedecido, haciendo poco evidente el efecto del riego.

A partir del análisis de todos los perfiles que muestran la distribución del contenido de humedad de los sustratos se encontró que para el riego del arándano se debería emplear el caso 1, es decir, el gotero conectado a una sola estaca, permitiendo colocar un solo sensor en la parte media de la maceta, pues es ahí donde se concentra la humedad. De esta manera el sensor manda una señal del contenido de humedad en un punto conocido, facilitando el establecimiento del criterio del riego.

6.1.5 Desarrollo del algoritmo de riego e implementación en software y hardware

Una vez obtenido el sustrato “ideal” para el cultivo de arándano, conocidas las propiedades de los cuatro sustratos empleados, calibrado el tipo de sensor empleado, y determinada su posición óptima en la maceta, fue posible codificar el algoritmo que permitió el control del riego.

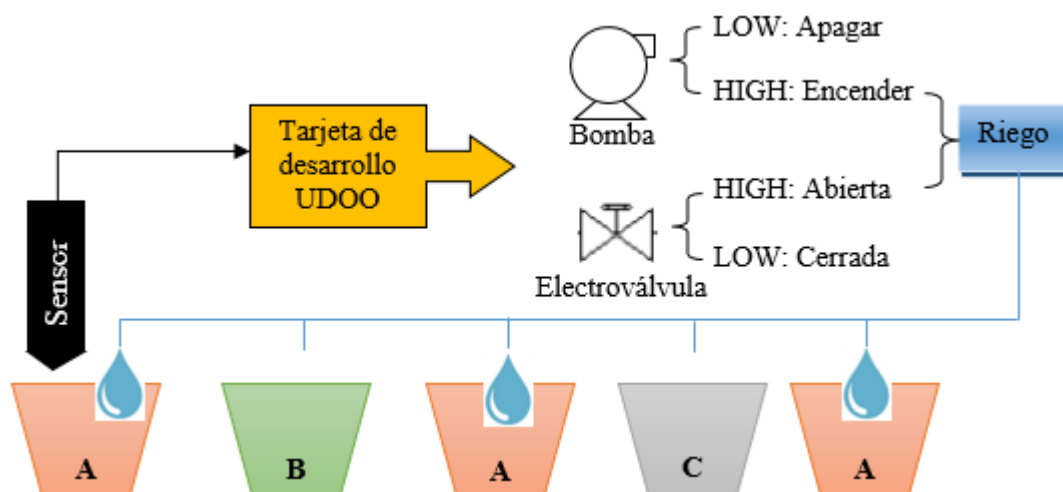


Figura 6.22. Diagrama de la conexión de los componentes del sistema de riego automatizado.

Para una mejor comprensión del código es importante saber que, de manera muy general, el sistema de riego automatizado se compone de sensores colocados dentro de las macetas con sus respectivos sustratos, y que estos sensores se conectan a una tarjeta de desarrollo,

misma que controla el encendido y apagado de la bomba, así como, la apertura y cierre de electroválvulas, tal y como se muestra en el diagrama presentado en la Figura 6.22.

A continuación se explican únicamente las partes fundamentales del código y éste se presenta como diagrama flujo. En el Anexo B, el código se presenta a detalle en lenguaje de programación. El código inicia llamando a las librerías que se requieren en el resto del código para ejecutar operaciones. Las librerías permiten emplear los recursos ya existentes en la tarjeta de programación, como por ejemplo, operaciones matemáticas. Posteriormente, se dictan los comandos que permiten la ejecución del riego.

En total se emplearon 4 sensores, uno por cada tipo de sustrato, de tal manera que, cuando un sensor detecta que es necesario regar un sustrato el riego se inicia y riega todas las macetas que contienen el mismo tipo de sustrato. Cada sensor se conectó a un pin análogo de la tarjeta de desarrollo, tal como se muestra en el Cuadro 6.7. La función del sensor consistió en “leer” el contenido de humedad de su respectivo sustrato y enviar esa lectura a su pin asignado en la tarjeta de programación. En la tarjeta de programación, se recibía la lectura del contenido de humedad a través del pin y se verificaba para saber si ese valor significaba un contenido de humedad que ameritaba regar o en su defecto detener el riego.

Cuadro 6.7. Asignación de los sensores a la tarjeta de programación para el riego.

Sensor	Sustrato	Pin en tarjeta de desarrollo
1	Fibra de coco (A)	10
2	Tezontle (B)	11
3	A + perlita y turba (1:1:1)	12
4	70 % A + 30 % B	13

La parte medular para el control del riego consistió en la verificación constante del contenido de humedad. Para verificar de manera permanente el contenido de humedad en los sustratos, se empleó un contador, mismo que “recorría” cada uno de los pines asignados a los sensores, y este valor era enviado a una variable denominada “maceta”,

donde los valores eran comparados con los rangos previamente establecidos por cada sustrato en la calibración (tema 6.1.3) para saber si debía iniciarse o detenerse el riego. Posteriormente, se decidió que el riego de cada sustrato sería iniciado y detenido mediante una electroválvula, por lo que en total se emplearon 4 electroválvulas, las cuales fueron asignadas cada una a un pin de la tarjeta de desarrollo UDOO NEO. La asignación y nomenclatura se presenta en el Cuadro 6.8.

Cuadro 6.8. Asignación y nomenclatura de las electroválvulas para el riego.

Válvula	Sustrato	Pin en tarjeta de desarrollo
Val 1	Fibra de coco (A)	4
Val 2	Tezontle (B)	5
Val 3	A + perlita y turba (1:1:1)	6
Val 4	70 % A + 30 % B	7

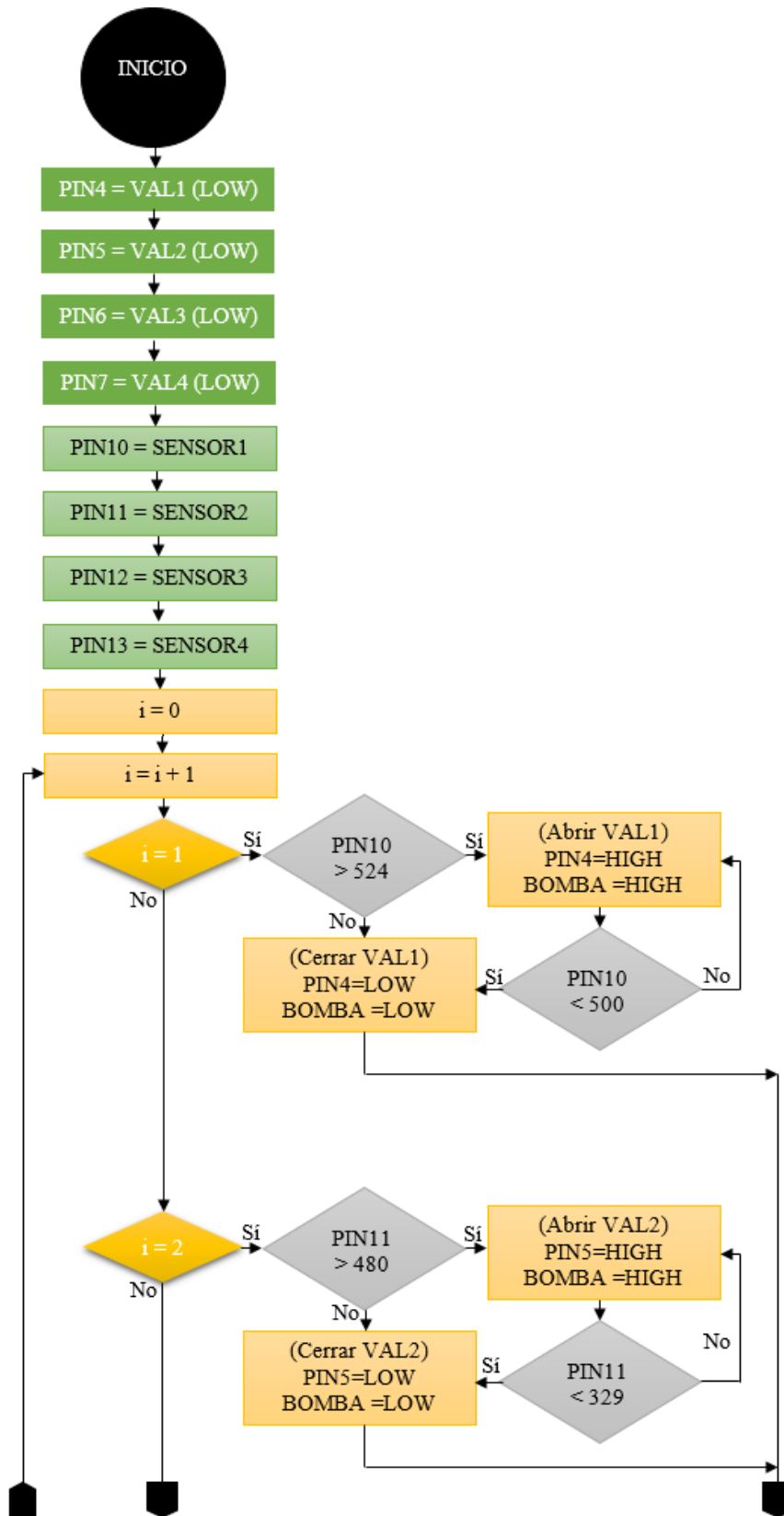
Por ejemplo, la válvula 1, asignada al control del riego en las macetas con fibra de coco se abre cuando el sensor envía un valor de señal mayor a 525 (HIGH), y en ese momento se enciende la bomba. Cuando el sensor envía un valor menor que 500 (LOW), la electroválvula se cierra y la bomba se apaga. La válvula 2 encargada de controlar el riego en tezontle inicia el riego con la señal 480 (HIGH) y lo finaliza con 329 (LOW). La válvula 3, encargada de controlar el riego en la mezcla holandesa, inicia el riego con la señal 475 (HIGH) y lo finaliza con 330 (LOW). La válvula 4, encargada de controlar el riego en la mezcla 70 % fibra de coco y 30 % tezontle, inicia el riego con la señal 850 (HIGH) y lo finaliza con 665 (LOW).

En la Figura 6.23, se presenta el diagrama de flujo que permite entender el código presentado en el Anexo B, y previamente explicado en este tema. Para hacer la implementación del código, se usó un sistema embebido, que inicia con la detección de la señal mediante un sensor de humedad, sigue la etapa de acondicionamiento que está integrada por un amplificador operacional, posteriormente, la adquisición de las variables físicas de cada sensor se realizó con una tarjeta de desarrollo UDOO NEO que cuenta con

dos núcleos en el mismo procesador: un ARM® Cortex-A9 de 1 GHz, y un co-procesador de E/S en tiempo real ARM Cortex-M4. Estos núcleos brindan la opción de tener control bajo un Sistema Operativo de distribución Linux (UDOOubuntu 2), así como el acceso al diseño estándar de pines de shields de placas Arduino, 32 pins de entrada y salida GPIO extendidos para el núcleo A9 y 22 para el A4.

La tarjeta UDOO NEO (Figura 6.24) cuenta con 6 entradas analógicas que son suficientes para la lectura de todos los sensores. Dentro de esta tarjeta se colocó el algoritmo referente a los límites de riego, que para controlar el encendido o apagado del sistema de riego se manda la señal para encender la bomba conectada a tinacos con la solución nutritiva y al mismo tiempo la señal que permite abrir o cerrar unas electroválvulas. El sistema embebido controla qué señal desea obtener mediante un contador binario, que dispone de una secuencia. Secuencia que va desde 0000 hasta la cantidad de señales o de entradas en el MUX menos 1, recibe las señales en una sola entrada analógica, y una vez recorrido el contador, es decir, obtenidas las lecturas de todos los sensores, se almacenan las variables realizadas sus correspondientes conversiones a humedad.

El costo final de la automatización del riego fue de \$1574.00 MNX (\$74 USD), considerando cuatro sensores (\$280.00 MNX), uno por sustrato evaluado, por lo que en un sistema de producción con solo un sustrato, el gasto incluirá únicamente el precio de un sensor (\$70.00 MNX). Adicionalmente, se considera el costo de los cables (\$80.00 MNX) para conectar los sensores a la tarjeta, una batería externa (\$150.00 MNX), y el precio de la tarjeta de desarrollo (\$1064 MNX). La tarjeta elegida (UDOO Neo) elevó considerablemente el costo final del prototipo, por lo que es importante mencionar que ésta podría ser reemplazada por otra más económica, sin embargo, para este proyecto de investigación de gran seriedad se optó por elegir una tarjeta robusta que permitiera realizar un gran número de pruebas. Cabe recalcar que el precio final del prototipo está muy por debajo de los precios actuales en el mercado para sistemas de automatización del riego en cultivos en suelo, mismos oscilan entre los \$25,000.00 MNX (Habitissimo, 2020). En adición, es importante destacar que actualmente no existe evidencia científica ni de manera comercial alguna propuesta para automatizar el riego para cultivos en sustrato.



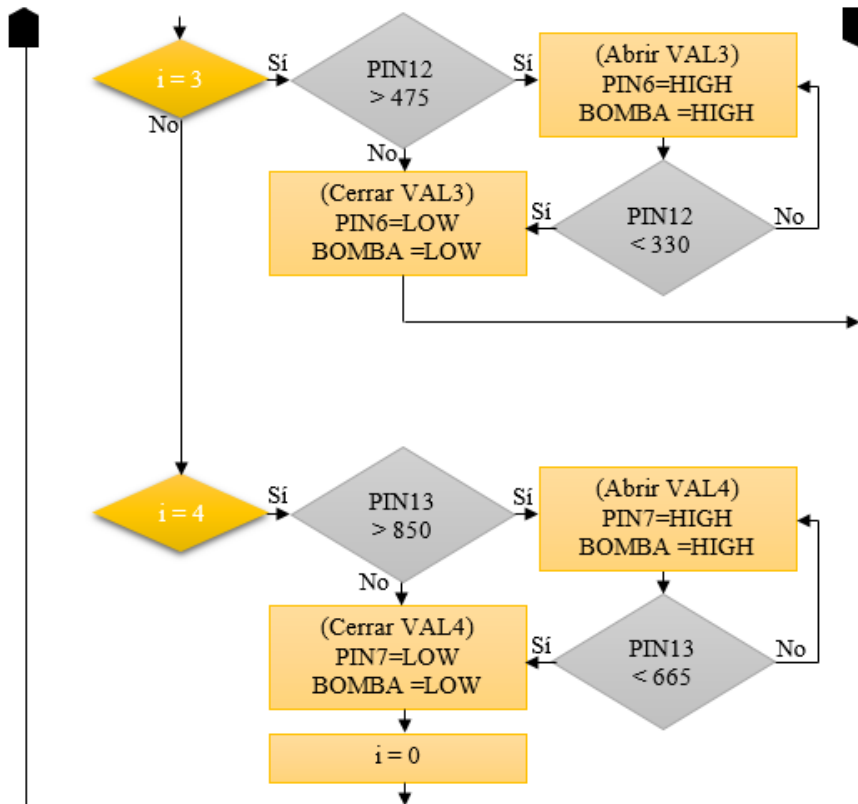


Figura 6.23. Diagrama de flujo del código para programar la automatización del riego.

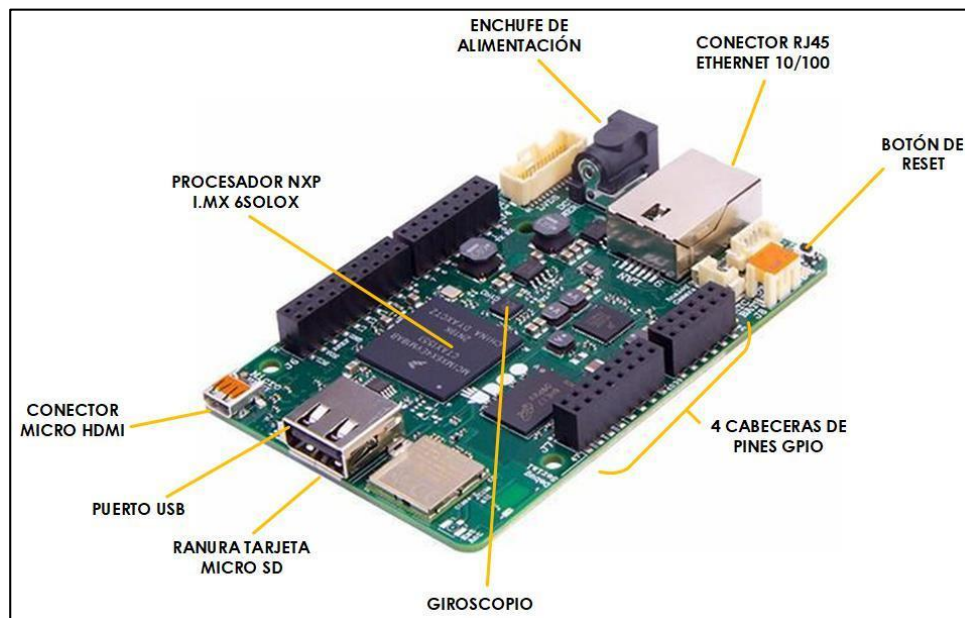


Figura 6.24. Esquema de la tarjeta de desarrollo UDOO NEO.

Fuente: www.repositorio.espe.edu.ec

6.2 FASE 2: Implementación y evaluación del riego automatizado en arándano bajo condiciones de invernadero

Esta fase consistió en el establecimiento del experimento bajo condiciones de invernadero, para lo cual se calculó un riego estimado y se instaló el sistema de riego automatizado dentro del invernadero. Transcurridos 6 meses se evaluaron los resultados.

6.2.1 Estimación del riego mediante un método indirecto

En el Cuadro 6.9 se presentan los resultados de la estimación del requerimiento de riego mediante el método FAO56-Penman-Monteith, a partir de los datos de la estación agrometeorológica Montecillo, Edo. de México.

Cuadro 6.9. Estimación de la ETC del arándano mediante el método FAO56-Penman-Monteith, en Montecillo, Edo de México, con datos de 1982 a 2015.

Mes	T media (°C)	Eto (mm día ⁻¹)	Kc	Etc (mm día ⁻¹)	Etc (cm mes ⁻¹)	Etc acum (cm)
Enero	11.3	3.0	0.30	0.89	2.8	2.76
Febrero	12.5	3.6	0.20	0.71	2.0	4.75
Marzo	14.7	4.4	0.20	0.89	2.7	7.50
Abril	17.0	5.1	0.20	1.03	3.1	10.58
Mayo	17.7	5.6	0.25	1.39	4.3	14.90
Junio	18.4	5.7	0.70	3.96	11.9	26.77
Julio	17.6	5.6	1.00	5.59	17.3	44.09
Agosto	17.5	5.4	1.00	5.35	16.6	60.68
Septiembre	16.1	4.8	1.00	4.81	14.4	75.12
Octubre	13.8	4.0	0.80	3.17	9.8	84.94
Noviembre	11.8	3.1	0.60	1.83	5.5	90.44
Diciembre	11.1	2.7	0.40	1.06	3.3	93.73

La evapotranspiración de referencia (Eto) estimada en este trabajo es muy cercana a la obtenida por Tijerina (1999), con datos de la misma estación agrometeorológica por el

método Doorenbos y Pruitt (1977), lo que indica una buena correlación entre ambos métodos para estimar la Eto en la zona de estudio.

Respecto a la evapotranspiración de cultivo (Etc) estimada para el arándano, los valores obtenidos se encuentran cercanos a los valores reportados por Bryla *et al.* (2011), para otras variedades como son Duke, Bluecrop y Ellit. Se observa que los requerimientos hídricos de esta especie no son muy altos, y son similares entre las diferentes variedades.

En el Cuadro 6.10 se muestra como se definió el programa de riego, que considera la superficie de cultivo, la eficiencia del riego, el caudal del gotero, y la frecuencia del riego.

Cuadro 6.10. Programación de riegos para arándano.

Parámetro	Resultado
Evapotranspiración de diseño (Etd)	16.6 cm mes ⁻¹
Número de macetas	48.0 unidades
Área de riego por planta (Ar)	0.06555 m ²
Eficiencia de aplicación (Ea)	80 %
Requerimiento neto de riego (Rn)	0.351 litros día ⁻¹ planta ⁻¹
Requerimiento total de riego (Rt)	0.438 litros día ⁻¹ planta ⁻¹
Caudal del gotero (Qe)	4 litros h ⁻¹
Tiempo riego (Tr)	6.6 minutos por día

De tal manera que el riego se realizó durante 4 veces al día, las primeras tres veces el riego duró 2 minutos, y la cuarta vez duró 1 minuto.

6.2.2 Establecimiento del experimento en invernadero

El código que se programó para llevar a cabo el riego de las plantas de arándano, se implementó en hardware mediante una tarjeta de desarrollo UDOO NEO, y se instaló, es decir, el algoritmo se implementó, en un invernadero mediante un sistema embebido (Figura 6.25), que se compone de: una señal de entrada, es decir, la señal del contenido de

humedad en los sustratos, captada por un sensor capacitivo de humedad; un proceso, que se lleva a cabo en la tarjeta de desarrollo, que consiste en la ejecución de los comandos del código de programación; una respuesta, que es el inicio o la finalización del riego; y la comunicación entre el ambiente externo y el proceso para la obtención de datos.

La obtención de datos se mandó mediante una conexión Wi-Fi establecida entre la tarjeta de desarrollo UDOO y un servicio de tipo REST (por sus siglas en inglés Representation State Transfer) que establece la comunicación entre el cliente y el servidor de un sistema web. La información sensada se guarda en una base de datos en Oracle SQL que se encuentra en el clúster ubicado en el departamento de redes y soporte técnico del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas Campus Montecillo.

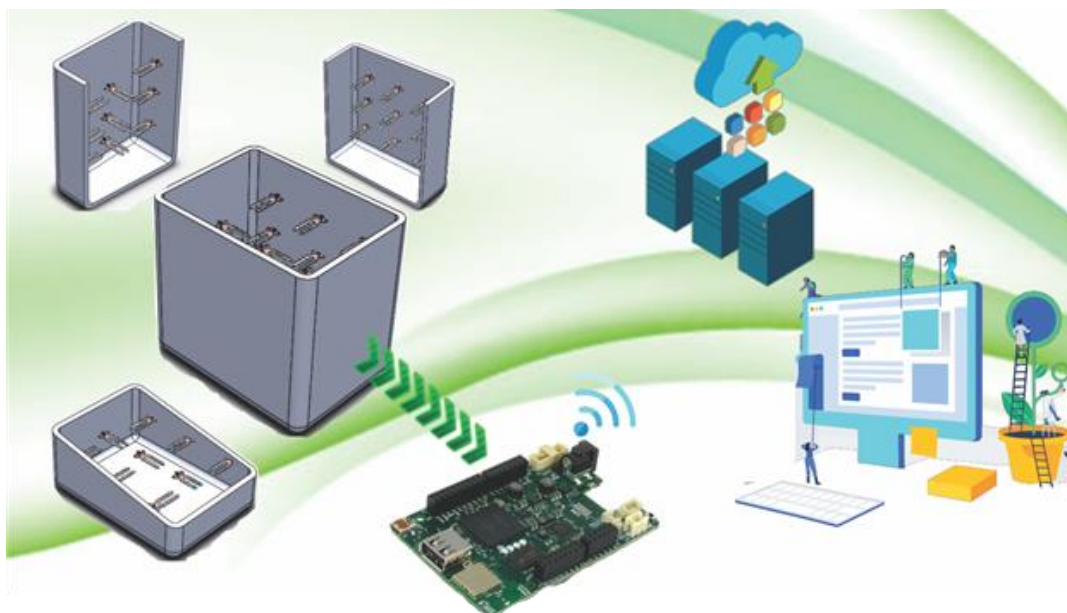


Figura 6.25. Representación del sistema embebido de control de riego.

En la Figura 6.26 se muestra una representación esquemática de la incorporación del algoritmo de riego automatizado mediante los componentes instalados en el invernadero. En la figura es posible observar las conexiones que hacen posible el riego, la localización de los sensores, y la distribución de los tratamientos del diseño experimental. En el Anexo C, se encuentra un plano detallado de los componentes que conforman la implementación del algoritmo que controla un sistema de riego de arándano en contenedores con sustrato.

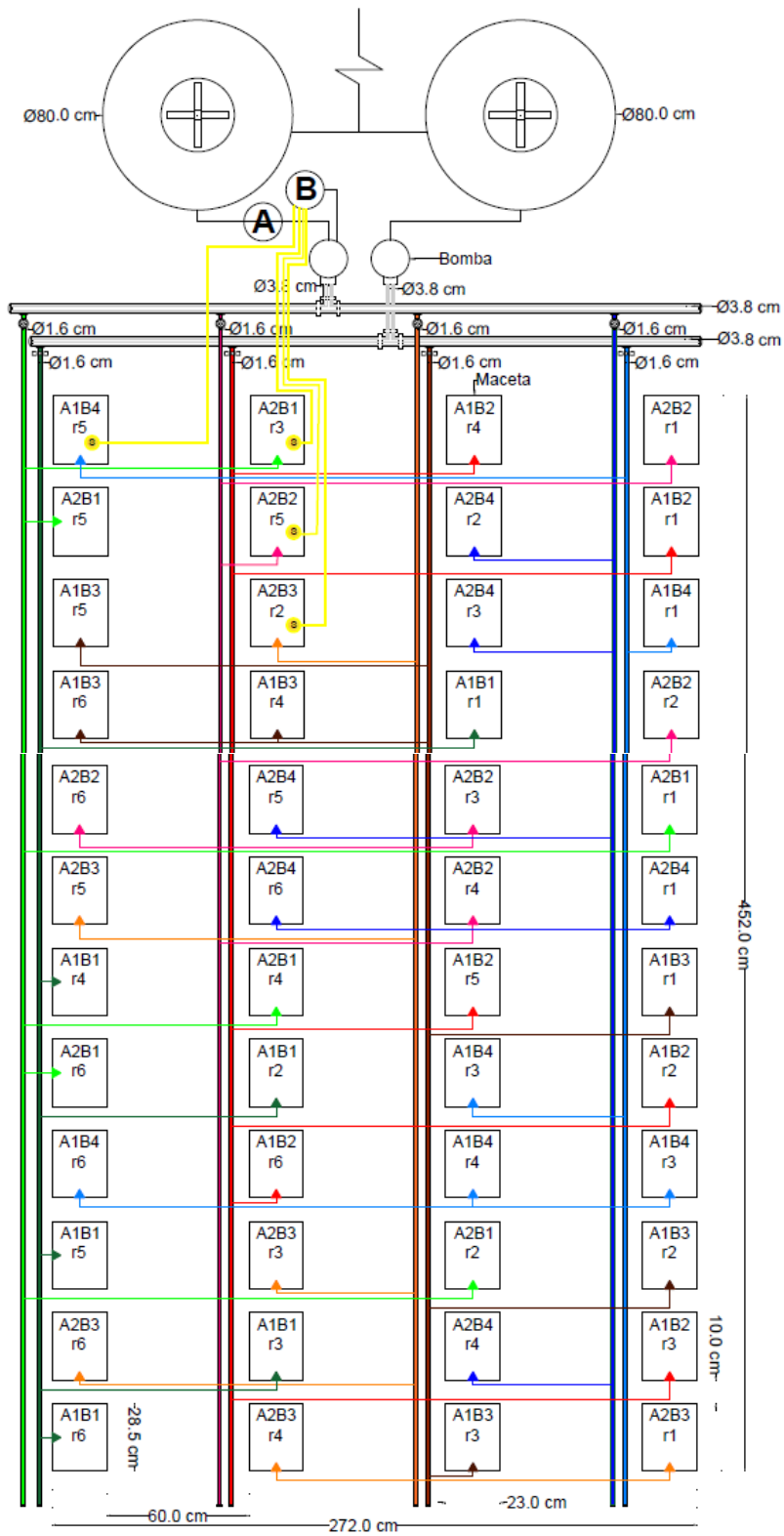


Figura 6.26. Esquema de la distribución de los componentes del sistema de riego.

6.2.3 Evaluación

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis de los valores de las lecturas del medidor de clorofila SPAD-502 Minolta® (lecturas SPAD), realizadas el día 4 de enero de 2019, al experimento de 2 factores en diseño completamente aleatorizado, establecido el 4 de agosto de 2018.

En el Cuadro 6.11 se presenta el análisis de varianza (ANAVA) que se realizó para determinar si los diferentes tratamientos del experimento mostraban diferencias significativas. Los datos cumplen con los criterios de normalidad (Shapiro Wilks, $\alpha = 0.05$) y de homogeneidad de varianzas (Levene, $\alpha = 0.05$). A partir de la tabla de ANAVA se sabe que no todos los tipos de riego (A) ni todos los tipos de sustrato (B) producen el mismo efecto, y que la interacción A*B no es estadísticamente significativa, es decir, los tipos de riego (en lecturas SPAD) siguen la misma tendencia en cada sustrato.

Cuadro 6.11. Análisis de varianza con una confiabilidad del 95.0 %.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Suma de cuadrados medios	Fo	Pr > F
Riego (A)	1	84.800	84.800	11.89	0.0013
Sustrato (B)	3	1823.215	607.738	85.23	<0.0001
Interacción (A*B)	3	4.774	1.591	0.22	0.8797
Error	40	285.217	7.130		
Total	47	2198.007			

Se ha encontrado, mediante la técnica de regresión lineal, que las lecturas SPAD están altamente relacionadas con el contenido de clorofila en las hojas de arándano (Ehret *et al.*, 2014; Shun-Hsin y Kuo-Tan, 2015). Adicionalmente, el contenido de clorofila esta linealmente correlacionado con el contenido de nitrógeno en la hoja, mismo que puede ser un indicador del estado de salud de la planta, debido a que, la deficiencia de nitrógeno en las plantas se traduce en una significativa reducción del área foliar, de la tasa fotosintética y menor producción de biomasa (Zhao *et al.*, 2005). Por lo que, las lecturas SPAD son

considerados un indicador del vigor y vitalidad de las plantas de arándano (Tasa *et al.*, 2012).

En el Cuadro 6.12 se observa que el riego influye en la concentración de nitrógeno en la planta, resultado que coincide con el reportado por Ehret *et al.* (2012), quienes encontraron que el riego afecta las concentraciones de minerales de la planta. En adición, encontraron que grandes volúmenes de riego aumentan el tamaño y contenido de agua en la fruta, pero reducen la firmeza y los sólidos solubles. Por otro lado, un buen manejo del riego resultó en la reducción de pérdida de agua en la fruta almacenada, aumentando su vida de anaquel.

Cuadro 6.12. Prueba Tukey para comparar el efecto del tipo de riego con base en los valores promedio de las lecturas SPAD.

Tipo de riego	Media
Riego automatizado (A2)	38.4 a
Riego estimado (A1)	35.8 b
DHS	1.558

También se aprecia que, independientemente del tipo de sustrato empleado, los valores de las lecturas SPAD más altos se obtuvieron en las plantas que fueron regadas mediante el sistema de riego automatizado (A2), respecto a las plantas que fueron regadas mediante el riego estimado (A1), lo que sugiere que tener control sobre la cantidad de agua regada puede dar como resultado plantas más vigorosas. Este resultado es comparable al de otros trabajos de automatización del riego en frutales, como el olivo y la vid, donde se ha encontrado que los sensores capacitivos permiten tener control sobre el riego y, por lo tanto, mantener el suelo con la humedad deseada, de acuerdo con la etapa de desarrollo y crecimiento del cultivo, lo que resulta en aceites y vinos de mejor calidad (Schugurnsky y Capraro, 2010).

En otros trabajos, ya se ha demostrado que la forma en que se riegan los arándanos tiene efecto sobre el crecimiento de estos (Bryla, 2006). En este trabajo en específico, la razón de que se obtengan mejores resultados con el sistema de riego automatizado (A2) propuesto puede deberse a que se está proveyendo del requerimiento hídrico en tiempo real, mientras que al estimarse (A1) en base a registros históricos puede caerse en exceso o déficit, debido a que no es posible predecir las condiciones climáticas dentro del invernadero con una certeza del cien por ciento.

A diferencia de otros trabajos donde la automatización del riego la ha realizado mediante la programación de fechas y tiempos de riego (Palma *et al.*, 2015), y que presentan las mismas desventajas antes mencionadas para el riego estimado, en este trabajo se automatizó acorde a la capacidad del sustrato, evitándose tanto exceso como déficit de humedad en el mismo, lo que es benéfico debido a que la saturación, entre otras cosas, provoca una reducción significativa del peso seco de los brotes de arándano (Bryla, 2008), mientras que el déficit reduce el crecimiento vegetativo, y la calidad y rendimiento del fruto, así como la tasa fotosintética (Lobos *et al.*, 2018), misma que, en este trabajo, puede relacionarse con las lecturas SPAD.

Respecto al tipo sustrato empleado para producir las plantas de arándano se sabe que es uno de los aspectos más importantes que afectan al cultivo (Ochmian *et al.*, 2019). En este trabajo se encontró que, independientemente del tipo de riego empleado, los valores más altos de lecturas SPAD se obtuvieron en el sustrato formulado mediante programación lineal (70 % fibra de coco + 30 % tezontle), denominado B4 en este análisis. Caso contrario, los valores de lecturas SPAD más bajos se encontraron en las plantas cultivadas en el sustrato conocido como mezcla holandesa (B3). En el caso de las lecturas SPAD de las plantas cultivadas en fibra de coco (B1) o en tezontle (B2), no existe diferencia significativa entre ellas, como se observa en el Cuadro 6.13.

Cuadro 6.13. Prueba Tukey para comparar el efecto del tipo de sustrato con base en los valores promedio de las lecturas SPAD.

Tipo de sustrato	Media
70 % fibra de coco + 30 % tezontle (B4)	44.2 a
Fibra de coco (B1)	39.6 b
Tezontle (B2)	35.3 b
Mezcla holandesa (B3)	27.3 c
DHS	2.922

Las diferencias entre los valores de las lecturas SPAD mostradas en el Cuadro 6.13, corroboran que las plantas de arándano son afectadas por el tipo de suelo (Tasa *et al.*, 2012), o sustrato (Ochmian *et al.*, 2009) en el que se produzcan las plantas. De acuerdo con Pinto *et al.* (2017), incluso si las diferencias no son estadísticamente significativas el primer año, tanto el tipo como el volumen del sustrato muestran tendencia a afectar el contenido de materia seca.

El que los mejores resultados se hayan obtenido con el sustrato B4, formulado mediante programación lineal (70 % fibra de coco + 30 % tezontle), corrobora que esa técnica es útil para formulación de mezclas (Cruz *et al.*, 2010), y es conveniente su uso en el área agrícola, ya que provee los requerimientos óptimos según el tipo de cultivo.

En los resultados de este trabajo, las lecturas SPAD más bajas se encuentran en el sustrato compuesto por turba, perlita y fibra de coco, denominado mezcla holandesa (B3). Este resultado es comparable con el reportado por Osvalde *et al.* (2018), quienes demostraron que los arándanos cultivados en turba presentan deficiencia de N en las hojas. De acuerdo con Bal (1997), los valores óptimos de N en las hojas de arándano oscilan entre 2.25 y 2.75 g/100 g, mientras que los encontrados por Ochmian *et al.* (2019), en las hojas de los arándanos cultivados en turba, son de 2.15 g/100 g. Adicionalmente, Ochmian *et al.* (2009), encontraron que el contenido de nitratos y nitritos del fruto tiende a ser más bajo en sustratos que contienen turba.

Considerando el efecto combinado del tipo de riego y tipo de sustrato empleado para el cultivo del arándano, en este experimento que se encontró que los valores de lectura SPAD más altos se obtuvieron en los tratamientos denominados R2S4, R2S1 Y R2S1, correspondientes a las plantas cultivadas en el sustrato formulado mediante programación lineal, tanto cuando se regaron con el sistema de riego automatizado como cuando se regaron mediante el riego estimado empíricamente, y a las plantas que se cultivaron en la fibra de coco y que se regaron mediante el sistema de riego automatizado, respetivamente. Mientas que, los valores de lecturas SPAD más bajos se encontraron en los tratamientos R2S3 y R1S3, correspondientes a las plantas que se cultivaron en el sustrato conocido como mezcla holandesa cuando riegan mediante el sistema de riego automatizado o mediante el riego estimado. Lo anterior se puede observar en el Cuadro 6.14.

Cuadro 6.14. Prueba Tukey para comparar el efecto de las combinaciones de los factores tipo de riego y tipo de sustrato con base en los valores promedios de las lecturas SPAD.

Tipo de riego	Tipo de sustrato	Tratamiento	Media
Estimado (A1)	Fibra de coco (B1)	A1B1	38.6 b c
	Tezontle (B2)	A1B2	35.6 c
	Mezcla holandesa (B3)	A1B3	25.7 d
	70 % fibra de coco + 30 % tezontle (B4)	A1B4	43.1 a b
Automatizado (A2)	Fibra de coco (B1)	A2B1	40.6 a b c
	Tezontle (B2)	A2B2	39.0 b c
	Mezcla holandesa (B3)	A2B3	28.9 d
	70 % fibra de coco + 30 % tezontle (B4)	A2B4	45.3 a
		DHS	4.928

En otros trabajos se ha demostrado que los cultivos como el jitomate, aunque el volumen de agua aplicado y el tipo de sustrato no influyen en la calidad del fruto, cuando el riego se aplica en función de las propiedades físicas de los sustratos se produce un ahorro de agua y fertilizantes, sin comprometer al desarrollo óptimo de las plantas ni el rendimiento

del fruto (Rodríguez *et al.*, 2017). Sin embargo, en este trabajo, se aprecia que para el arándano sí influyó el tipo de sustrato de empleado, y que usar el riego automatizado mejoró los resultados.

En la Figura 6.27 se presenta una gráfica que muestra el efecto (en lecturas SPAD) del tipo de sustrato en cada tipo de riego. En la figura se observa que si se elige regar las plantas de arándano mediante el sistema de riego automatizado o mediante el riego estimado, la mejor opción es cultivar las plantas en el sustrato obtenido mediante programación lineal (70 % fibra de coco + 30 % tezontle), pues en ambos tipos de riego, con ese sustrato se obtienen las lecturas SPAD más altas. Por otro lado, en ambos tipos de riego, la mezcla holandesa genera los valores de lecturas SPAD más bajas. En el caso de los sustratos S1 y S2 no hubo diferencia estadística significativa entre ellos, en ambos tipos de riego.

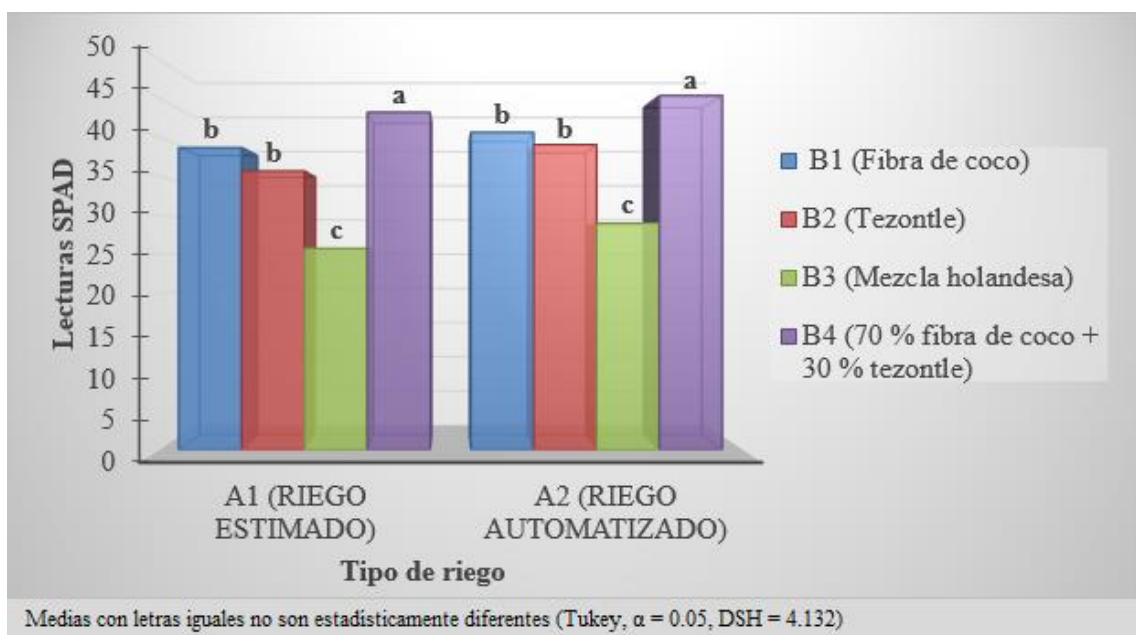


Figura 6.27. Efecto, en las lecturas SPAD, del tipo de sustrato (B) por cada tipo de riego (A).

La relevancia de este trabajo radica en proponer la automatización del riego para cultivos en sustratos, pues aunque hay trabajos de automatización del riego donde se emplean

sensores de humedad y microcontroladores, y que también buscan proveer solo la cantidad de agua necesaria al cultivo, la mayoría de ellos actualmente continúan aplicándose al riego de cultivos producidos en suelo (Tanvir *et al.*, 2019).

En la figura 6.28 se observa que si se opta por cultivar las plantas de arándano en fibra de coco o en el sustrato generado mediante programación lineal, es posible hacer el riego mediante el riego estimado o mediante riego automatizado de manera indistinta, sin que la elección del tipo de riego afecte significativamente los valores de las lecturas SPAD. Sin embargo, si se elige usar el tezontle o la mezcla holandesa, se recomienda emplear el riego automatizado, pues en ambos sustratos las lecturas SPAD más altas se obtuvieron después de aplicar el riego mediante el sistema de riego automatizado.

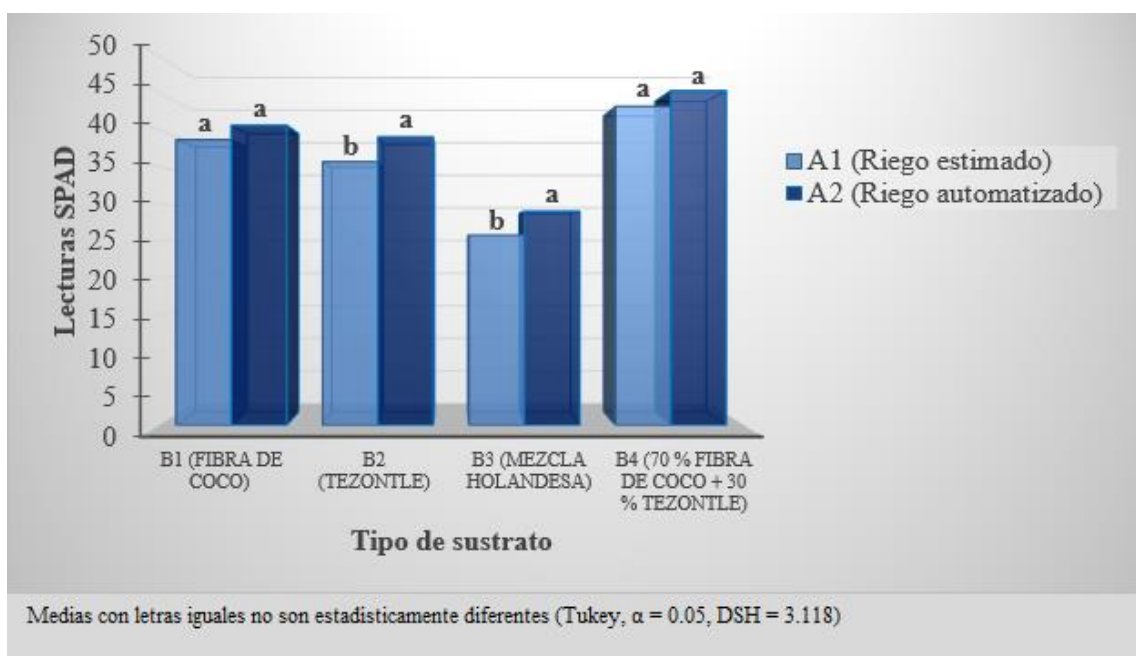


Figura 6.28. Efecto, en las lecturas SPAD, del tipo de riego (A) por cada tipo de sustrato (B).

7. CONCLUSIONES

En la formulación de mezclas de sustratos con base en tezontle y fibra de coco, el empleo de la técnica de programación lineal resulta en un método efectivo al generar mezclas con las características delimitadas por las restricciones, es decir, los requerimientos óptimos del cultivo de arándano.

Se caracterizaron cuatro sustratos comúnmente empleados en la producción de arándano, esto fueron fibra de coco (A), tezontle (B), una mezcla de turba, fibra de coco y perlita (C) y una mezcla propuesta de fibra de coco y tezontle en una proporción 70:30 (D). Con respecto a porosidad total, la porosidad de aireación y la porosidad de retención de humedad, todos los sustratos cumplen con los requerimientos del cultivo de arándano. En cuanto a conductividad eléctrica los sustratos B y D, no cumplen con los requerimientos de pH del arándano. Respecto a la materia orgánica, únicamente el sustrato B no cumple el requerimiento, pudiendo solucionarse con un manejo adecuado de fertirriego. Aplicando las correcciones pertinentes todos los sustratos caracterizados pueden ser aptos para establecer arándano, destacando los sustratos A y D por cumplir con la mayoría de los requerimientos de dicho cultivo.

Es posible relacionar el contenido de humedad de los sustratos con la señal de los sensores humedad del suelo tipo capacitivo con recubrimiento anticorrosivo, resultando estos eficientes para implementarlos en los sistemas de riego automatizados para cultivo de arándano cuando las plantas de arándano se encuentran en sustratos como fibra de coco, tezontle, o mezclas de estos, y en mezcla holandesa.

Por la distribución del contenido de humedad a través de los sustratos se concluye que el sensor debe colocarse en la parte media de la maceta, por ser el lugar donde se concentra la humedad, y reducirse al mínimo el número de sensores requeridos.

El algoritmo para automatizar el riego debe considerar las características del sensor, las propiedades físicas del sustrato y la correlación entre ambos factores.

Independientemente del tipo de sustrato en que estuvieron las plantas, el tipo de riego influye en la concentración de nitrógeno en la planta, y en este caso se encontró que las plantas regadas con el sistema automatizado presentan valores SPAD más altos.

Independientemente del tipo de riego empleado, los valores más altos de lecturas SPAD se obtuvieron en el sustrato formulado mediante programación lineal (70 % fibra de coco + 30 % tezontle). Por el contrario, los valores de lecturas SPAD más bajos se encontraron en las plantas cultivadas en el sustrato conocido como mezcla holandesa (B3). En el caso de las lecturas SPAD de las plantas cultivadas en fibra de coco (B1) o en tezontle (B2), no existe una diferencia significativa entre ellas.

Considerando el efecto combinado del tipo de riego y tipo de sustrato empleado para el cultivo del arándano, se encontró que las lecturas SPAD más altas se obtuvieron en las plantas cultivadas en el sustrato formulado mediante programación lineal cuando se regaron con el sistema de riego automatizado.

Es posible automatizar los sistemas de riego para el cultivo de arándano a partir de las propiedades físicas de los sustratos, favoreciendo la vigorosidad de las plantas.

8. LITERATURA CITADA

- Abad, M. 1993. Sustratos. Características y propiedades. En F. Canovas y J. Díaz (Eds.), *Cultivo sin suelo* (pp. 47-62). España: Instituto de Estudios Almerienses.
- Adams, P. y Ho, L.C. 1993. Efecto del medio ambiente sobre la absorción y distribución de calcio en el tomate y sobre la incidencia de podredumbre en flor. *Plant Soil*, 154: 127-132.
- Albert, T., Karp, K., Starast, M., Paal, T. 2010. El efecto del acolchado y la poda en el crecimiento vegetativo y el rendimiento del arándano medio alto. *Agronomy Research*, 8(1): 759–769.
- Allen, L., Brakke, M., Baker, J. y Jones, J. 2000. Gas exchange and biomass responses of young citrus trees to partial rooting volume irrigation. *Proceedings of Soil and Crop Science Society of Florida*, 59: 37-45.
- Altamirano, B.H.R., Puente, M.A.M. 2016. Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores inteligentes para el registro de la contaminación acústica en la Espoch basado en tarjetas de desarrollo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- Ansorena, J. 1994. *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Arenas, M., Vavrina, C., Cornell, J., Nalón, E. y Hochmuth, G. 2002. Fibra de coco como alternativa a la turba en los medios de cultivo para la producción de tomate. *HortScience*, 37(2): 309-312.
- Baba T., Nakaba S., Noma S., Funada R., Ban T. 2018. Heterorquía y arquitectura de raíces finas de esquejes de madera blanda de arándano rojo (*Vaccinium virgatum*). *Journal of Plant Research*, 131: 271–284.

- Bal, J.J.M. 1997. Cultivo de arándanos en invernaderos, túneles y bajo lluvia. *Acta Horticulturae*, (446): 327-332.
- Barbat, T. 2005. El arándano ¿un cultivo con futuro? *Horticultura*, 187: 30-36.
- Barber, S.A. 1984. *Biodisponibilidad de nutrientes del suelo: un enfoque mecanicista*. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc.
- Black, B.L. y Zimmerman, R.H. 2002. Mezclas de cenizas de carbón y compost como sustratos para arándano alto. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127: 869-877.
- Bórquez-López, R.A., Valdez, T.L.C., Yépez, G.E., Garatuza, P.J. 2013. Calibración del sensor de matriz granular (SMG) para determinar la retención de agua en el suelo para la programación de riego en tomate en el Valle del Yaqui. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9 (1): 11-16.
- Bosques, V.J.H. (Ed.). 2010. *Curso básico de hidroponía*. Moca, Puerto Rico.
- Bracho, J., Pierre, F. y Quiroz, A. 2009. Caracterización de componentes de sustratos locales para la producción de plántulas de hortalizas en el estado Lara, Venezuela. *Bioagro*, 21(2): 117-124.
- Bryla, D.R. 2006. La configuración de riego por goteo influye en el crecimiento de los arándanos altos jóvenes. *Hort Science*, 41(4): 1012-1012.
- Bryla, D.R. 2008. Requerimientos de agua de plantas jóvenes de arándanos irrigadas con aspersores, microsprays y goteo. *Acta Horticulturae*, 792: 135-139.
- Bryla, D.R., Gartung, J.L. y Strik, B.C. 2011. Evaluación de métodos de riego para el arándano alto. Crecimiento y requerimientos de agua de plantas jóvenes. *HortScience*, 46(1): 95-101.

- Bryla, D.R. y Linderman, R. 2007. Implicaciones del método de riego y la cantidad de agua aplicada en la infección por *Phytophthora* y *Pythium* y la gravedad de la pudrición de la raíz en el arándano alto. *Hort Science*, 42(6): 1463-1467.
- Bryla, D.R. y Machado, R. 2007. La fertirrigación con nitrógeno es menos eficiente pero más segura que la aplicación de fertilizantes granulados en arándanos recién plantados. *Hort Science*, 42: 1021-1021.
- Bryla, D.R. y Machado, R.M.A. 2011. Efectos comparativos de la fertirrigación de nitrógeno y la aplicación de fertilizantes granulares sobre el crecimiento y la disponibilidad de nitrógeno en el suelo durante el establecimiento de arándano alto. *Frontiers in Plant Science*, 46: 1-8.
- Bryla, D.R. y Strik, B.C. 2007. Efectos del espaciamiento de cultivares y plantas en los requerimientos de agua estacional del arándano alto. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132(2): 270-277.
- Bryla, D.R. y Strik, B.C. 2015. Requerimientos de nutrientes, estándares de tejido foliar y nuevas opciones para la fertirrigación del arándano alto del norte. *Hortechology*, 25(4): 464-470.
- Burés, S., Martínez, F.X. y Llorca, M. 1988. Estudio preliminar de la aplicación de la programación lineal paramétrica en la formulación de mezclas de sustrato. *Acta Horticulturae*, 221: 141-152.
- Bryla D.R., Valenzuela-Estrada L.R., Vargas O.L. 2017. Producción de raíz, distribución y rotación en sistemas de arándanos highbush del norte convencionales y orgánicos. *Acta Horticulturae*, 1180: 169-175.
- Burés, S. 1997. *Sustratos*. Madrid, España: Agrotécnicas.
- Burés, S. 1998. Introducción a los sustratos. Aspectos generales. En J.N. Pastor (Ed.), *Tecnología de sustratos. Aplicación a la producción viverística ornamental, hortícola y forestal* (pp. 19-31). España: Universitat de Lleida.

- Burés, P.S. 2002. Sustratos: propiedades físicas, químicas y biológicas. *Informe sobre la industria hortícola*, 1: 70-78.
- Caja Rural Intermediterránea. 2017. *Técnicas de producción en cultivos protegidos*. Tomo 2. España: Ediciones Agrotécnicas.
- Caruso, F.L., Ramsdell, D.C. 1995. *Compendio de enfermedades de arándanos azules rojos*. Massachusetts, USA: APS Press.
- Carpersen, S., Svensson, B., Hakansson, T., Winter, C., Khalil, S., Asp, H. 2016. Interacciones suelo-arándano desde una perspectiva orgánica. *Scientia Horticulturae*, 208: 78-91.
- Castellanos, J.Z. 2009. *Manual de producción de tomate en invernadero*. México: Ocma.
- Castro, P.M., Águila, M.F.M., Quevedo, N.A., Kleisinger, S., Tijerina, C.L. y Mejía, S.E. 2008. Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura Técnica en México*, 34(4): 459-470.
- Cerda, R. 2004. *Análisis coyuntural y perspectivas del arándano en Chile*. Concepción, Chile: Hortifrut S.A.
- Cruz, C.E., Sandoval, V.M., Volke, H.V., Ordaz, C.V., Tirado, T.J.L. y Sánchez, E.J. 2010. Generación de mezclas de sustratos mediante un programa de optimización utilizando variables físicas y químicas. *Terra Latinoamericana*, 28: 219-229.
- Cruzat, G.R. y Mancilla, V.M. 2010. *Sustratos de arándanos en condiciones de aridez*. Chile: Ministerio de Agricultura.
- Curto, L., Covi, M., Gassmann, M.I., Cambareri, M., Maggiora, A.D. 2016. Calibración de datos observados de contenido de agua en el suelo con sensores capacitivos. *Revista Meteorologica*, 41(2): 49-63.

- De Boodt, M., Verdonck, O. y Capaert, I. 1974. Método para medir la curva de liberación de agua de sustratos orgánicos. *Acta Horticulture*, 37: 2054-2062.
- DFRobot, 2020. www.dfrobot.com
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. *Requerimientos de agua de los cultivo*. Boletín 24 de riego y drenaje. Roma: FAO.
- Ehret, D.L., Frey, B., Forge, T., Helmer, T. y Bryla, D.R. 2012. Efectos de la configuración y tasa de riego por goteo sobre el rendimiento y la calidad de la fruta de las plantas jóvenes de arándano alto. *HortScience*, 47(3): 414-421.
- Ehret, D.L., Frey, B., Forge, T., Helmer, T., Bryla, D.R. y Zerbarth, B.J. 2014. Efectos de la tasa de nitrógeno y el método de aplicación en la producción temprana y la calidad de la fruta en el arándano alto. *Canadian Journal of Plant Science*, 94: 1165-117.
- Encino, J.M., Porter, D., Périés, X. 2018. Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego. Ed. AgriLife extension, Texas, USA.
- Escalas, R.G. 2014. Diseño y desarrollo de un prototipo de riego automático controlado con Raspberry Pi y Arduino. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Evans, M.R., Konduru, S. y Stamps, R.H. 1996. Variación de la fuente en las propiedades físicas y químicas del polvo de coco. *HortScience*, 31(6): 965-967.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2005. *La importancia de la material orgánica del suelo*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/009/a0100e/a0100e00.htm#Contents>
- FAOSTAT. 2020. *Estadísticas FAO*. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Ferreyra, E., Peralta, C., Sadzawka, R., Muñoz, S. y Valenzuela, B. 2001. Efecto de la acidificación del sustrato y del agua de riego en la nutrición, desarrollo y producción

- de arándano ojo de conejo (*Vaccinium ashei* Reade). *Agricultura técnica*, 61(4): 452-458.
- Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A. y Salazar, I. 2007. Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25(2): 127-134.
- Fall Creek. 2018. *Variedad Victoria™ 'TH-929'-ES*. Oregón, USA: Fall Creek Farm and Nursery, Inc. Recuperado de: <https://www.fallcreeknursery.com/es/productores-de-frutas-comerciales/variedades/victoria-th-929>.
- García, O., G. Alcántar, R. Cabrera, F. Gavi y V. Volke. 2001. Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta. *Terra*, 19: 249-258.
- García, R.J.C., García, G.G., Ciordia, A.M. 2018. *El cultivo de arándano en el norte de España*. España: SERIDA.
- Golden Software, LLC. Surfer 16. Golden, Colorado. Descargado en agosto 2019.
- Guijarro, R.A.A., Cevallos, T.L.J., Preciado, M.D.K., Zambrano, M.B.N. 2018. Sistema de riego automatizado con arduino. *Revista Espacios*, 39(37): 27-41.
- Hancock, J., Hanson, E. 1986. Nutrición en arándano alto. USA: Michigan State University.
- Hirzel, C.J. 2012. Acidificación de suelos para cultivo de arándanos y sus efectos sobre la disponibilidad de nutrientes. *Revista frutícola* (especial arándanos), 3: 14-18.
- Holzapel, E. 2009. Selección y manejo de los sistemas de irrigación para arándano. *Acta Horticulturae*, 810: 641-648.
- Holzapel, E., Hepp, R. y Mariño, M. 2004. Efecto del riego sobre la producción de fruta en arándano. *Agricultural Water Management*, 67(3): 173-184.

- Hunt, J., Honeycutt, C., Starr, G. y Yarborough, D. 2008. Tasas de evapotranspiración y coeficientes de cultivo para arándano bajo (*Vaccinium angustifolium*). *International Journal of Fruit Science*, 8(4): 282-298.
- Irrrometer, 2020. <https://www.irrometer.com/sensorssp.html>
- Jaureguiberry, P. 1991. *Relaciones agua crecimiento en arándano alto (Vaccinium corymbosum L.) regado por microaspersión y goteo*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Lagunas, A.A. 2013. Evaluación del manejo del riego por medio de sensores de humedad del suelo en un cultivo de tomate para industria. Universidad Pública de Navarra, España.
- Lobos, T.E., Retamales, J.B., Ortega-Farías, S., Hanson, E.J., López-Olivari, R., Mora, M.L. 2018. Efectos regulados del déficit de riego en los parámetros fisiológicos, rendimiento, calidad de la fruta y antioxidantes de las plantas de *Vaccinium corymbosum* cv. Brigitta. *Irrigation Science*, 36(1): 49-60.
- López, G., Almonte, I., Pérez, A., Sotomayor, R.D. y Núñez, A.P. 2014. Caracterización biológica de suelos y sustratos empleados en la producción de vegetales en invernaderos. *Ciencias del Suelo (Argentina)*, 32(1): 29-39.
- López, J.C., Lorenzo, P., Castilla, N., Pérez-Parra, J., Montero, J.I., Baeza, E., Antón, A., Fernández, M. D., Baille, A. y González-Real, M. 2001. *Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo, Estación experimental "Las Palmerillas"*. Almería, España: Caja Rural de Almería y Málaga.
- Lugo, E.O., Quevedo, N.A., Bauer, M.J.R., Hebert del Valle, P.D., Palacios, V.E., Águila, M.M. 2011. Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(5): 659-672.

- Machado, R.M.A., Bryla, D.R. y Vargas, O. 2014. Efectos de la salinidad inducida por el fertilizante de sulfato de amonio en el crecimiento de raíces y brotes de arándano alto. *Acta Horticulturae*, 1017: 407–414.
- Malik, R.K., Cawthon, D.L. 1998. Efectos de la calidad del agua de riego, la enmienda del suelo y el acolchado de la superficie sobre los cambios químicos del suelo en una plantación de arándano ojo de conejo (*Vaccinium ashei* Reade). Recuperado de <http://www.tamu-commerce.edu/coas/agscience/res-dlc/blueberr/blue.html>.
- Martin, C. E. 2010. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego. ¿Cuándo? Arizona Cooperative Extension. University of Arizona. 8 p.
- Martínez, F.X. 1993. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de Horticultura*, 11: 55-66.
- Martínez, P.F. y Roca, D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. En R.V.J. Flórez (Ed.), *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (pp. 37-77). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- MATLAB. 2016. Matlab version 9.0.0 (R2016a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Medina, J.L. 2006. (Octubre). Variedades de especies de frutos pequeños apropiadas para climas subtropicales: la experiencia de México. En W.S. Bueno (Presidencia), *III Simpósio nacional do morango II Encontro sobre pequenas frutas e Frutas nativas do Mercosul*, Pelotas, Brasil.
- Mingeau, M., Perrier, C. y Améglío, T. 2001. Evidencia de períodos sensibles a la sequía desde la floración hasta la madurez en el arándano alto. *Scientia Horticulturae*, 89(1): 23-40.
- Minitab, 2017. Versión 18.1. Minitab, Inc.

- Moinereau, J., Herrmann, P., Favrot, J.C. y Riviere, L.M. 1987. *Los sustratos. Inventario, características, recursos. Cultivos por encima del suelo*. París, Francia: INRA.
- Muñoz, C. 1988. Seminario: El cultivo del arándano. 30 de noviembre, 1 y 2 de diciembre. Estación Experimental Carillanca, Temuco, Chile: INIA.
- Muñoz C., Soto R., Valenzuela J. 1993. Efecto de las características químicas y físicas de los medios de encapsulamiento en el crecimiento de arándanos ojos de conejo. *Acta Horticulturae*, 346.
- Ochmian, I., Grajkowski, J., Skupień, K. 2009. Influence of substrate on yield and chemical composition of highbush blueberry fruit cv. 'Sierra. *J. Fruit Ornam. Plant Res.*, 17(1): 89-100
- Ochmian, I., Grajkowski, J., Skupień, K. 2010. Efecto del tipo de sustrato sobre el rendimiento de campo y la composición química de los arándanos cv. Patriota. *Agricultural and Food Science*, 19: 69-80.
- Ochmian I., Kozos, K., Chelpiński, P. y Szczepanek, M. 2015. Comparación de la calidad del fruto en cultivares de arándano alto cultivados con métodos convencionales y orgánicos. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(2): 174–181.
- Ochmian, I., Malimowski, R., Kubus, M., Malinowska, K., Sotek, Z. y Racek, M. 2019. La viabilidad de cultivar arándano alto (*V. corymbosum* L.) en suelo cálcico arcilloso con el uso de sustratos orgánicos. *Scientia Horticulturae*, 257: 1-13.
- Ooi, S.K., Cooley, N., Mareels, I., Dunn, G., Dassanayake, K. y Saleem, K. 2016. Automatización del riego en huerta: estudio de casos hortícolas. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(26): 256-261
- Ovalde, A., Karlsons, A., Cekstere, G., Pormale, J. y Apse, J. 2018. Influencia del tipo de suelo en el estado de los nutrientes de las hojas de arándano alto en Letonia. *Acta Hort.*, 1217: 399-404.

- Palma, Y.D., Palma, G.T., Molina, B.A., Santana, L.A. 2015. Sistema de riego automatizado para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la ESPAM MFL – Ecuador. *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, 28(2): 100-107.
- Pannunzio, A. 2008. *Efectos de sustentabilidad de los sistemas de riego en arándano* (tesis de maestría en ciencias). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Veterinarias, Buenos Aires, Argentina.
- Pannunzio, A., Texeira, P. 2008. (Mayo). Respuesta del arándano al riego por goteo y a la aplicación de calcio y potasio. En 4to. Simposio Internacional de Arándanos y Berries y 2do Congreso Latinoamericano de Arándanos y Berries. Buenos Aires, Argentina.
- Pannunzio, A., Texeira, P., Vilella y Premuzik, Z. 2011. Impacto de los sistemas de riego por goteo en arándanos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(1): 3-8.
- Pannunzio, A., Texeira, P., Vilella, F., Puhl, L. 2009. Fertigación en arándanos en Concordia, Argentina. *Acta Horticulturae*, (810), 771–776.
- Papadopoulos, A.P. 1991. *Growing greenhouse tomatoes in soil and in soilless media*. Canada: Communications Branch Agriculture.
- Parra S.L.R., Hernanz, M.J.L., Sánchez-Girón, R.V. 2016. Influencia de cuatro sistemas de laboreo en las propiedades físicas de un fluvisol y en el balance energético en cultivos de raíces y tubérculos. *Universidad y Ciencia*, 6(1): 64-81.
- Pastor, J. 1999. Utilización de sustratos en viveros. *Terra*, 17(3): 231- 235.
- Patten, K., Neuendorff, E., Nimr, G., Haby, V., y Wright, G. 1989. Prácticas culturales para reducir el daño a la salinidad / sodio de las plantas de arándanos ojo de conejo (*Vaccinium ashei* Reade). *Acta Horticulturae*, 241: 207–212.

- Paulouski M. 2014. Cultivo de arándanos en Bielorrusia. *Acta Horticulturae*, 1017: 159-162.
- Peet, M., Willits, D. 1995. Papel del exceso de agua en el agrietamiento de la fruta de tomate. *HortScience*, 30(1): 65-68.
- Pinto, R.M., Mota, M., Oliveira, C.M., Oliveira, P.B. 2017. Efecto del tipo de sustrato y el tamaño de la maceta en el crecimiento y rendimiento del arándano: resultados del primer año. *Acta Horticulturae*, 1180: 517-522.
- Pire, R. y A. Pereira. 2003. Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela: Propuesta metodológica. *Bioagro*, 15(1): 55-63.
- Quesada, R.G. y Méndez, S.C. 2005. Análisis fisicoquímicos de materias primas y sustratos de uso potencial en almácigos de hortalizas. *Revista de Agricultura Tropical*, 35: 1-13.
- Rendón, S.GC., Cortes, T.J.G., Juárez, P.D.I., Ortega, I.M.J. 2015. Sistema de riego inteligente utilizando electroválvulas a partir de sensores de visión. *Pistas Educativas*, 113: 293-307.
- Retamales, J.B. 1988. Fisiología y nutrición de arándanos. Serie Carillanca Chile (2): 27 – 46.
- Retamales J.B., Hancock J.F. 2018. Blueberries. Boston, USA: Cabi.
- Richards, D., Lane, M., Beardsell, D.V. 1986. La influencia de la distribución del tamaño de partícula en la corteza de pino: arena: mezclas de macetas de lignito en el suministro de agua, la aireación y el cultivo de plantas. *Scientia Horticulturae*, 29: 1-14.
- Ríos, G.P. 2010. *Automatización del riego en sustratos* (tesis maestría en ciencias). Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, México.

- Ristow, N.C., Correa, A.L.E., Carpenedo, S. 2012. Substratos para o enraizamiento de microestacas de mirtilheiro cultivar Georgiagem. *Rev. Bras. Frutic.*, 34(1): 262-268.
- Rivadeneira, M.F., Kirschbaum, D.S. 2012. *Programa Nacional Frutales-Cadena Arándano*. Argentina: INTA.
- Rivière, L., Caron, J. 2001. Investigación sobre sustratos: estado del arte y necesidad para los próximos 10 años. *Acta Horticulturae*, 548: 29-37.
- Rodríguez, M.O.G., Can, C.A., Cruz, C.E., García, P.J.D. 2017. Influencia del riego y sustrato en el rendimiento y calidad de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1): 53-65.
- Salgado, V.C., Sánchez-García, P., Volke-Haller, V.H., León, M.T. B.C. 2018. Respuesta agronómica de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) al estrés osmótico. *Agrociencia*, 52: 231-239.
- Sánchez, G.P. 2013. (Noviembre). Manejo integral de la nutrición en arándano. En P.C. Salazar (Presidencia), *Berries en Colima*. I Foro de berries en Colima. Colama, Colima.
- SAS Institute. 2002. Sistema SAS para Windows. Versión 9.0. SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Sciarappa, W., Murphy, S., Quinn, V., Barresi, R., Ward, D.L. 2017. Evaluación de la salud del suelo en arándano alto con la prueba de respiración Solvita® CO₂. *Acta Horticulturae*, 1180: 327-334.
- Schugurnsky, C., Capraro, F. 2008. (10–12 diciembre). Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo. Actas del XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA), Santiago, Chile.

- Serna, R.A., Ros, G.F.A., Rico, N.J.C. 2010. Guía práctica de sensores. Ed. Creaciones. España.
- Seymour, R., Starr, G., Yarborough, D.E. 2004. Arándano bajo (*Vaccinium angustifolium*) con condiciones de riego y de secano. *Small Fruits Review*, 3(12): 45-56.
- Shun-Hsin, H., Kuo-Tan, L. 2015. La fertirrigación en la estación inactiva promueve la fotosíntesis, el crecimiento y la floración del arándano ojo de conejo "Blueshower" en climas cálidos. *Hortic. Environ. Biotechnol.*, 56(6): 756-761.
- SIAP. 2019. Atlas Agroalimentario 2019. México: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado por última vez el 03/05/2020. Recuperado de: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2019/Atlas-Agroalimentario-2019
- SIAP. 2020. Cierre agrícola. México: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado por última vez el 03/05/2020. Recuperado de: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- Snyder, R.G. 1992. *Manual de tomate de invernadero*. Mississippi, USA: Publication-Cooperative Extension Service.
- Strik, B. y Buller, G. 2005. El impacto del cultivo temprano en el crecimiento posterior y el rendimiento de arándano alto en los años de establecimiento en dos densidades de siembra depende del cultivar. *HortScience*, 40(7): 1998-2001.
- Sudzuki, F. 2002. *Cultivo de frutales menores*. Santiago, Chile: Editorial Universitaria.
- Sumedrea D., Ancu I., Oprea E., Sturzeanu M., Nicola, C. 2016. Composición química de la fruta de los cultivares de arándano highbush cultivados en diferentes sustratos. *Acta Horticulturae*, 1139: 671–676.
- Taha, H.A. 2012. *Investigación de operaciones*. México: Editorial Pearson.

- Tanvir, S.M., Munaim, H.M.A., Fahmidur, R.K., Sayeed, S.A. 2019. Sistema de riego automatizado: control del riego a través de la red inalámbrica de sensores. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 7(2): 33-37.
- Tasa, T., Starast, M., Vool, E., Moor, U., Karp, K. 2012. Influencia del tipo de suelo en la productividad de arándanos de medio arbusto. *Agricultural and food science*, 21: 409-420.
- Tijerina, C.L. 1999. Requerimientos hídricos de cultivos bajo sistemas de fertirrigación. *Terra Latinoamericana*, 17(3): 237-245.
- Udoo, 2020. <https://www.udoo.org/>
- Undurraga, P., y Vargas, S. (Eds.). 2013. *Manual del arándano*. Boletín INIA N° 263. Chillán, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- USDA. 2005. *Conductividad eléctrica del suelo*. USA. Recuperado de: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053280.pdf
- Valenzuela-Estrada, L.R., Vera-Caraballo, V., Ruth, L.E., Eissenstat, D.M. 2008. Anatomía de la raíz, morfología y longevidad entre los orígenes de las raíces en *Vaccinium corymbosum* (Ericaceae). *American Journal of Botany*, 95(12): 1506–1514.
- Vargas, T.P., Castellanos, R.J.Z., Sánchez, G.P., Tijerina, C.L., López, R.R.M., Ojodeagua, A.J.L. 2008. Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Rev. Fitotec. Mex.* 31(4): 375-381.
- Vargas-Tapia, P., Castellanos-Ramos, J. Z., Muñoz-Ramos, J. de J., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., López-Romero, R. M., ... Ojodeagua-Arredondo, J. L. 2008. Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura Técnica En México*, 34(3): 323–331.

- Vence, B.L., Valenzuela, O.R., Svartz, H.A., Conti, M.E. 2013. Elección del sustrato y manejo del riego utilizando como herramienta las curvas de retención de agua. *Ciencias del suelo*, 31(2): 153-164.
- Warncke, D.D. 1986. Análisis de los medios de crecimiento del invernadero mediante el método de extracción por saturación. *HortScience*, 21: 223-225.
- Wright, G.C., Patten, K.D., Drew, M.C. 1994. Composición mineral de rabbiteye joven y arándano alto del sur expuesto a salinidad y calcio suplementario. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(2): 229-236.
- Yarborough, D. E. 2004. Factores que contribuyen al aumento de la productividad en la industria de los arándanos silvestres. *Small Fruits Review*, 3(1-2): 33-43.
- Zamora M.B.P., Sánchez G.P., Volke H.V.H., Espinosa V.D., Galvis, S.A. 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. *Interciencia*, 30(6): 365-369.
- Zárate B.H., Alonso, M.G., Morales, V. J., Vásquez, A., Benito, P., Arellanes, N. 2017. Caracterización física y química de la corteza de pino para la producción de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en contenedores. *Acta Horticulturae*, 1180: 503-510.
- Zhao, D., Reddy, K.R., Kakani, V.G., Reddy, V.R. 2005. Efectos de la deficiencia de nitrógeno en el crecimiento de las plantas, la fotosíntesis de las hojas y las propiedades de reflectancia hiperespectral del sorgo. *European Journal of Agronomy*, 22: 391-403.
- Zhao-Sen X. y Xiao-Chun W. 2009. Estudios sobre sustratos para el cultivo de arándanos. *Acta Horticulturae*, 810: 513-520.

ANEXOS

Anexo A. Valores de humedad gravimétrica y señal del sensor para la determinación de la posición del sensor.

SUSTRATO A: FIBRA DE COCO

SENSOR (#)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor
INICIAL	5.0	700	5.0	700	5.0	700
1	16.0	513	17.5	503	18.3	497
2	17.0	506	18.0	499	16.8	507
3	17.0	506	16.9	507	18.2	498
4	17.0	506	17.3	504	17.3	504
5	19.8	488	17.4	503	17.1	505
6	17.5	503	17.8	501	17.4	503
7	15.8	514	17.7	501	18.4	497
8	16.3	511	18.2	498	16.9	507
9	16.2	511	17.0	506	17.9	500
10	15.9	514	16.7	508	16.5	509
11	16.8	507	16.4	510	16.8	507
12	16.6	509	16.7	508	17.4	503
13	16.3	510	16.6	509	16.4	510
14	17.5	503	16.6	509	16.6	509
15	17.3	504	16.9	507	16.9	507
16	15.8	515	16.8	507	17.2	505
17	15.9	514	16.5	509	16.4	510
18	16.2	512	16.8	507	17.8	501
19	15.6	516	16.6	509	16.4	510
20	16.6	509	15.7	515	16.3	511
21	16.4	510	16.0	513	16.4	510
22	16.0	513	16.5	509	16.3	511
23	17.5	503	16.3	510	16.4	510
24	15.0	520	15.6	516	16.4	510
25	15.5	517	16.6	509	16.4	510
26	15.3	518	16.0	513	16.4	510
27	16.0	513	15.7	515	17.2	505

SUSTRATO B: TEZONTLE

SENSOR (#)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor
INICIAL	3.0	848	3.0	848	3.0	848
1	16.7	381	20.9	329	19.0	350
2	20.0	339	21.5	322	17.1	375
3	16.3	386	20.1	337	20.5	332
4	19.5	344	18.7	354	20.5	333
5	24.8	292	19.0	350	19.5	344
6	18.7	354	18.2	360	17.1	376
7	19.4	346	16.7	381	19.7	342
8	20.2	336	17.5	370	15.6	397
9	15.1	404	17.0	376	21.5	322
10	18.1	362	18.8	353	7.5	544
11	19.0	350	19.0	350	14.7	411
12	20.4	334	18.5	357	6.5	565
13	19.3	346	17.2	374	8.9	515
14	22.0	317	17.8	365	9.7	498
15	21.8	318	17.1	376	8.9	516
16	19.2	348	16.4	385	9.0	513
17	16.9	377	16.2	388	13.9	423
18	18.2	360	15.2	403	8.4	525
19	12.3	450	20.5	333	4.8	605
20	13.2	435	21.2	325	10.1	492
21	9.9	495	19.6	344	7.5	544
22	17.1	375	18.3	359	10.2	489
23	20.3	335	18.0	363	9.0	513
24	15.2	404	17.8	365	9.2	509
25	16.7	380	16.6	383	7.4	546
26	14.6	412	16.8	380	10.0	493
27	10.2	490	16.5	384	7.8	538

SUSTRATO C: A + PERLITA Y TURBA (1:1:1)

SENSOR (#)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor
INICIAL	4.0	724	4.0	724	4.0	724
1	21.9	471	33.5	373	36.0	359
2	22.8	461	37.0	354	33.6	373
3	21.4	477	30.5	393	32.0	383
4	26.6	423	29.0	404	29.4	401
5	27.9	413	35.1	364	26.1	427
6	24.5	443	24.4	444	30.6	392
7	23.6	452	33.3	374	33.2	375
8	23.1	457	36.8	354	32.4	380
9	21.8	471	32.9	377	36.2	358
10	21.4	477	28.1	411	28.8	405
11	21.3	478	33.3	375	28.5	408
12	20.9	482	21.6	475	25.8	431
13	21.0	481	23.3	455	22.1	469
14	21.1	481	30.7	392	20.9	483
15	21.7	474	21.6	474	25.3	435
16	20.8	484	27.0	419	25.8	430
17	20.8	484	34.6	367	23.2	456
18	21.3	479	23.6	452	27.6	415
19	20.8	484	22.3	466	24.1	447
20	20.8	484	29.4	401	21.0	482
21	20.8	484	20.8	484	23.9	449
22	20.8	484	21.3	477	20.3	491
23	20.8	484	20.0	495	20.1	494
24	20.8	484	20.2	492	20.5	488
25	20.8	484	22.4	465	24.1	446
26	20.8	484	22.1	469	20.5	489
27	20.8	484	20.6	486	22.7	461

SUSTRATO D: 70 % A + 30 % B

SENSOR (#)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor	Humedad volumétrica (%)	Señal del sensor
INICIAL	2.0	1011	2.0	1011	2.0	1011
1	17.6	880	17.3	896	19.7	799
2	21.3	747	20.3	778	18.1	860
3	17.7	878	17.8	871	20.9	758
4	18.6	838	17.1	904	19.0	824
5	21.6	737	19.8	795	18.0	866
6	18.6	840	17.8	872	20.3	778
7	17.5	885	17.5	887	19.5	806
8	21.0	754	21.0	756	18.1	861
9	18.0	865	18.7	837	20.6	769
10	17.5	888	16.9	915	19.4	811
11	20.2	780	19.6	804	17.7	876
12	17.1	902	17.3	894	19.2	816
13	17.5	887	17.0	908	18.0	863
14	21.0	756	17.1	902	16.5	935
15	17.7	876	16.6	927	19.1	819
16	16.6	927	16.9	912	18.6	841
17	19.9	792	19.6	802	17.7	879
18	16.8	919	17.2	897	19.3	813
19	16.4	937	16.3	941	18.3	853
20	17.9	868	18.5	845	17.2	898
21	16.6	929	16.4	937	18.5	845
22	16.8	919	16.2	948	17.3	896
23	19.4	811	16.7	922	16.2	946
24	14.6	1039	16.1	953	18.3	851
25	16.3	942	16.3	945	18.1	858
26	17.1	902	18.6	842	17.4	892
27	13.7	1098	16.5	931	18.6	841

Anexo B. Código de riego

```
#include <TH02_dev.h>
#include <math.h>
#include "Arduino.h"
#include "Wire.h"
const int Sensores = A1;           //Pin de los sensores de maceta
const int ContadorMux[] = {13, 12, 11, 10}; //Pines para el contador BCDMux
const int eVal1= 4;
const int eVal2= 5;
const int eVal3= 6;
const int eVal4= 7;
const int Bt = 4275;              //Bt valor del termistor, SensTemAnalog
const int Rt = 100000;           // Res 100K
byte stLedSF1 = 9;
byte stLedSF2 = 8;
byte sInterrupt1 = 0; // 0 = digital pin 2
byte sInterrupt2 = 1; // 0 = digital pin 2
byte sPin1 = 2;
byte sPin2 = 3;
int retardo = 50;
int maceta;
int LDRvLux;
int LDRlux;
int uv;
float luzUV;
float TempA;
float TempB;
float HumedB;
float cFactor1 = 4.5;
float cFactor2 = 4.5;
float flowRate1;
float flowRate2;
volatile byte pulseCount1;
volatile byte pulseCount2;
unsigned int flowMilliLitres1;
unsigned int flowMilliLitres2;
unsigned long totalMilliLitres1;
unsigned long totalMilliLitres2;
unsigned long oldTime1;
unsigned long oldTime2;

double Light (int RawADC0)
{
  double Vout=RawADC0*0.0048828125;
  int lux=500/(10*((5-Vout)/Vout));//use this equation if the LDR is in the upper part of
the divider
  //int lux=(2500/Vout-500)/10;
```

```

    return lux;
}
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  TH02.begin();
  delay(100);
  int i = 0;
  for ( i = 0; i < 5; i++)
    pinMode(ContadorMux[i], OUTPUT);
  pinMode(eVal1, OUTPUT);
  pinMode(eVal2, OUTPUT);
  pinMode(eVal3, OUTPUT);
  pinMode(eVal4, OUTPUT);
  pinMode(stLedSF1, OUTPUT);
  pinMode(stLedSF2, OUTPUT);
  digitalWrite(stLedSF1, HIGH); // We have an active-low LED attached
  digitalWrite(stLedSF2, HIGH); // We have an active-low LED attached
  pinMode(sPin1, INPUT);
  pinMode(sPin2, INPUT);
  digitalWrite(sPin1, HIGH);
  digitalWrite(sPin2, HIGH);
  pulseCount1    = 0;
  pulseCount2    = 0;
  flowRate1      = 0.0;
  flowRate2      = 0.0;
  flowMilliLitres1 = 0;
  flowMilliLitres2 = 0;
  totalMilliLitres1 = 0;
  totalMilliLitres2 = 0;
  oldTime1       = 0;
  oldTime2       = 0;
  attachInterrupt(sInterrupt1, pulseCounter1, FALLING);
  attachInterrupt(sInterrupt2, pulseCounter2, FALLING);
}
void loop(){
  int i = 0, j=0;
  for ( i = 0; i < 7; i++){
    if((millis() - oldTime1) > 1000) // Only process counters once per second
    {
      detachInterrupt(sInterrupt1);
      flowRate1 = ((1000.0 / (millis() - oldTime1)) * pulseCount1) / cFactor1;
      oldTime1 = millis();
      flowMilliLitres1 = (flowRate1 / 60) * 1000;
      totalMilliLitres1 += flowMilliLitres1;
      unsigned int frac;
      pulseCount1 = 0;
      attachInterrupt(sInterrupt1, pulseCounter1, FALLING);
    }
    if((millis() - oldTime2) > 1000) // Only process counters once per second

```

```

{
detachInterrupt(sInterrupt2);
flowRate2 = ((1000.0 / (millis() - oldTime2)) * pulseCount2) / cFactor2;
oldTime2 = millis();
flowMilliLitres2 = (flowRate2 / 60) * 1000;
totalMilliLitres2 += flowMilliLitres2;
unsigned int frac;
pulseCount2 = 0;
attachInterrupt(sInterrupt2, pulseCounter2, FALLING);
}
for ( j = 0; j < 5; j++){
if ( ( ( i >> j ) & 1 ) == 1 )
digitalWrite(ContadorMux[j], HIGH);
else
digitalWrite(ContadorMux[j], LOW);
}

if (i==0){
maceta= analogRead(Sensores);
//delay(retardo);
if (maceta > 525){
digitalWrite(eVal1,HIGH);}
else if(maceta < 500){
digitalWrite(eVal1,LOW);}
Serial.print(maceta);
Serial.print(",");
delay(retardo);}
else if (i==1){
maceta= analogRead(Sensores);
//delay(retardo);
if (maceta > 480){
digitalWrite(eVal2,HIGH);}
else if(maceta < 329){
digitalWrite(eVal2,LOW);}
Serial.print(maceta);
Serial.print(",");
delay(retardo);}

else if (i==2){
maceta= analogRead(Sensores);
//delay(retardo);
if (maceta > 475){
digitalWrite(eVal3,HIGH);}
else if(maceta < 330){
digitalWrite(eVal3,LOW);}
Serial.print(maceta);
Serial.print(",");
delay(retardo);}
else if (i==3){
maceta= analogRead(Sensores);

```



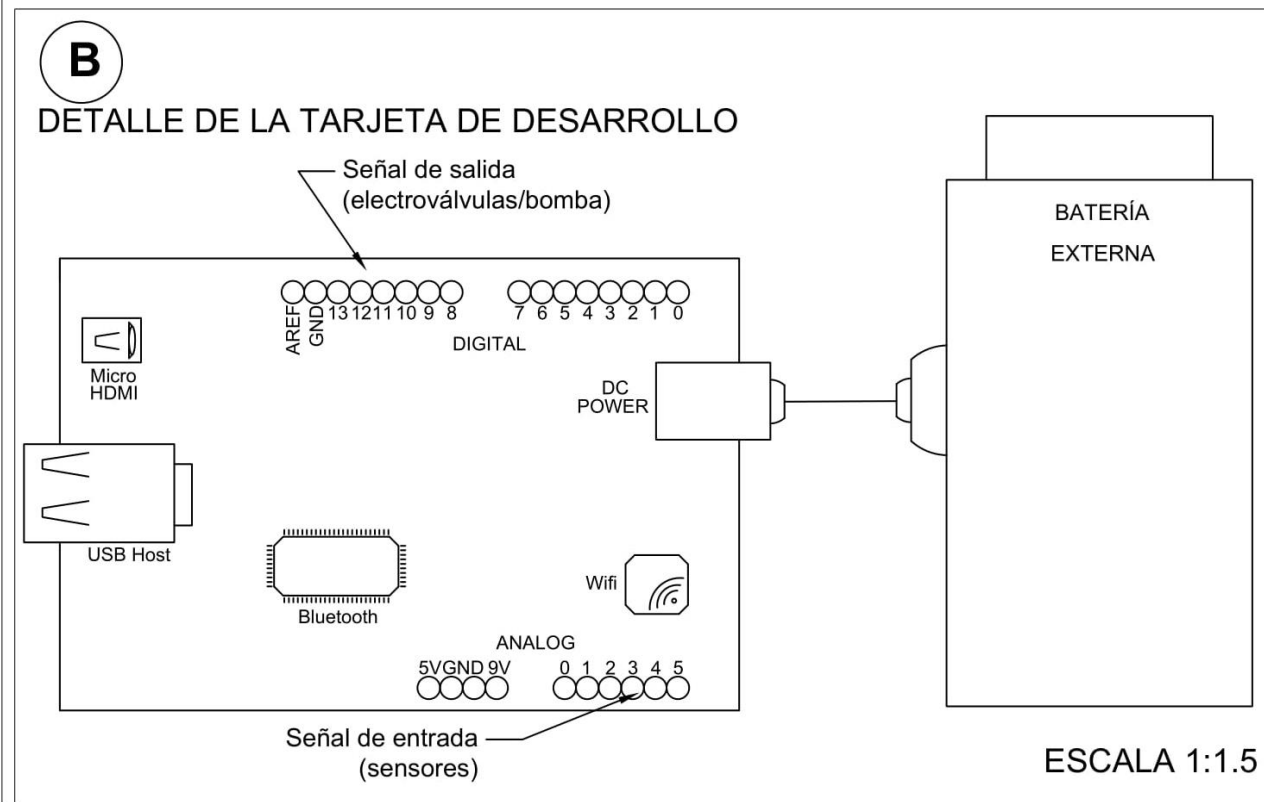
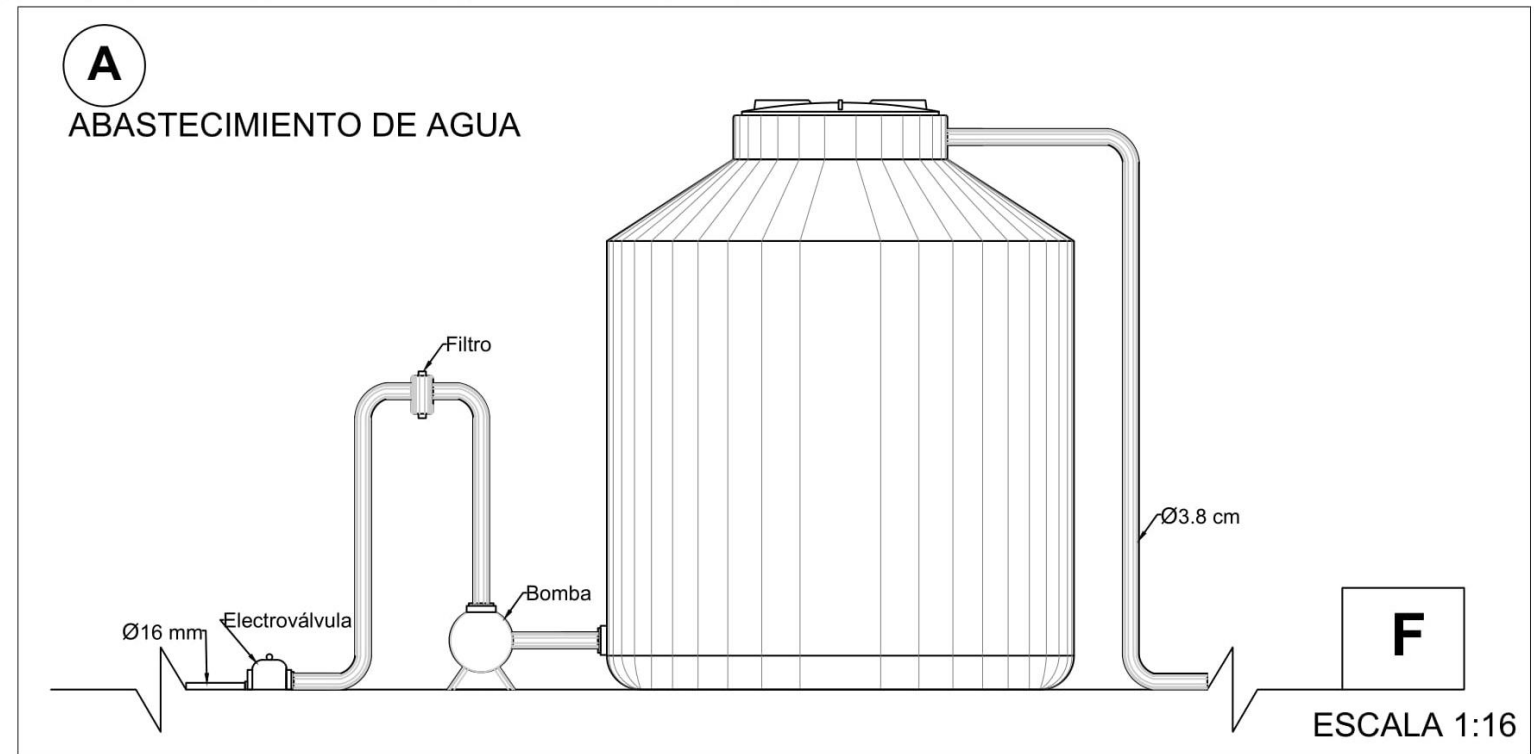
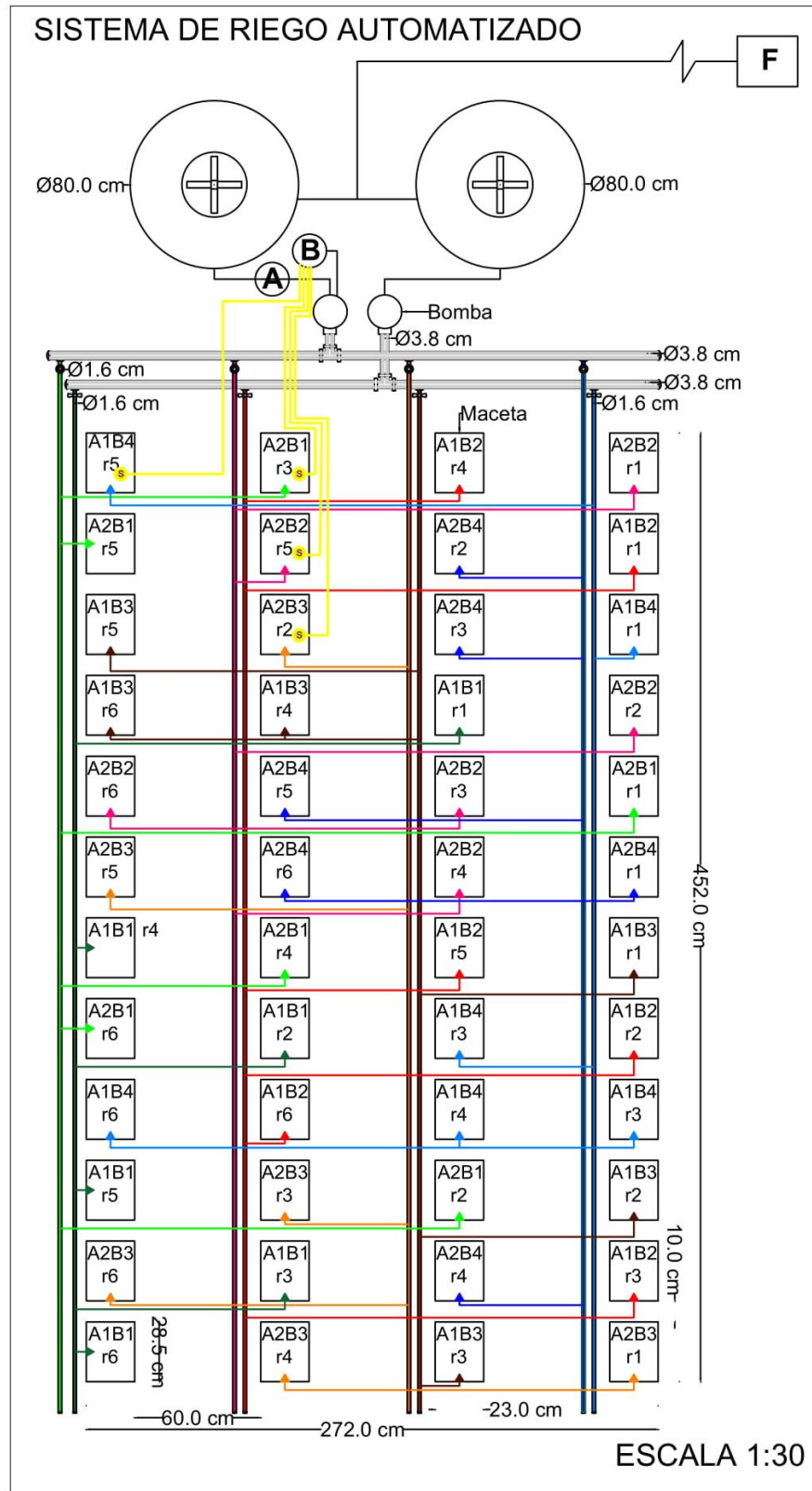
```

        //delay(retardo);
        if (maceta > 850){
            digitalWrite(eVal4,HIGH);}
        else if(maceta < 665){
            digitalWrite(eVal4,LOW);}
        Serial.print(maceta);
        Serial.print(",");
        delay(retardo);}
else if(i<5){
    long sum=0;
    for(int i=0;i<10;i++)// accumulate readings for 1024 times
    {
        uv=analogRead(Sensores);
        sum=uv+sum;
        delay(2);
    }
    long meanVal = sum/10; // get mean value
    Serial.print((meanVal*1000/4.3-83)/21);
    Serial.print(",");}
else if(i<6){
    Serial.print(int(Light(analogRead(Sensores))));
    Serial.print(",");
    delay(retardo);}
else{
    int T analog=analogRead(Sensores);
    float R = 1023.0/T analog-1.0;
    R=Rt*R;
    TempA=(1.0/(log(R/Rt)/Bt+1/298.15)-273.15);
    Serial.print(TempA);
    Serial.print(",");
    delay(retardo);
    TempB = TH02.ReadTemperature();
    HumedB = TH02.ReadHumidity();
    Serial.print(TempB);
    Serial.print(",");
    delay(retardo);
    Serial.print(HumedB);
    Serial.print(",");
    delay(retardo);
    Serial.print(int(flowRate1)); // Print the integer part of the variable
    Serial.print(",");
    delay(retardo);
    Serial.print(totalMilliLitres1);
    Serial.print(",");
    delay(retardo);
    Serial.print(int(flowRate2)); // Print the integer part of the variable
    Serial.print(",");
    delay(retardo);
    Serial.println(totalMilliLitres2);}
}

```

```
}  
void pulseCounter1()  
{  
  // Increment the pulse counter  
  pulseCount1++;  
}  
void pulseCounter2()  
{  
  // Increment the pulse counter  
  pulseCount2++;  
}
```

Anexo C. Plano del sistema de riego automatizado para cultivo de arándano en sustrato.



SIMBOLOGÍA

- F Fuente de abastecimiento de agua
- Línea principal tubería PVC Ø 1 1/2"
- Línea secundaria A1B1 manguera polietileno Ø16 mm
- Línea secundaria A1B2 manguera polietileno Ø16 mm
- Línea secundaria A1B3 manguera polietileno Ø16 mm
- Línea secundaria A1B4 manguera polietileno Ø16 mm
- Línea secundaria A2B1 manguera polietileno Ø16 mm
- Línea secundaria A2B2 manguera polietileno Ø16 mm
- Línea secundaria A2B3 manguera polietileno Ø16 mm
- Línea secundaria A2B4 manguera polietileno Ø16 mm
- Regante A1B1 manguera polietileno Ø16 mm
- Regante A1B2 manguera polietileno Ø16 mm
- Regante A1B3 manguera polietileno Ø16 mm
- Regante A1B4 manguera polietileno Ø16 mm
- Regante A2B1 manguera polietileno Ø16 mm
- Regante A2B2 manguera polietileno Ø16 mm
- Regante A2B3 manguera polietileno Ø16 mm
- Regante A2B4 manguera polietileno Ø16 mm
- ⊗ Electroválvula Ø16 mm
- ⊗ Válvula de bola Ø16 mm
- S Sensor capacitivo de humedad del suelo
- Conexión del sensor a la tarjeta de desarrollo
- Maceta 23 x 28.5 x 30 cm
- ⊙ Bomba para riego

<p>COLEGIO DE POSTGRADUADOS CAMPUS MONTECILLO EDAFOLOGÍA ÁREA DE NUTRICIÓN VEGETAL</p>			
<p>AUTOMATIZACIÓN DEL RIEGO EN ARÁNDANO A PARTIR DE LAS PROPIEDADES DEL SUSTRATO</p>			
UBICACIÓN: COLEGIO DE POSTGRADUADOS	FECHA: 29-09-2019	ACOTACIONES: cm	No. DE PLANO: 1 DE 1
ELABORÓ: Nuria Aide López Hernández	REVISÓ: Dr. Prometeo Sánchez G., Dr. Manuel Sandoval V., Dr. Vicentín Espinoza Hdez., Dr. Mario A. Vázquez P.	APROBÓ:	