

Universidad de Costa Rica

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

*INFORME FINAL DE PRÁCTICA DIRIGIDA DE GRADUACIÓN
SOMETIDA A CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA
QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA*

Práctica final de graduación

*ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE FERTIRRIEGO,
ABONADO POR BIOCHAR, CON USO DE ENERGÍA SOLAR Y
CONTROL AUTOMÁTICO, PARA PRODUCTORES DE REGIONES
RURALES DE COSTA RICA EN UNA ZONA DE ESTUDIO*

Ana Elena Quesada Solís

San José, 2021

Estudio de prefactibilidad técnica y financiera para la implementación de un sistema integrado de fertirriego, abonado por biochar, con uso de energía solar y control automático, para productores de regiones rurales de Costa Rica en una zona de estudio.

Informa Final de Práctica dirigida de graduación presentada ante la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

Sustentante:

Ana Elena Quesada Solís

Tribunal examinador:

<hr/> <p>M.Sc. Adolfo Ulate Brenes Profesor Escuela de Ingeniería Química</p>	Presidente del tribunal
<hr/> <p>Ing. Esteban Richmond Salazar Docente Escuela de Ingeniería Química</p>	Director del proyecto
<hr/> <p>Ing. Luis Urvina Savelli Docente Escuela de Ingeniería Química</p>	Miembro lector
<hr/> <p>Ing^a. Adriana Araya Díaz Docente Escuela de Ingeniería Química</p>	Miembro lector
<hr/> <p>Ing^a. Natalia Montero Rambla Docente Escuela de Ingeniería Química</p>	Miembro lector

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a mi abuela, que me ha regalado tanto amor y me ha enseñado a sonreír siempre.

Le dedico este trabajo a mis papás, a quienes le debo en gran parte quien soy, lo que he logrado y lo que sueño.

Y dedico este trabajo y esfuerzo a mis amigos, novio y familia que me han cobijado con tanto cariño, amor y fuerza para lograr lo que me propongo.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Luis Urvina, Ing. Esteban Richmond e Ing. Adriana Araya, por la guía, consejos y apoyo en todo el proceso del desarrollo del proyecto.

Al Ing. Marco Chaves, por haberme dado la oportunidad de trabajar en este proyecto, y por el apoyo y guía dados durante este año.

Al Ing. Jorge Benavides, por el asesoramiento, consejos y disponibilidad cuando la necesitaba.

A Carlos Ramírez, profesor del Tecnológico de Costa Rica en la sede de San Carlos, por su asesoramiento y guía en el tema de fertirriego. Un profundo agradecimiento al Ing. Marco Villalta y a la Ing. Adriana Rojas, por los consejos, guía, amistad y tiempo, para el desarrollo óptimo del proyecto.

A mi familia y amigos, por impulsarme y abrazarme en todo momento del proceso, y apoyarme para que este proyecto saliera bien.

En especial a mis amigos de la universidad, por los que agradezco cada momento que puedo. Hicieron que todo este camino de carrera fuera lo mejor, que a pesar de la frustración de los cursos siempre estábamos juntos para apoyarnos y espero que lo sigamos estando.

A todos los profesores de mi carrera, de los cuales aprendí un montón y estaré siempre agradecida.

RESUMEN

Esta práctica tiene como objetivo diseñar y realizar un análisis financiero a un sistema de fertirriego abonado con biochar, con control automático e impulsado por energía solar para sostener la producción de cultivos, específicamente culantro, en un invernadero de un productor pequeño en la zona de Santiago, San Ramón.

El proyecto conlleva varias etapas de diseño, por lo que se inició determinando las características generales del volumen de control. Para esto se buscaron las condiciones ambientales de la zona (como radiación, pluviometría, temperaturas, etc.), se realizó un estudio de suelos, tanto químico como físico, se buscó de forma teórica los aspectos generales del culantro, la legislación respectiva y el acomodo preliminar de los cultivos en el terreno. Posterior a esto se realizó la investigación para caracterizar de forma teórica el biochar que se obtendría en el proceso y así analizar su impacto en el suelo y cultivo.

Conociendo los aspectos generales de trabajo para el carbonizador, como es el uso de leña y la elección de un proceso de carbonización, se dimensionó el carbonizador, teniendo un altura y un diámetro de 0.97 m y 75.5 cm. Este se planteó construir a partir de acero y hierro. Y para la obtención de la totalidad de biochar se deben realizar tres tandas de producción, obteniendo una totalidad de aproximadamente de 65 kg de biochar.

A partir de las necesidades hídricas y nutricionales del cultivo, las características del biochar y las condiciones del suelo se realizó un modelado del volumen de control en MATLAB. Con esto se obtuvo una curva de concentración de cada nutriente (N, K, Mg, S y Ca) y un comportamiento de la humedad en el suelo. En el primero se observó un incremento de los nutrientes en el suelo, lo que confirma, de forma teórica, que se nutre sin deficiencia al cultivo. Pero se realizó un análisis químico al biol, y con las concentraciones nutricionales experimentales, el modelado presentó de la misma forma un incremento de los nutrientes, a diferencia del nitrógeno, que se debe suplir al volumen de control. Y en el segundo se obtiene los requerimientos hídricos diarios para los ciclos del cultivo a lo largo del año, identificando la mayor necesidad, de $0.44 \text{ m}^3/\text{d}$, el valor con el que se diseña el sistema hidráulico.

Para el diseño del sistema hidráulico se determinaron todos los equipos y dimensiones de tubería. El sistema involucra el tanque de almacenamiento, la bomba, dos filtros (uno de arena y otro de discos), una etapa de inyección de fertilizantes y demás accesorios. Conociendo los datos generales de cada equipo se calcularon las pérdidas de carga totales, siendo de 7.36 m, y con esto se calculó la potencia necesaria para impulsar el sistema, de 9.43 W.

Para el sistema de control automático se generó un algoritmo que se adapta a las necesidades del cultivo y del productor. Se diseñó un sistema con sensores de humedad en cada sección de riego y un sensor de nivel en el tanque de almacenamiento, que mediante un controlador acciona la bomba y las electroválvulas, tanto de las secciones de riego como del tanque. Esto se diseñó para $\approx 2 \text{ h}$ de riego al día, siendo previsto para la tarde.

A partir de los equipos del sistema de control automático y la bomba se detalla el requerimiento energético del sistema, de 18.2 Wh/d, con un voltaje de 24 V. Con este valor y la irradiancia de la zona se diseña un módulo de un panel solar de 115 W, con un regulador de carga y dos baterías en serie.

Finalmente, conociendo los detalles de todo el sistema se realiza el análisis financiero. Para este caso, se desarrolló un estudio clase II, con un horizonte de tiempo de cinco años. Primero se cotizaron todos los equipos, después se realizó el desglose de costos indirectos y directos y finalmente se construyó el flujo de caja. Para este sistema se decidió plantear tres escenarios de estudio: el sistema completo, el sistema impulsado por energía eléctrica (cableado) y el sistema sin carbonizador. En los tres casos se obtuvo una rentabilidad mayor al escenario base, siendo el escenario más rentable el segundo, seguido del primer y el tercero, con un VAN de (2 108 107, 1 877 875 y 1 813 346) CRC respectivamente. Asimismo se realizó un análisis de sensibilidad para el primer caso, donde se obtuvo un gran impacto al variar el rendimiento y el precio del culantro, y el costo de la mano de obra.

Se concluye que cualquiera de los tres escenarios planteados son favorecedores contra el escenario base (cultivo actual). El escenario más rentable es el sistema completo impulsado por energía eléctrica mediante la extensión de la instalación, obteniendo un VAN mayor. Asimismo se resalta el beneficio del uso del carbonizador, resultando un VAN un poco mayor en el caso en el que se aplica biochar, y es posible aumentar su rendimiento si se obtiene un precio de construcción menor.

Se recomienda recopilar información sobre absorción de nutrientes y requerimiento hídrico de otros cultivos para evaluar el modelo en el programa MATLAB, e identificar posibles variaciones del diseño. Asimismo, se recomienda realizar una caracterización adecuada al biochar para determinar diferencias con los valores teóricos y comportamiento real en el sistema. Y finalmente se recomienda realizar un análisis foliar el culantro en distintas etapas del desarrollo, esto para determinar deficiencias o exceso de nutrientes en su producción.

ÍNDICE

	<i>Página</i>
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vii
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Alcance del proyecto	1
1.2 Objetivo general y específicos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2	
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 Fertirriego	5
2.1.1 Suelo	6
2.1.2 Agua	8
2.1.3 Fertilizantes	10
2.2 Biochar	13
2.3 Diseño de fertirriego	14
2.3.1 Información básica	16
2.3.2 Estimación de flujo	17
2.3.3 Dinámica de fluidos	18
2.3.4 Selección bomba	20
2.4 Control automático	21
2.5 Energía solar	22
2.6 Estudio técnico y financiero	24

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA ZONA DE ESTUDIO	27
3.1 Metodología	27
3.2 Información general	28
3.3 Actividad agrícola actual	28
3.4 Datos climatológicos	29
3.5 Detalles agronómicos	31
3.5.1 Cultivo	31
3.5.2 Evapotranspiración	34
3.5.3 Requerimiento hídrico	35
3.6 Espaciado del cultivo	38
3.6.1 Espaciado y acomodo de cultivos	38
3.7 Análisis de suelos	39
3.7.1 Textura	40
3.7.2 Curva de retención de humedad	41
3.7.3 Densidad aparente	42
3.7.4 Conductividad hidráulica	42
3.7.5 Análisis químicos	42
3.8 Agua de riego	44
3.8.1 Parámetros	44
3.8.2 Disponibilidad	47
3.9 Capacidad del sistema	47
3.10 Legislación	47
3.11 Necesidad de fertilizantes	48

CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS DEL BIOCHAR Y BALANCES DE MASA DEL VOLUMEN DE CONTROL	49
4.1 Metodología	49
4.2 Caracterización del biochar	49
4.3 Análisis dinámico del volumen de control	53

CAPÍTULO 5	
DISEÑO DEL CARBONIZADOR	61
5.1 Metodología	61
5.2 Diseño del carbonizador	61
CAPÍTULO 6	
DISEÑO DEL SISTEMA DE FERTIRRIEGO	67
6.1 Metodología	67
6.2 Diseño sistema de tuberías	68
6.3 Simulación de sistema de tuberías	76
CAPÍTULO 7	
DISEÑO SISTEMA CONTROL AUTOMÁTICO	83
7.1 Metodología	83
7.2 Sistema control automático	83
CAPÍTULO 8	
DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	91
8.1 Metodología	91
8.2 Sistema generación fotovoltaica	91
CAPÍTULO 9	
ESTUDIO FINANCIERO DEL SISTEMA	97
9.1 Metodología	97
9.2 Estudio financiero	97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109
7.1 Conclusiones	109
7.2 Recomendaciones	111
NOMENCLATURA	113
BIBLIOGRAFÍA	117
APÉNDICES	123

A	DATOS TEÓRICOS	123
B	RESULTADOS INTERMEDIOS	126
C	MUESTRA DE CÁLCULO	138
C.1	Cálculos diseño carbonizador	138
C.2	Cálculos de aplicación de fertilizantes	140
C.3	Cálculos del sistema hidráulico	142
C.4	Cálculos de la cantidad de paneles	144
C.5	Cálculos de los indicadores financieros	145
ANEXOS		147
A	Código de MATLAB para el modelado matemático	147
A.1	Balance en el suelo	147
A.2	Balance en biochar	147
A.3	Ecuaciones nutrientes y agua del biochar	148
A.4	Documento del main de MATLAB	148
B	Algunas cotizaciones	149
C	Fichas técnicas algunos equipos	150

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Influencia de la calidad del agua en el taponamiento de emisores del sistema de goteo citado por Ahmad y Ajaz (2013). . .	9
Cuadro 2	Datos climatológicos de la zona, fuente NASA POWER. .	29
Cuadro 3	Datos climatológicos de la zona obtenidos por NASA POWER (2019)	30
Cuadro 4	Datos de precipitación mensuales en la zona obtenidos por NASA POWER (2015-2019).	30
Cuadro 5	Datos de radiación y horas luz para la zona de estudio, obtenidas de NASA POWER	32
Cuadro 6	Datos de evapotranspiración calculados con Cropwat 8.0 .	35
Cuadro 7	Resultados de análisis físicos de suelos de dos muestras realizados por el CIA.	41
Cuadro 8	Resultados de análisis químicos de suelos de dos muestras realizados por el CIA.	44
Cuadro 9	Parámetros generales del efluente del biodigestor.	46
Cuadro 10	Parámetros generales del análisis de tipo químico completo realizado al biol.	47
Cuadro 11	Límites máximos permisibles para el reuso de aguas residuales tratadas de Tipo 3	48
Cuadro 12	Valores de concentración elemental en el biochar reportado en literatura (Abenza, 2012).	51
Cuadro 13	Requerimiento energético de los distintos componentes del sistema y tiempo de uso.	92
Cuadro 14	Desglose de la cotización de los equipos y piezas utilizados, y sus unidades, para el primer escenario.	101
Cuadro 15	Depreciación de la mayoría de equipos por el método lineal y su totalidad.	102
Cuadro 16	Desglose de los costos directos e indirectos adicionales del sistema para los tres escenarios, así como la inversión inicial total.	102

Cuadro 17	Flujo de caja para el primer escenario.	103
Cuadro 18	Flujo de caja para el segundo escenario.	104
Cuadro 19	Flujo de caja para el tercer escenario.	105
Cuadro 20	Análisis de sensibilidad para el primer escenario.	108
Cuadro A.1	Comportamiento de humedad en base seca del culantro en su desarrollo, construido a partir del rendimiento húmedo dado en (Soto-Bravo y Moreno, 2019).	123
Cuadro A.2	Rendimiento de la materia seca del culantro en su desar- rollo (Soto-Bravo y Moreno, 2019).	123
Cuadro A.3	Datos de absorción de nitrógeno por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).	124
Cuadro A.4	Datos de absorción de fósforo por parte del culantro (Soto- Bravo y Moreno, 2019).	124
Cuadro A.5	Datos de absorción de calcio por parte del culantro (Soto- Bravo y Moreno, 2019).	124
Cuadro A.6	Datos de absorción de magnesio por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).	125
Cuadro A.7	Datos de absorción de azufre por parte del culantro (Soto- Bravo y Moreno, 2019).	125
Cuadro A.8	Datos de absorción de potasio por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).	125
Cuadro B.9	Datos y resultados generales de los cálculos obtenidos del diseño agronómico (metodología de Carrazón Alocen (2007)	126
Cuadro B.10	Datos y resultados generales de los cálculos obtenidos del diseño del carbonizador.	127
Cuadro B.11	Datos de requerimiento hídrico del suelo obtenido me- diante vectores en MATLAB, para el primer, segundo, tercer y cuarto ciclo.	128
Cuadro B.12	Continuación Cuadro de datos de requerimiento hídrico del suelo obtenido mediante vectores en MATLAB, para el primer, segundo, tercer y cuarto ciclo.	129

Cuadro B.13	Datos de requerimiento hídrico del suelo obtenido mediante vectores en MATLAB para el quinto, sexto y séptimo ciclo.	130
Cuadro B.14	Continuación Cuadro de datos de requerimiento hídrico del suelo obtenido mediante vectores en MATLAB para el quinto, sexto y séptimo ciclo.	131
Cuadro B.15	Datos del requerimiento de nitrógeno diario a lo largo del ciclo, con base a los parámetros del análisis del biol.	132
Cuadro B.16	Especificaciones del tanque de almacenamiento del biol o agua de riego.	133
Cuadro B.17	Diseño de sección de inyección de fertilizantes, para dos posibles fertilizantes solubles entre sí. Utilizando la metodología dada por Yara (2020).	134
Cuadro B.18	Datos de descarga y diseño del sistema de fertirriego	135
Cuadro B.19	Resultados y valores utilizados para los cálculos del sistema hidráulico.	136
Cuadro B.20	Pérdidas de carga en la tubería y potencia necesaria para impulsar el sistema.	137
Cuadro B.21	Datos para determinar la NPSHd del sistema.	137
Cuadro B.22	Datos generales de pérdida energética para el diseño del sistema de generación fotovoltaica.	138
Cuadro B.23	Datos generales del sistema fotovoltaico	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Orden de eficiencia según tipo de sistema de irrigación (Ahmad y Ajaz, 2013).	6
Figura 2	Comportamiento de la zona húmeda según el tipo de suelo: arcilloso (heavy), intermedios (médium) y arenosos (light) (Ahmad y Ajaz, 2013).	7
Figura 3	Evapotranspiración acumulada en el tiempo para distintas aplicaciones de agua (De Tafur <i>et al.</i> , 2014).	33
Figura 4	Absorción de nutrientes del culantro coyote según sección de la planta (Bertsch, 2009).	34
Figura 5	Curvas de extracción nutrimental de N, P y K de <i>Coriandrum sativum</i> Pakistan irrigado con solución nutritiva (Cruz Crespo <i>et al.</i> , 2017).	34
Figura 6	Diagrama de distribución y dimensiones del invernadero utilizando como unidad metros (elaboración propia).	39
Figura 7	Esquema de balance de masa de agua y nutrientes en la planta.	55
Figura 8	Esquema de balance de masa de agua y nutrientes en el suelo.	55
Figura 9	Esquema de balance de masa de agua y nutrientes en el biochar.	55
Figura 10	Diagrama general del carbonizador portátil y sus distintas secciones (Pérez Martínez, 2015)	63
Figura 11	Carbonizador ya puesto en marcha (Pérez Martínez, 2015)	63
Figura 12	Distintas secciones y dimensiones del carbonizador (Elaboración propia).	65
Figura 13	Gráfico de MATLAB de contenido de agua en el suelo, en biochar y en planta a lo largo del tiempo para el primer ciclo de cultivo.	69

Figura 14	Gráfico de MATLAB de contenido de nutrientes en el suelo a lo largo del tiempo para el primer ciclo de cultivo, utilizando parámetros teóricos del biol.	70
Figura 15	Gráfico de MATLAB de contenido de nutrientes en el suelo a lo largo del tiempo para el primer ciclo de cultivo, utilizando los parámetros experimentales del biol.	70
Figura 16	Gráfico de MATLAB de contenido de nutrientes en el suelo a lo largo del tiempo para el primer ciclo de cultivo, con el biol diluido en una proporción 2:1.	71
Figura 17	Esquema de equipos y accesorios del diseño del sistema hidráulico de la línea principal.	73
Figura 18	Simulación en Comsol de la presión en todo el sistema de tuberías utilizando un esquema de colores, y con una escala en Pa.	77
Figura 19	Barrido paramétrico en Comsol de la presión a lo largo de toda la tubería hasta llegar al primer gotero en la primera línea, cada color representa un caudal distinto.	77
Figura 20	Simulación en Comsol de la velocidad en todo el sistema de tuberías utilizando un esquema de colores y dirección del fluido.	78
Figura 21	Simulación en Comsol de la velocidad a lo largo de la tubería hasta llegar al primer gotero de la primera línea.	78
Figura 22	Simulación en Comsol de la velocidad a lo largo de la tubería hasta llegar al último gotero de la última línea.	79
Figura 23	Simulación en Comsol de la presión en una rama del sistema de tuberías utilizando un esquema de colores.	80
Figura 24	Simulación en Comsol de la velocidad en una rama del sistema de tuberías utilizando un esquema de flechas y colores.	81
Figura 25	Relación presión caudal para los goteros marca Irritec, cinta P0.Dada por la ficha técnica.	81
Figura 26	Algoritmo de control automático para el escenario en el que se utilizan electroválvulas.	85

Figura 27	Algoritmo de control automático para el escenario en el que no se utilizan electroválvulas.	86
Figura 28	Diagrama P&ID del sistema de riego, mostrando los circuitos de nivel de agua y humedad en el suelo (ambas zonas). . . .	89
Figura 29	Controlador de carga marca Victron seleccionado para el diseño.	94
Figura 30	Batería AGM de ciclo profundo marca Victron.	95
Figura 31	Gráfico que muestra las diferencias en costos de distintos parámetros para los tres escenarios, valores dados en un año de flujo de caja.	106
Figura 32	Código de MATLAB para el balance del suelo.	147
Figura 33	Código de MATLAB para el balance en el biochar.	147
Figura 34	Código de MATLAB para el las ecuaciones que marcan el comportamiento del agua y nutrientes en el biochar.	148
Figura 35	Código de MATLAB para el documento central.	148
Figura 36	Cotización equipos del sistema de control automático, empresa Elvatron.	149
Figura 37	Cotización de los costos de la instalación eléctrica para el escenario 2, dada por la empresa Coselectrica.	149
Figura 38	Cotización del carbonizador a un taller de soldadura.	150
Figura 39	Ficha técnica del controlador marca Allen Bradley para el sistema de control automático.	150
Figura 40	Ficha técnica del panel solar utilizado para el sistema fotovoltaico.	151
Figura 41	Ficha técnica del sensor de humedad Watermark que se utilizará en el sistema.	151
Figura 42	Ficha técnica del regulador de carga marca Victron utilizado para el sistema fotovoltaico.	152

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Alcance del proyecto

El panorama actual de Costa Rica en cuanto al uso del recurso hídrico resulta ser muy positivo, el país cuenta con una gran cantidad de fuentes hídricas cuyo potencial ha sido trabajado. Este recurso ha sido aprovechado a lo largo de los años, no solamente en el abastecimiento de las comunidades y ciudades, sino también en la generación de electricidad mediante plantas hidroeléctricas. A raíz del cambio climático, principalmente, que ya está mostrando sus efectos en el mundo, esta alta dependencia en el agua se ve como una amenaza. Ya el ICE y otras entidades observan como en las épocas secas, y con fenómenos ambientales como El Niño, disminuye la disponibilidad del agua tanto para abastecimiento como para generación eléctrica (Herrera Murillo, 2019). Por esta razón es necesario explotar otros recursos energéticos limpios, y dentro estos se encuentra la energía solar. La energía solar en el país es la menos explotada, teniendo una potencial identificado de 576 MW solamente se ha instalado el 5 % de este, por lo que hay que trabajar por desarrollar más este recurso y hacerlo asequible a toda la población (ICE, 2019).

Este proyecto integrado de fertirriego y energía solar viene a proponer una solución al problema de uso excesivo de recursos. El enfoque del fertirriego es disminuir el uso de agua utilizada para irrigar, reduciéndola al mínimo. Funciona de la misma manera con los fertilizantes, se busca entregar a los cultivos solamente lo necesario y de forma constante para asegurar un óptimo crecimiento de estos, evitando posible contaminación en el suelo, erosión de este y desperdicio de fertilizantes. La adición del sistema fotovoltaico busca sostener el sistema de riego de forma continua, utilizando un recurso energético presente y así no depender de fuentes energéticas externas. En sí, todo el sistema busca una óptima utilización de recursos, un desarrollo sostenible y abaratamiento de los costos para el beneficio de los productores.

Aunado a esto, se busca realizar un estudio para el uso de biochar como enmienda

del suelo y con esto buscar un modelo más orgánico y circular. Mediante el uso de biomasa residual de fincas y un carbonizador se puede producir biocarbón o biochar, y este producto tiene altos beneficios en la calidad del suelo y en la retención de carbono. El biochar es producto promesa contra el cambio climático, logrando reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 30 % (Abenza, 2012). Lo logra mediante el uso de biomasa, evitando su descomposición natural, y mediante la retención de los gases en el suelo. El biochar, a parte de los beneficios ambientales, reduce el consumo de fertilizantes externos, lo que favorece la economía de los productores. Para lograr un diseño adecuado del carbonizador es necesario aplicar los conocimientos en ingeniería química en cuanto a diseño de reactores de combustión, reacciones químicas del proceso, elección de tratamientos y determinar los parámetros de funcionamiento para obtener buena calidad y cantidad de biochar.

El proyecto tiene un enfoque social alto, ya que busca impulsar organizaciones en zonas remotas o que necesitan de apoyo externo, para un mejor desarrollo comunitario. El proyecto es financiado por una ONG (en contrapartida con un monto de las organizaciones), por lo que es importante mencionar la agenda, en relación a los objetivos de desarrollo sostenible, de la organización. La ONU, en su Agenda 2030, plantea 17 objetivos de desarrollo sostenible, entre estos se menciona la erradicación de la pobreza, garantizar disponibilidad y gestión sostenible de agua, asegurar acceso a energías asequibles y sostenibles, fomentar el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible y tomar medidas para combatir el cambio climático. Todos estos aspectos son ejes para impulsar la mejoría de las comunidades en específico, que incorpora tanto el área ambiental, como económica y social(ONU, 2015).

De la misma forma este proyecto busca facilitar y optimizar el sistema de riego mediante un sistema automático, este debe solventar problemáticas que se den en el campo sin necesidad de un operario que esté vigilando constantemente el riego. Se reduce el rango de error y se reducen costos en cuanto a operarios. Se debe elegir una estrategia de control que se adapte al problema en curso, mediante un entendimiento a fondo las perturbaciones del sistema, las variables controladas, valor de referencia y variables manipuladas. En resumen, el diseño completo del proyecto

incorpora muchas áreas de conocimiento de ingeniería química, y como estudiante esta es una propuesta para lograr aplicar los conocimientos teóricos en la práctica. El proyecto busca utilizar los conocimientos de ingeniería química como una mejora a las actividades de las comunidades, mediante la productividad y optimización del sistema aspirando a un desarrollo sostenible.

1.2 Objetivo general y específicos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar la prefactibilidad técnica y financiera para la implementación de un sistema integrado de fertirriego, abonado por biochar, con uso de energía solar y control automático, para productores de regiones rurales de Costa Rica en una zona de estudio.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Analizar las condiciones ambientales del volumen de control sobre el que habrá incidencia del sistema propuesto.
2. Estimar el impacto del biochar como enmienda del suelo en el volumen de control.
3. Diseñar un carbonizador para la producción de biochar en la zona.
4. Diseñar el sistema de fertirriego a partir del análisis del volumen de control.
5. Diseñar el sistema de generación fotovoltaica para suplir las necesidades del sistema de bombeo y servicios auxiliares y las condiciones del volumen de control.
6. Realizar un diseño de sistema de control automático para el sistema de fertirriego.
7. Elaborar un estudio financiero del sistema de fertirriego alimentado por energía solar, para un horizonte de tiempo de cinco años.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Fertirriego

El riego constante de agua se volvió una necesidad en muchas zonas del mundo para lograr sostener una demanda alta de cultivos. En muchos países y zonas, la lluvia no es un factor único con el que se puede depender para hidratar y permitir el crecimiento de los cultivos, principalmente en zonas áridas. Por esta razón, a lo largo de los años se han desarrollado tecnologías de riego con mejor diseño y más precisión, buscando una mayor eficiencia en la entrega de agua y nutrientes a los cultivos. La eficiencia con la que se entrega el agua depende de dos tipos: eficiencia de transporte y eficiencia en la aplicación en los campos. La más importante de estudiar es la eficiencia de aplicación en los campos, ya que con un buen sistema de tubería y bombeo la eficiencia de transporte alcanza casi el 100 %. Se ha estudiado cómo los tipos de riego determinan la eficiencia de aplicación de agua en el campo. El riego por inundación, que es el riego convencional, es el menos efectivo de todos. Y, por otro lado, el riego por goteo es el más efectivo en la entrega de agua. En la Figura 1, se puede observar la eficiencia según el tipo de riego (Ahmad y Ajaz, 2013). El riego por goteo ha logrado reducir el uso de agua hasta en un 50 % y ha aumentado la eficiencia de 25 % a 30 % en términos de uso de fertilizantes (Rivera *et al.*, 2020).

Ahora, si junto con este tipo de riego se busca también suplir a los cultivos con nutrientes, los cuales pueden escasear en la tierra (ya sea por erosión o mal manejo del suelo), aún se alcanza una mayor eficiencia. El fertirriego es un mecanismo de riego de agua y de distribución de fertilizantes (líquidos, solubles o semisolubles en agua) mediante un sistema de tuberías que se diseña generalmente para un riego de goteo. La principal ventaja de este tipo de riego es lograr una reducción en el uso excesivo de recursos, abarcando estos el uso de agua y fertilizantes. Un diseño bien elaborado del sistema toma en cuenta las necesidades de la planta en cada



Figura 1. Orden de eficiencia según tipo de sistema de irrigación (Ahmad y Ajaz, 2013).

etapa de crecimiento, el tipo de suelo y la permeabilidad del agua en este, el clima, la evapotranspiración, y demás datos externos, que definen la cantidad de agua y fertilizantes a proveer. Si el diseño no incluye todos estos aspectos puede resultar más bien en un daño hacia los cultivos (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

2.1.1 Suelo

El suelo, junto con el cultivo a desarrollar, son los principales indicadores para determinar los fertilizantes a utilizar. El suelo posee muchas características que deben definirse previo a esta elección: el régimen hídrico, régimen de aireación, distribución de raíces, acidez y distribución de sales y nutrientes y otros factores.

La distribución del agua en el suelo se rige mediante las fuerzas de gravedad y de capilaridad. Para el caso del riego por goteo la distribución en un volumen de suelo se da tanto de forma horizontal como vertical, a diferencia de por aspersión o inundación que es principalmente vertical. La capacidad de movimiento también depende en parte de la compactación del suelo y tipo de material de este. En suelos arcillosos hay mayor retención que en suelos arenosos; así que la transferencia de agua se debe controlar por la velocidad y periodos de riego (a menor velocidad mayor profundidad), tomando en cuenta los aspectos mencionados (Kafkafi y Tarchitzky, 2012). En la Figura 2 se puede observar el comportamiento del agua y su distribución según el tipo de suelo: arcillosos (heavy) y arenosos (light).

La medición de volumen de zona húmeda es una buena guía para lograr determinar el flujo a regar en el sistema. Al utilizar un sistema por goteo el volumen de tierra húmeda se rige principalmente por el tipo de tierra y el flujo del emisor. Por lo menos de un 33 % a 67 % de las raíces deben estar húmedas para un mayor rendimiento. Al regar mediante goteo una zona se puede medir el área de esta, para visualizar el movimiento de agua. En tierras arenosas el movimiento es rápido y profundo, y en tierras arcillosas se extiende más el área radial, es menos profunda y requiere más tiempo. Existen guías para estimar el flujo del emisor según el tipo de tierra, pero el flujo a dar depende de más factores como el requerimiento de agua del cultivo (Ahmad y Ajaz, 2013).



Figura 2. Comportamiento de la zona húmeda según el tipo de suelo: arcilloso (heavy), intermedios (medium) y arenosos (light) (Ahmad y Ajaz, 2013).

La aireación del suelo es otro parámetro que definirá cantidad y forma de distribuir el agua en el suelo. Cuando el suelo retiene agua, y se forman áreas de inundación, la cantidad de oxígeno disponible en el suelo se reduce, y reacciones como la de desnitrificación dan lugar, perdiéndose nutrientes. Asimismo, un fertirriego desmedido, o ciclos constantes de riego y evaporación, pueden dar lugar un aumento de sales en la superficie; sucede lo mismo al agregar nitratos o cloruros, los cuales son solutos no adsorbibles. Para solutos adsorbibles, como fósforo, potasio y amonio, hay un movimiento restringido, más en suelos arcillosos.

Por su parte, la acidez de los suelos indica características de estos, y permiten con mejor criterio escoger los fertilizantes a regar. Los suelos alcalinos generalmente poseen iones de Ca^+ solubles, carbonatos, alta velocidad de nitrificación y leve fijación de fósforo. Además, en suelos alcalinos es muy favorable la adición de nitratos, urea o demás, ya que el amonio es adsorbido por las arcillas presentes, evitando la toxicidad de raíces. Pero sí se debe tener control sobre el hierro que

se agrega. Por otro lado, los suelos ácidos se caracterizan por iones activos de aluminio, escasez de calcio, baja nitrificación y fuerte fijación de fósforo. Agregar fertilizantes nitrogenados aumentan pH de suelo, que se traduce en elongación de raíces y disminución de toxicidad de aluminio (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

2.1.2 Agua

La calidad del agua es un factor sumamente importante en el diseño de fertirriego. Primero se debe tomar en cuenta las características físicas al ser riego por goteo, y segundo, sus componentes químicos, ya que pueden interferir en posibles reacciones con los fertilizantes utilizados.

Cuando se realiza un riego por goteo, lo más importante, en cuanto a la calidad del agua, es asegurar que no haya un atasco en los emisores por partículas de gran tamaño. Las pruebas estándar que se realizan generalmente para tener un análisis adecuado de la calidad del agua, y evitar el atasco en sistema, incluyen: dureza, sólidos suspendidos, sólidos totales disueltos (STT), demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), materia orgánica, pH, hierro, y en cuanto a análisis para microorganismos: batería fijadora de hierro, hierro, oxígeno disuelto, sulfuro de hidrógeno, bacteria reductora de sulfato. En la Figura 1 se puede observar los valores recomendados de algunos indicadores para evitar el atasco (Ahmad y Ajaz, 2013).

El exceso de hierro ferroso (Fe^{+3}) en las aguas casi que imposibilita su uso como riego en goteo; aguas con concentraciones de hierro mayores a 0.5 g/m^3 no se recomiendan. El hierro ferroso forma un precipitado gelatinoso amorfo que causa el taponamiento. Este problema existe principalmente en lugares donde los acuíferos están formados por arena o turbas orgánicas, con un pH menor a 7 y ausencia de oxígeno disuelto. Para estos casos se han desarrollado métodos de cloración, precipitación y filtración para lograr darle uso de riego a estas aguas. Por otro lado, concentraciones altas de Ca, Mg y HCO_3 resultan en precipitados y taponamiento en el sistema, principalmente en pH elevados y concentraciones de bicarbonato mayores a 5 mmol/L . Además, la presencia de estos iones ocasiona una interacción con

Cuadro 1. Influencia de la calidad del agua en el taponamiento de emisores del sistema de goteo citado por Ahmad y Ajaz (2013).

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción en uso		
		Nulo	Poco a moderado	Severo
		Físico		
Sólidos suspendidos	mg/L	<50	50-100	>100
		Químico		
pH	mg/L	<7.0	7.0-8.0	>8.0
Sólidos disueltos	mg/L	<500	500-2000	>2000
Manganeso (II)	mg/L	<0.1	0.1-1.5	>1.5
Hierro (III)	mg/L	<0.1	0.1-1.5	>1.5
Sulfuro de hidrógeno	mg/L	<0.5	0.5-2.0	>2.0
		Biológicas		
Población bacteriana	# máx/ml	<10 000	10 000-50 000	>50 000

los fertilizantes fosfatados formando precipitados. Con el Ca, los precipitados Ca-F suceden a pH mayores a 5.5. Con el Fe, los precipitados suceden a pH mayores a 4, por lo que no se recomiendan utilizar estos fertilizantes en la presencia de Fe en el agua. Asimismo, estos fertilizantes pueden ser corrosivos en presencia de metales (dañando tuberías metálicas). Se recomienda utilizar fertilizantes polifosfatados con cierta concentración de Ca^{+2} para reducir la formación de geles (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

Ahora, incluyendo más a fondo el efecto del agua en un sistema de fertirrigación es necesario incluir otros parámetros. Se analiza el efecto de la calidad el agua en los cultivos, y la interacción fertilizante-agua en el sistema. Las características del agua que más toman relevancia son la composición iónica, el nivel de salinidad, el pH, la concentración de bicarbonato y el potencial redox.

Asimismo, es necesario determinar los pasos a seguir según sea el exceso de concentración de algún compuesto, ion o parámetro. La conductividad eléctrica, que refleja la salinidad de las aguas, es un parámetro a controlar para obtener buen rendimiento

de la planta. Para esto, la inyección de nitratos y Ca entre 5-10 mmol/L puede reducir el riesgo de salinidad. En cuanto al sodio (Na) es importante tener un control, el cual se mide por el valor de RAS (Relación de Absorción de Sodio). A valores altos de RAS, hay un mayor deterioro de los suelos y menor elongación de las raíces. Para esto se debe agregar Ca^{+2} , el cual compite con la adsorción Na y reduce el efecto tóxico. Sucede similar con el Cl^{-} , el cual a altas concentraciones a nivel foliar causa marchitamiento y muerte completa de hojas. Algunos componentes, como el nitrato de potasio o de calcio, contrarrestan el efecto de Cl^{-} y su absorción (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

2.1.3 Fertilizantes

Para poder elegir los fertilizantes a dosificar en un sistema a de riego se deben tomar en cuenta varios aspectos. Inicialmente se debe conocer el tipo de cultivo y su espacio de crecimiento, condiciones del suelo, calidad del agua y disponibilidad y precio del fertilizante. Aunado a esto se deben tomar en cuenta las propiedades como la forma (sólidos o líquidos), su solubilidad, corrosividad y la interacción entre fertilizantes en la solución. Para esta última propiedad existen bastantes referencias que indican la solubilidad, pH, interacción de precipitación y demás al combinar entre fertilizantes. Previo a cualquier uso de fertilizantes es recomendable hacer las pruebas de interacción, registrando cambios de temperatura, color, precipitado entre otras observaciones (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

La absorción de los nutrientes es uno de los fenómenos más importantes a la hora de analizar la entrega de fertilizantes a un sistema. Cada cultivo en específico posee una absorción de nutrientes distinto según la etapa de crecimiento en el que se encuentre, para observar esto se puede analizar las curvas de absorción de los cultivos. Estos se determinan mediante un análisis foliar de ciertas secciones de la planta y que se compara con el valor total de absorción al final de su ciclo. Al fin y al cabo, lo que se desea es proveer al suelo con la cantidad de nutrientes suficientes para que estén disponibles para la absorción de la planta. Por lo que el nutriente absorbido debe ser repuesto (Bertsch, 2009).

Para la entrega de nitrógeno (N) en los cultivos existen varios fertilizantes que se pueden utilizar, dentro de los cuales el efecto en los cultivos y en el suelo pueden variar. Algunos son la urea, amonio y nitratos. La N-urea causa un aumento de pH al aplicarse y puede que haya una volatilización de amonio por su aplicación dependiendo de distintos factores: capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, contenido de CaCO_3 y humedad. Se recomienda su aplicación en suelos arcillosos pesados con altas temperaturas, y una aplicación mediante mezcla con el suelo a pH de 5, en el cual se da una pérdida de 25 % (baja en relación con otras aplicaciones). El efecto del biuret (impureza a bajas concentraciones) es otra preocupación con la aplicación de urea. Por otro lado, el amonio, se comporta como un catión que reemplaza al Ca y Mg en el suelo, principalmente en suelos arcillosos, donde se da una adsorción. Y el nitrato, se comporta como un catión que se filtra en el suelo, el cual es un fuerte oxidante, por lo que puede haber muchas pérdidas en saturación de agua. Los nitratos se recomiendan principalmente para suelos arenosos. Para el caso de los nitratos, y sucede similar con la urea, se recomienda aplicar agua en el primer cuarto de agua de riego, aplicar fertilizantes en los cuartos del medio, y en el último cuarto aplicar agua, esto para reducir el lavado de el nitrato y mantenerlo en la zona radicular.

Generalmente las pérdidas de N radican en lixiviados de N fuera de la zona radicular, acumulación de sales en superficie seca y pérdida de nitratos por desnitrificación. Para evitar pérdidas se debe regular el riego para evitar encharcamiento. Asimismo, otro detalle en la aplicación de N, es que los suelos con alta CIC disminuye la toxicidad de raíces por amoniaco. Es importante conocer los efectos de N en la fisiología del cultivo, su sensibilidad y las temperaturas de la zona radicular. Por último, la absorción de N se da por mecanismos internos fisiológicos, y es importante mantener N disponible en el suelo para los cultivos. Los movimientos de absorción y translocación del N varían según el cultivo y la etapa de crecimiento (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

El fósforo y sus compuestos poseen una amplia gama de reacciones y de control que se debe tener al aplicarse. Muchos otros compuestos son insolubles con ellos, otros

precipitan y demás. Por lo que fácilmente se maneja el concepto como P fijado. Las plantas absorben solo el P monovalente, y su disponibilidad disminuye a medida que el pH aumenta. La aplicación de N tiene un efecto en la capacidad de absorción de P, ya que, ya sea el amonio o los nitratos lo que se absorben en la raíz, varían el pH del suelo. Los compuestos de amonio acidifican la zona de la rizosfera, por lo que se recomienda más la aplicación de P con sulfatos de amonio u otros. El movimiento de P en el suelo y su alcance es un tema muy discutido también, ya que se limita por sus reacciones con Ca en suelos básicos, y con Al y Fe en suelos ácidos, donde se logra desplazar muy poco. Algunas recomendaciones para esto son combinar el suelo con estiércol para habilitar complejos orgánicos de P, o realizar estudios a fondo de los macroporos para permitir un movimiento más fluido del P en el suelo.

La característica más importante en los fertilizantes fosfatados es su solubilidad en agua. Algunos de los fertilizantes más utilizados son: el ácido fosfórico, la urea fosfato y el ácido fosfórico industrial. El ácido fosfórico es muy utilizado para hacer limpieza de tuberías, destapar goteros y aplicar P al cultivo. Los fertilizantes polifosfatados proveen en una alta concentración P a los cultivos, pero para que estos puedan estar disponibles deben revertirse a monofosfato, lo que conlleva tiempo y condiciones adecuadas del suelo. Asimismo, en estos fertilizantes es importante considerar el costo de compra y aplicación (para elegir entre granular y líquido). La urea fosfato (UP), por otro lado, presenta muchas ventajas sobre otros fertilizantes, este disminuye la acidez por lo que favorece la disponibilidad de nutrientes, limpia los conductos, disminuye la volatilización de N, y es recomendado para suelos alcalinos o neutros. Otro fertilizante es el fosfato monopotásico, que se distribuye en el mercado en distintas presentaciones. Y así como se mencionó con N, la absorción de P en los cultivos depende de las etapas de crecimiento, siendo usualmente el crecimiento inicial donde se da el pico de absorción (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

Asimismo, el potasio (K) es un un catión estable que se encuentra comúnmente fijado en el suelo. Su desorción es lenta, por lo que, para proveer a los cultivos con potasio se debe hacer disponible mediante el uso de fertilizantes. Al añadir potasio gran parte se divide en solución del suelo, cationes intercambiables en arcilla, y

fijación en el espacio interlaminar de arcillas. Por lo que no todo llega a la planta. Los fertilizantes más utilizados son cloruro de potasio (KCl), muriato de potasio (MOP), sulfato de potasio (SOP), fosfato monopotásico (MKP) y nitrato de potasio (KNO_3). El movimiento de K en el suelo junto con el agua no es un mayor problema ya que la eficiencia de las raíces para absorber K es muy alta. Las curvas de absorción de K para cada cultivo indican sus necesidades en cada etapa (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

2.2 Biochar

El biocarbón o biochar es un producto que se obtiene a partir de tratamientos térmicos de materia orgánica. Es un carbón caracterizado por la concentración de nutrientes, alta área superficial, la cantidad de minerales, porosidad y demás características. Su uso en el sector agropecuario ha aumentado por los beneficios que esta materia provee a la tierra, cultivo y al ambiente. El biocarbón logra, mediante una estructura macroporosa, mejorar la absorción de nutrientes del suelo, disminuir la lixiviación (aumentar retención de líquido), captar carbono y aumentar el pH del suelo. En sí logra mejorar la productividad y calidad del suelo. Además, este proceso es un aliado contra el cambio climático, ya que logra reducir las emisiones de efecto invernadero (como CO_2 , CH_4 y NO_2), mediante el uso de biomasa evitando su descomposición natural, y mediante el secuestro de gases en el suelo (Abenza, 2012).

Es importante mencionar que la calidad y cantidad del biochar va a estar definida por varios parámetros, siendo principalmente el tipo de biomasa y el tratamiento térmico. El tipo de biomasa va a definir en gran medida la cantidad de nutrientes y minerales presentes en el biochar final. Y el proceso térmico, así como los parámetros de diseño, definirán la estructura y cantidad del biochar, además de otras características (Cambroner, 2018).

Existen varios métodos de tratamiento térmico o de combustión, en los cuáles se obtienen tres productos: gas (syngas), bioaceite y biochar. Según el proceso seleccionado se va a obtener más o menos cantidad de cada producto en específico. Para

la obtención de biochar, algunos procesos utilizados son los siguientes:

- Pirólisis lenta: calentamiento lento y uniforme, a temperaturas entre (450 a 650) °C, sin oxígeno (o poco). Se transforma alrededor de 40 % de biomasa a biochar. Puede durar horas o días.
- Pirólisis rápida: calentamiento muy rápido alrededor de 450 °C. Se obtiene principalmente bioaceite.
- Gasificación: combustión a temperaturas entre (800 a 1300) °C, en ambiente con oxígeno regulado. Se busca obtener principalmente H₂ y CO. Se obtiene poco biochar (Abenza, 2012).
- Carbonización instantánea: presenta mayor eficiencia que la pirolisis lenta. Se coloca lecho de biomasa relleno, presurizado con aire. Se enciende fuego en la base, y minutos después se libera el aire. Puede prolongarse por 30 min.

Para el diseño de un carbonizador es importante definir varios parámetros como: tipo de biomasa, contenido de humedad, tiempo de calentamiento y cantidad de aire liberado. Los carbonizadores constan de un espacio, puede ser metálico, con una tapa para sellar herméticamente, y una chimenea para la liberación de gases. Así como una base para asegurar el calentamiento constante.

Por último, es importante considerar el tamaño del biochar aplicado al suelo. Ya que partículas muy grandes, a pesar de lograr retener más el carbono, permanecen en la tierra por periodos más largos. Sucede de forma contraria con partículas pequeñas. También entra en juego el área superficial y la retención de agua como aspectos a tomar en cuenta para definir el tamaño (Cambronero, 2018).

2.3 Diseño de fertirriego

El diseño de fertirriego conlleva un entendimiento amplio de los fenómenos de transferencia de fluidos y conservación de energía. Todo esto se utiliza para poder elaborar el sistema de tuberías que transporta el agua de riego junto con los fertilizantes.

El fertirriego mediante goteo es impulsado de ciertas formas según las necesidades y características de la zona; puede ser por sistemas de gravedad o con sistemas presurizados. En el caso de los sistemas presurizados existen distintos métodos, siendo algunos: inyección por presión diferencial, inyección por aparato Venturi e inyección por presión positiva (uso de bombas) (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

Uno de los métodos más utilizados es la inyección por presión positiva, que en otras palabras es el uso de bombas para impulsar el fluido. En estos casos se impulsa el fluido de la disolución madre con fertilizantes al sistema de riego, la presión con la que esta se impulsa determina la dosificación deseada. Las ventajas de este método sobre los otros es su poca pérdida de presión en el sistema, dosificación más exacta y capacidad de mantener la concentración en el emisor de forma constante. La desventaja es que necesita de un recurso energético para el uso de las bombas (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

Para hacer un correcto diseño de un sistema de riego por goteo se sigue una serie etapas, que según cada literatura puede variar un poco, pero en general indican lo mismo. La adición o extracción de etapas varía según el alcance y precisión que se desea que tenga el proyecto. Una posible guía se resume de esta forma (Ahmad y Ajaz, 2013):

1. Recolección de información básica.
2. Estimación del pico más alto de agua requerida para riego.
3. Dibujo del área, selección de zonas y número de operaciones.
4. Selección del emisor y el flujo adecuado.
5. Distribución de plantas, emisores y líneas de riego.
6. Cálculo del área total, número de plantas, longitud de líneas de riego y total de emisores.
7. Flujo total requerido y razón de aplicación.
8. Tiempo total de operación.

9. Cálculos hidráulicos de las tuberías.
10. Cálculo y diseño de línea central, lateral y subcentral.
11. Selección de filtros y demás equipos.
12. Pérdida de presión.
13. Cálculo altura dinámica total.
14. Cálculo de potencia requerida.
15. Selección de bombas y motor.
16. Preparación del plano.
17. Evaluación de costos.

2.3.1 Información básica

La información de recolección básica conlleva tiempo por la cantidad de información a integrar para el planeamiento del diseño. Esto incluye aspectos climatológicos, detalles técnicos del terreno, el agua y detalles agronómicos. En cuanto a los aspectos técnicos del terreno se requiere conocer: medidas de terreno, elevaciones, mapa topográfico, fuentes de aguas, existencias de drenajes o tuberías, comunicación y facilidad de transporte, etc. En cuanto a los detalles agronómicos es importante conocer los cultivos, espaciado de estos, tipo, edad, evapotranspiración referente a la zona, requerimiento de agua del cultivo (y su calidad mediante análisis), datos del suelo (estudios de permeabilidad, textura, tipo y análisis químicos de estos), entre otros. Asimismo, es necesario conocer los datos del agua como su disponibilidad, cantidad y localización. Y, aunado a esto, los aspectos climatológicos también se deben conocer, como: la temperatura, humedad, lluvia y velocidad del viento. Por último, es importante realizar algún estudio socioeconómico general, y estudio agronómico para entender el efecto del proyecto en la zona y la forma de abordarlo (Government of India, 2017).

2.3.2 Estimación de flujo

Uno de los ejes más importantes para el correcto diseño de riego es el método utilizado para determinar el pico más alto de flujo de agua requerido en los cultivos. La necesidad de agua de los cultivos depende de muchos parámetros, que para su cálculo se deben realizar amplios balances de masa y energía, que según su exactitud se pueden volver más complejos.

Uno de los fenómenos más importantes a considerar es la evapotranspiración, esto es la pérdida de agua a la atmósfera por medio de evaporación del suelo y transpiración de la planta. Esta cantidad es el monto de agua que se debe reponer para asegurar un óptimo crecimiento del cultivo, pero el balance de requerimiento de agua depende de otros valores como la actividad pluvial y humedad variante del suelo, así como las condiciones del cultivo según su etapa de crecimiento. Para lograr determinar este valor se han desarrollado distintos métodos. Algunos apuestan por balances de masa y otros de energía, de formas separadas, pero el método desarrollado por la FAO, utilizando la ecuación de Penman- Monteith es la más recomendada para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0).

A partir de estos cálculos, separándolo por las etapas del año, se puede determinar el pico más alto de agua requerido con los cultivos. Este valor se utiliza como parámetro de diseño del sistema de riego. Con este dato se procede a determinar dosis, frecuencia y duración de riego, así como emisores a utilizar, caudal y cantidad (Allen *et al.*, 2006).

Para la elección del caudal y emisor se realizan los estudios de tipo de suelo. Al conocer las características del suelo, así como su permeabilidad, y el comportamiento del bulbo húmedo, se puede determinar el área de zona húmeda (parámetro valioso en diseño de riego por goteo) en relación con algún flujo dado de emisor, ya sea mediante tablas en la literatura o realizando una medida experimental en el terreno. Este valor es sumamente importante para el cálculo de número de emisores por planta, y con esto se llega a determinar dosis, frecuencia y duración de riego (Martínez y López, 2013).

Asimismo, en un sistema de riego por goteo, los emisores son los aparatos más importantes. Estos se encuentran en el mercado en un rango de flujos desde 2 l/h a 8 l/h, con una presión de operación de usualmente 10 m, y con variaciones en sus características. Su selección depende de esto y de otros de parámetros (Ahmad y Ajaz, 2013).

El sistema de completo de un sistema de riego consta de estos emisores, y partes como los filtros, mangueras, válvulas, conectores y la red de distribución (Ahmad y Ajaz, 2013).

2.3.3 Dinámica de fluidos

Para asegurar un diseño adecuado del sistema de tuberías se debe comprender a fondo los fenómenos hidráulicos que suceden en esta transferencia de fluidos.

El movimiento de fluidos por tuberías depende de variables como la presión, velocidad y altura. Y estas se rigen por la ley de conservación de la energía, la cual indica los cambios y transformaciones que suceden en el proceso de movimiento. La ecuación de Bernoulli representa la energía potencial, cinética y de flujo (o presión) desde un punto 1 a 2 en un sistema de tuberías. Esta ecuación es irreal ya que no contempla pérdidas energéticas por fricción o adición de energía al sistema mediante bombas. Para esta se agregan otros términos, como los que se observan en la siguiente ecuación, y se termina de completar la igualdad (Mott *et al.*, 2006).

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_L - h_R = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

Donde,

P = Presión, kPa

γ = Peso específico, kN/m³

z = Altura, m

v = Velocidad del fluido, m/s

g = Aceleración gravitacional, m/s²

h_A = Energía que se agrega al fluido mediante un dispositivo mecánico , m

h_R = Energía que se retira del fluido mediante un dispositivo mecánico, m

h_L = Pérdidas de energía del sistema, m

A partir de esta ecuación es posible determinar el comportamiento del fluido. Ahora, el valor h_L , depende de muchos factores a tomar en cuenta. Las pérdidas de fricción se dan a lo largo del movimiento del fluido por la tubería, por pérdidas energéticas en el paso de válvulas, codos, uniones, contracciones, entradas y salidas. Cada uno de estas se debe sumar y contemplar en el total de pérdidas, representado por el h_L . La pérdida por fricción a lo largo de la tubería se puede calcular mediante el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach u otras como la de Hazen-Williams. Se elige la más apta según las condiciones del sistema, y el acceso a los coeficientes o factores de fricción (estos dependen de la rugosidad del material y velocidad) que se consiguen de tablas. Por último, las pérdidas de fricción menores, como lo son las válvulas, uniones, salidas y otras, se calculan cada una en relación con la velocidad del fluido y el coeficiente de fricción respectivo de cada segmento (Government of India, 2017).

Al estar desarrollando un sistema de tuberías para un complejo de riego, los cálculos pueden complicarse según el diseño. Las tuberías pueden acomodarse, ya sea en serie, en paralelo o de forma mixta. Y con este acomodo, los valores de flujo o velocidad pueden variar según el segmento. Para poder realizar estos cálculos de forma precisa, y además minimizar los costos de la red, se acude a métodos como el de Hardy Cross de resolución de redes malladas. Este es un método de iteración, y con su resolución se logra definir los flujos y pérdidas en cada sección del sistema, además de la correcta selección de tuberías. En caso de ser necesario, se puede recurrir al uso de programas para la resolución de sistemas algebraicos (Government of India, 2017).

Otra forma adecuada, o paralela, de asegurar un correcto estudio de cargas en el sistema es mediante el uso de softwares para simular el flujo de los fluidos. De esta forma, definiendo las dimensiones de las secciones y otros parámetros de diseño, es posible conocer la carga y presión en cada etapa de la red de tuberías, y buscar reducir costos mediante un soporte tecnológico. Hay una gran cantidad de programas

que se prestan para estas simulaciones, algunos ejemplos de ellos son Comsol, Ansys, FluidFlow y otros.

2.3.4 Selección bomba

Las bombas son equipos mecánicos encargados de aumentar la presión en un fluido que se mueve a través de tuberías, proveyéndole una velocidad dada. Existe una gran variedad de bombas con mecanismos de funcionamiento y fuentes de alimentación distintas. Por lo que su elección depende de muchos factores en el sistema, y para su elección se acude a diagramas que generalmente incluyen la carga dinámica total, caudal y eficiencia (Ahmad y Ajaz, 2013).

Para el caso de bombeo fotovoltaico, en caso de no depender de un banco de baterías, se recomienda el uso de bombas especiales, las cuales no se ven afectadas por la variación de potencia entregada de las celdas fotovoltaicas. Estas se dividen en centrífugas y volumétricas (Sandia National Laboratories, 2011).

- Bombas centrífugas: estas bombas funcionan utilizando la fuerza centrífuga para arrastrar agua por el eje y liberarlo radialmente. Pueden ser sumergibles o superficiales, y pueden soportar una carga dimensional de 60 m (más si poseen más impulsores). Las bombas superficiales tienen la limitante que a profundidades mayores a 8 metros no funcionan.
- Bombas volumétricas (o de desplazamiento positiva): estas bombas funcionan principalmente a caudales bajos y a profundidades altas. Y su mecanismo de funcionamiento se basa en el impulso de un pistón que mueve agua por ciclos, por lo que al aumentar el voltaje la velocidad de ciclos aumenta y por ende el flujo. Están las bombas de cilindro y de diafragma (a pesar de ser económicas necesitan de reemplazo de diafragma cada 2-3 años).

2.4 Control automático

El uso de sistemas control automático en cualquier proceso, y ahora específicamente en el riego, buscan reducir los errores mediante un control constante de parámetros y asegurar la calidad de los productivos y cultivos, así como la reducción de mano de obra. Esto le concede a los productores una mayor libertad y seguridad en su cosecha (Smith y Corripio, 2001).

El sistema inicialmente se basa en el control mediante sensores. Los sensores, o variables, a controlar en un terreno agrícola pueden ser bastantes, algunos serían: la humedad del suelo, temperatura, pH, humedad relativa del aire, temperatura del aire, nivel del tanque de depósito, o hasta medición de los nutrientes disponibles en el suelo (NPK). La capacidad del control en un sistema depende principalmente de las mejoras que este provee contra el costo económico. Los sensores realizan la medición y emiten una señal hacia el controlador, y este dispositivo electrónico se encarga de gestionar la decisión o el cambio a tomar según el dato brindado, y, por último, la acción se da mediante una señal del controlador al dispositivo final de control. Este dispositivo, en un diseño agrícola, puede ser la válvula que controla el flujo de riego, la dosis de fertilizantes, o la adición de algún compuesto (Smith y Corripio, 2001).

La relación entre cada parte del sistema depende de la programación que se realice, o su algoritmo. Los sensores seleccionados van a emitir una señal al controlador, y este se va a encargar de decidir según las funciones de relación que se elaboren a partir del valor de referencia deseado, las cuales se especifican en la programación. La decisión llega a los actuadores, que generalmente son electroválvulas o electrobombas en estos sistemas (Herrera *et al.*, 2019). Puede variar la cantidad de componentes en el sistema según se desea el diseño: se puede necesitar antenas de ser inalámbrico, baterías para el control, reguladores, etc.

Existe una amplia gama de controladores en el mercado, cada uno varía su capacidad y demás características. Asimismo, la programación se puede diseñar en una gran cantidad de programas, como LabView, Arduino, Flexen, etc. Y es de vital importancia realizar cierta cantidad de simulaciones para asegurar el correcto

funcionamiento del sistema previo a su implementación (Rivera *et al.*, 2020).

2.5 Energía solar

El sol se puede caracterizar como una fuente de energía infinita y accesible a todos. Por esa razón, su uso para distintas aplicaciones se ha extendido por el mundo, con cada vez mayor innovación y más impulso. El sol genera radiación, la cual se mide como kWh/m², que sería la energía entregada en un espacio y tiempo dados. Esta radiación electromagnética es recibida en la tierra, pero su intensidad puede variar según impedimentos como las nubes u otros gases que generan refracción y difracción de las ondas. Asimismo, la captación de esta energía varía según el movimiento aparente del sol, el cual hace que sea necesario diseñar la inclinación a partir del movimiento de norte a sur y de este a oeste. La viabilidad de un proyecto fotovoltaico reside principalmente en la capacidad de recepción de la radiación y la transformación de esta en energía eléctrica. Existen mapas meteorológicos que indican las zonas de mayor y menor incidencia de radiación, los cuales son útiles para el diseño de estos proyectos.

Algunas de las ventajas del uso de energía solar son: larga vida útil, impacto ambiental mínimo, bajos costos de operación y mantenimiento y no consume combustibles. Y la mayor desventaja son los costos iniciales de instalación. Por esta razón para determinar si es razonable la inversión de este sistema se debe realizar un estudio de la zona y requerimientos del diseño. Algunas recomendaciones indican que la insolación mínima debe ser de 3 kWh/m² y una carga dinámica total multiplicado por el flujo de 1500 m⁴ máximo, si los valores se salen de esto es probable que el sistema no sea viable (Sandia National Laboratories, 2011).

Ahora, el sistema de generación fotovoltaica puede poseer distintos componentes según el uso que se le quiera dar. El componente básico son las celdas fotovoltaicas, y lo demás se gestiona según las necesidades.

- Panel solar: este equipo está formado a partir de varias celdas fotovoltaicas, las cuales bajo el efecto fotovoltaico logran la absorción de luz solar y con esto

una diferencia de voltaje. Los materiales más utilizados para su fabricación son silicio monocristalino, silicio policristalino y silicio amorfo. Los primeros poseen mayor eficiencia y vida útil, luego los policristalinos y, por último, los amorfos. Es de suma importancia conocer las características eléctricas de las celdas: corriente a corto circuito, voltaje a circuito abierto y potencia máxima generada. Este panel se debe adaptar con una configuración para asegurar que los rayos lleguen de forma perpendicular a la superficie (Sandia National Laboratories, 2011).

- **Baterías:** son equipos que almacenan la energía generada por el panel solar mediante una celda electroquímica. Existen de ciclo profundo y de ciclo corto. Para un sistema de bombeo de agua, donde los ciclos son constantes y se debe entregar corriente por un periodo tiempo largo, se recomiendan de ciclo profundo. Para su instalación se recomienda la capacidad de baterías de tres a cuatro veces la demanda diaria, y en serie para aumentar capacidad de amperios o en paralelo para aumentar voltaje (Garro *et al.*, 2014). Por su mantenimiento y vida útil no toda la literatura recomienda el uso de baterías, ya que resulta costoso su cambio (Sandia National Laboratories, 2011). Y algunas de las ventajas que este provee es ofrecer alimentación continua y sin fluctuaciones a todas las cargas, en el momento deseado (García *et al.*, 2013).
- **Controlador/ regulador de carga:** Son equipos que controlan el voltaje y la corriente entregados por el panel solar, esto para evitar sobrecarga en baterías. Para su operación deben conocer: intensidad máxima de carga, intensidad máxima de consumo y voltaje final de carga (límite de batería cargada). Se debe elegir un regulador con un porcentaje control de carga porcentual mayor al generado por el panel.
- **Inversores:** el equipo se debe seleccionar en relación con la potencia pico y en función de la situación más crítica, además de otros parámetros como: tensión nominal, capacidad de sobrecarga, factor de potencia, entre otros. Su función radica en controlar la alimentación en electrobombas u otros equipos (Garro *et al.*, 2014).

La instalación del sistema es sumamente importante según las necesidades. El sistema conectado en corriente directa (CD) limita su uso al horario pico de radiación (alrededor de 6 h), y el sistema se diseña para potencia del sistema de bombeo, no para su tiempo de uso. Ahora, si se utiliza un banco de baterías, existe la libertad de regar en la noche, pero su uso no es tan recomendado por su corta duración de vida y efectos de los componentes en el ambiente. Y un sistema conectado a la red, mediante corriente alterna (CA), da la versatilidad de regar en cualquier horario y utilizar bombas de CA. Para esta última instalación se debe realizar un contrato con la empresa de electricidad para permitir el ingreso de la energía en el sistema y no resultar en pérdidas económicas. En sí puede haber muchas configuraciones, pero se debe seleccionar la que se adapte de mejor forma al escenario propuesto (Garro *et al.*, 2014).

2.6 Estudio técnico y financiero

El diseño de un proyecto incluye un trabajo previo exhaustivo para verificar si su construcción es viable. De acuerdo a la literatura hay una gran cantidad de metodologías y pasos a seguir para evitar fallos y ser precisos en estos estudios. El *Cost Estimating Guide del US Department of Energy*, es una guía que busca facilitar y optimizar los diseños mediante distintas metodologías de cálculos de costos. Esta guía resume, de forma general, este proceso en 12 pasos:

1. Definir la razón de la estimación.
2. Desarrollar un plan de estimación.
3. Definir las características del proyecto.
4. Determinar la estructura de la estimación.
5. Identificar las reglas del diseño y suposiciones.
6. Obtener información.

7. Desarrollar un valor de estimación y compararlo con valor de estimación de costos independiente.
8. Conducir análisis de sensibilidad.
9. Conducir análisis de riesgo e incertidumbre.
10. Documentar el proceso de estimación.
11. Presentar la estimación para aprobación de la administración.
12. Actualizar el estimado para reflejar los costos reales y cambios.

Esta serie de pasos, que pueden variar un poco según el proyecto, permiten conseguir un diseño de costos más elaborado y completo. Asimismo, esta guía resume y define el alcance que puede tener el estudio de costos de un proyecto según el nivel de precisión que se desee alcanzar. Las estimaciones clase 1 son mucho más precisas, y este disminuye con el nivel hasta llegar a la clase 5, con cálculos más robustos. La estimación clase 1 se caracteriza por una definición del 70% a 100%, la razón de la estimación es conocer el valor de costo exacto y la metodología más utilizada es el costo unitario detallado (US Department of Energy, 2018).

Los estudios de viabilidad son herramientas imprescindibles a la hora de emprender un proyecto y tomar decisiones sobre qué hacer y cómo. Estos estudios incluyen muchos ámbitos de impacto, por lo que según el proyecto se decide cuales estudios realizar. Están los estudios técnicos, de mercado, legales, de gestión y otros. Pero los técnicos, económicos y legales son los más importantes.

El estudio de viabilidad técnica busca descifrar si el proyecto es posible materializarlo, analizando los impedimentos físicos que pueden haber. Este estudio incluye los costos inherentes a los aspectos técnicos del diseño. Para esto se realizan balances de equipos, de obras físicas, de personal, de insumos y además se analiza la localización y tamaño. Y se debe determinar los balances de masa y energía del sistema, así como otros aspectos técnicos (Sapag Chain, 2007).

Y el estudio de mercado busca determinar si la inversión realizada del proyecto es viable mediante el análisis de beneficios y costos. Por lo que analiza posibles esce-

narios y compara entre ellos. Este estudio recupera toda la información monetaria en las distintas etapas del proyecto para presentarlo de forma ordenada y analítica para su análisis. Asimismo, otra forma de presentar el estudio es mediante el análisis de ingresos y egresos en todo el ciclo del proyecto, por lo que ve la factibilidad a futuro. El estudio incluye los cálculos para determinar factores como el flujo de caja, costos, tasa de descuento, relación beneficio-costos, valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR), análisis de sensibilidad y demás datos que logran aclarar de mejor forma el contexto del proyecto (Castro, 2000).

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la etapa inicial del proyecto se buscó determinar todas las variables involucradas e información general necesaria para diseñar de forma óptima el sistema de riego. A partir de la discusión del proyecto dentro de la empresa se acordó trabajar el sistema de fertirriego integrado en un invernadero, el cual recibe el flujo de agua de riego desde un biodigestor que trata las aguas residuales provenientes de la lechería en la finca. A continuación se muestran los aspectos analizados y la recolección de información.

3.1 Metodología

Se realizó una investigación bibliográfica sobre los modelos y diseños de sistemas de fertirriego, principalmente en la obtención de datos iniciales para caracterizar la zona de trabajo. Comprendiendo a fondo todas las variables involucradas de la zona en la que se trabaja, se analizó de forma separada el clima, la calidad del agua y del suelo, el cultivo a regar y la zona.

Para el estudio de la zona se realizaron visitas para hacer medidas, ver la infraestructura actual, conversar con los productores y obtener información inicial: espacio de construcción, desnivel, cercanía a ríos o nacientes, muestras del suelo y del agua, y aspectos referentes al agricultor en específico.

En cuanto al clima, a partir de datos del Instituto Meteorológico Nacional y otras bases de datos se determinó la actividad pluvial, la radiación, las temperaturas máxima y mínima, la humedad y demás datos para el cálculo de la evapotranspiración (mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith) de la zona.

En cuanto al suelo, a partir del muestreo en la zona, se realizó un análisis químico en el CIA. Este estudio dio a conocer los macro y micro nutrientes que este posee y

el tipo de suelo a trabajar para determinar el comportamiento de los fertilizantes en el suelo. Asimismo, se realizaron pruebas de infiltración (conductividad hidráulica), textura y retención de humedad (para determinar capacidad de campo y punto de marchitez permanente) que indican el tiempo de residencia del fluido en el volumen de control. Por último, se planteó estudiar a fondo el cultivo a regar, su crecimiento y los requerimientos químicos de los micro y macro nutrientes en la zona de estudio (cinética de absorción de nutrientes), esto mediante investigación bibliográfica.

3.2 Información general

Dueño de la finca: Victor Hugo Arias

Ubicación: Calle Arias, Santiago, San Ramón.

Coordenadas: 10°03'53.4"N 84°29'37.6"

Tamaño de la finca: \approx 6 ha

Área invernadero: 60 m²

Altitud: 1130 m s.n.m.

Obtención agua: la obtención del agua para actividades agrícolas se realiza desde una naciente que pasa cerca. Para el riego de cultivos en el invernadero se propone utilizar el biol que sale de un biodigestor de tratamiento de la excreta de vacas y cerdos.

3.3 Actividad agrícola actual

- Ganadería: se maneja alrededor de 45 000 m². Son 11 vacas de doble propósito y cerdos de engorde.
- Cultivo café: utilizan alrededor de 7 000 m² para el cultivo de café, el cual se cultiva con sombra.
- Otros cultivos: se cultiva maíz, vainicas, culantro, frijoles, lechugas, rábanos, y entre otros, de forma periódica. Dependiendo de si necesita para aumentar

los ingresos y solventar necesidades por lo que no hay un área específica para eso.

3.4 Datos climatológicos

El cantón de San Ramón presenta un clima tropical húmedo seco (Climate-Data, s.f), En el Cuadro 2 se puede observar los datos generales de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento a 2 m del suelo, así como la presión y temperatura promedio del suelo, estos datos fueron recolectados de la plataforma *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources*, la cual reúne información mundial meteorológica desde 1984. Los valores obtenidos se obtuvieron de las coordenadas dadas de la finca.

Cuadro 2. Datos climatológicos de la zona, fuente NASA POWER.

Mes	Temp del aire a 2 m (°C)	Humedad relativa del aire a 2 m (%)	Velocidad del viento a 2 m (m/s)	Presión atmosférica sobre el suelo (kPa)	Temp promedio a nivel del suelo (°C)
Enero	24.56	71.2	1.86	96.61	25.28
Febrero	25.3	65.73	1.9	96.6	26.3
Marzo	26.28	51.01	1.74	96.56	27.56
Abril	26.96	62.26	1.41	96.53	28.24
Mayo	26.2	73.89	1.14	96.52	27.05
Junio	25.2	81.77	0.96	96.55	25.72
Julio	24.89	81.66	1.04	96.6	25.34
Agosto	24.81	82.51	0.99	96.58	25.29
Setiembre	24.48	84.96	0.98	96.56	24.93
Octubre	24.16	86.71	1.05	96.53	24.53
Noviembre	24.12	83.94	1.18	96.52	24.49
Diciembre	24.25	77.97	1.57	96.58	24.72
Promedio anual	25.1	75.3	1.32	96.56	25.79

Asimismo, en el Cuadro 3 se observan los datos referentes a temperatura mínima, máxima y precipitación obtenidos de la misma plataforma. Para este caso se recolectaron los datos del año 2019, ya que este es el año más cercano de los cuales se

presentan todos los datos. Para ahondar más a fondo en los datos pluviométría se realizó una recopilación de datos de varios años (2015-2019), y se cálculo un promedio para utilizar en los cálculos, los valores recopilados se observan en el Cuadro 4. Estos valores del clima se utilizan para el cálculo de la evapotranspiración de la zona. Todos estos datos son recopilatorios para un contexto del escenario y para los cálculos posteriores, por lo que no se realiza un análisis detallado de lo que implican estos valores.

Cuadro 3. Datos climatológicos de la zona obtenidos por NASA POWER (2019)

Mes	Temperatura mín a 2 m	Temperatura máx a 2 m	Precipitación mm/d
Enero	19.35	27.48	0.3
Febrero	19.61	30.09	0.63
Marzo	20.17	30.46	1.93
Abril	21.07	31.22	2.44
Mayo	21.68	27.89	12.12
Junio	21.97	27.56	7.18
Julio	21.37	27.2	5.07
Agosto	21.36	27.15	6.57
Setiembre	21.05	26.76	9.61
Octubre	21.03	25.67	14.3
Noviembre	20.65	26.57	5.78
Diciembre	20.62	26.56	2.96
PROMEDIO ANUAL	20.83	27.86	5.78

Cuadro 4. Datos de precipitación mensuales en la zona obtenidos por NASA POWER (2015-2019).

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	59	42	29	54	155	214	170	139	257	307	219	66
2	25	41	15	73	176	322	210	255	225	361	289	125
3	52	14	35	122	588	308	241	332	369	576	132	65
4	5.0	1.3	1.3	3.5	9.4	9.3	7.2	8.2	13	3.4	0.9	6.1
5	0.3	0.6	1.9	2.4	12	7.2	6.6	9.6	14	5.8	3.0	5.8
\bar{X}	28	20	17	51	188	172	127	149	176	251	129	54

Por último, en lo que respecta a la radiación solar, hay ciertos parámetros que se deben recopilar para el posterior diseño del sistema de bombeo solar, algunos de

estos parámetros son (Power, 2015):

- Radiación solar directa (RND): la cantidad de radiación solar, por unidad de área, que es recibida por una superficie posicionada en la superficie de la Tierra, en dirección perpendicular (o normal) a los rayos de sol, sin haber sufrido antes un cambio de dirección.
- Radiación solar difusa sobre una superficie horizontal (RDSSH): la cantidad de radiación solar, por unidad de área, que es recibida por una superficie posicionada horizontalmente en la superficie de la Tierra, luego de haber sido reflejada o dispersada por partículas o por vapor de agua presente en la atmósfera.
- Cantidad de horas diarias de luz solar: la cantidad de horas transcurridas entre la salida y la puesta del Sol.
- Cantidad equivalente de días sin sol, por mes: la cantidad de días que un sistema de almacenamiento de energía de respaldo debería poder suministrar energía en ausencia de radiación solar incidente.

En el Cuadro 5 se pueden observar los valores de los parámetros mencionados al mes. De la misma forma, estos datos fueron recopilados de la plataforma Nasa Power entre los años 1983-2005.

3.5 Detalles agronómicos

3.5.1 Cultivo

De forma preliminar se propone el cultivo de culantro en la totalidad del invernadero, al ser este el de mayor interés para el agricultor. Tanto el culantro coyote como el culantro castilla son de interés, por lo que para fines teóricos se investigaron ambos, y otras variedades para la recopilación de información (ya que no existe información suficiente de un solo tipo). Para los cálculos posteriores se utilizaron los requerimientos nutricionales e hídricos del culantro coyote y el rendimiento del culantro

Cuadro 5. Datos de radiación y horas luz para la zona de estudio, obtenidas de NASA POWER

Mes	RND (kWh/m ² *d)			RDSSH (kWh/m ² *d)			Cant equiv- alente días sin sol al mes	Cant horas diarias de luz solar
	Máy	Mín	Prom	Máy	Mín	Prom		
Ene	6.78	3.82	4.98	1.81	1.43	1.71	3.85	11.62
Feb	6.43	3.36	5.13	2.03	1.68	1.88	5.35	11.82
Mar	6.85	4.30	5.65	2.17	1.79	2.00	3.98	12.07
Abr	6.01	3.61	4.98	2.35	2.07	2.23	4.43	12.35
May	4.53	2.34	3.52	2.26	2.22	2.29	5.61	12.58
Jun	4.04	1.84	3.17	2.14	2.22	2.25	6.97	12.70
Jul	3.76	2.07	2.87	2.19	2.24	2.26	4.59	12.65
Ago	3.52	1.79	2.68	2.21	2.31	2.31	5.38	12.45
Sep	4.19	2.12	3.09	2.20	2.21	2.26	5.01	12.18
Oct	4.02	1.90	3.10	2.00	2.04	2.08	6.57	11.92
Nov	4.52	3.00	3.68	1.88	1.80	1.86	2.89	11.67
Dic	6.66	3.02	4.58	1.77	1.39	1.68	5.83	11.55
Prom	5.10	2.76	3.95	2.08	1.95	2.07	5.04	12.13

castilla. El diseño del sistema para el culantro coyote conserva su funcionalidad para el culantro castilla, siendo sus requerimientos un poco menores. Por lo tanto en esta sección se describen los datos recopilados de la teoría para las distintas variedades.

El culantro o cilantro es una planta aromática y condimentaria de alta demanda en el mundo. Su follaje y semillas se utilizan por sus propiedades medicinales, como aromatizante para alimentos, licores y perfumes y demás aplicaciones. Como un estimado para obtener entre (18 a 20) t/ha de follaje son necesarias entre 200 y 300 plantas por m², en condiciones adecuadas. La acumulación de nutrientes de esta planta (*Unapal Precoso*) sigue este orden: K > N > Ca > P > Mg > S (como se cita por De Tafur *et al.* (2014)) . Las cantidades de absorción pueden variar según genotipo de la planta.

El comportamiento de requerimiento de agua se puede observar en la Figura 3. En este se observa el consumo de agua en tres etapas del cultivo a lo largo de 35 d. Las etapas son la germinación (0 a 8) d, crecimiento acelerado (9 a 26) d y formación de

tallo y cosecha (27 a 35) d. Y los distintos tratamientos son variaciones en la lámina de agua aplicada. La aplicación de 200 mm de agua es la que resultó en mayor rendimiento. Otros estudios sugieren el mismo valor, sumando que la aplicación de 200 mm se debe realizar el 20 % los primeros 6 d, 50 % hasta los 25 d y 30 % lo que resta del ciclo (como se cita en De Tafur *et al.* (2014)). Asimismo, se determinaron los valores de K_c (coeficiente del cultivo en riego) del cultivo siendo, 0.83, 1.2 y 1.4 para cada etapa respectiva. Este valor se relaciona de forma directa con la necesidad de agua en cada etapa de crecimiento, por lo que es de esperar que vaya en aumento. Todo esto para la variedad de cilantro Unapal Precoso (De Tafur *et al.*, 2014).

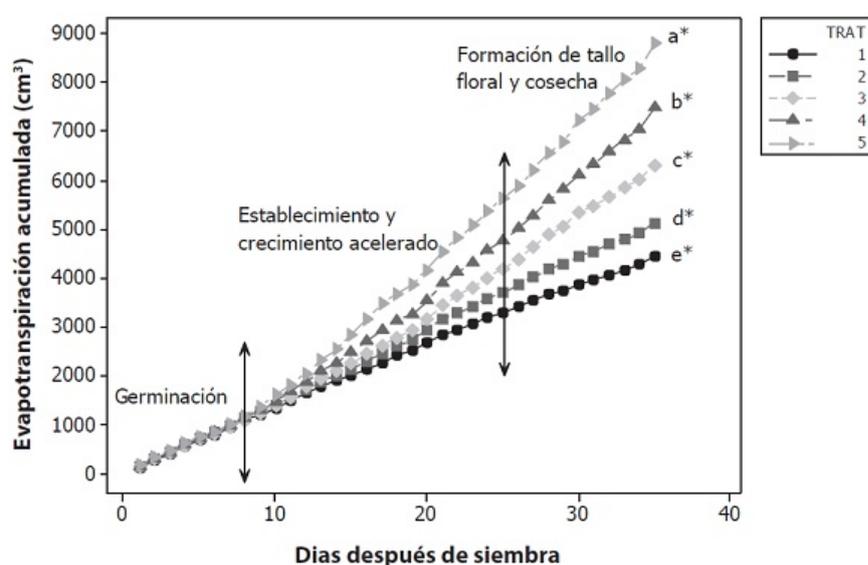


Figura 3. Evapotranspiración acumulada en el tiempo para distintas aplicaciones de agua (De Tafur *et al.*, 2014).

Asimismo, se estudiaron los datos dados por Bertsch (2009) como guía de absorción de nutrientes para el caso del culantro coyote. En la Figura 4 se puede ver la absorción de algunos nutrientes en distintas partes de la planta. Como es de esperarse el follaje posee la mayor concentración de nutrientes, seguido de la raíz. Lo ideal es mantener los nutrientes en el follaje y en las raíces, evitando desarrollar la planta hasta la salida de las flores para direccionar de forma adecuada y sin pérdidas la producción.

Para el caso del cilantro especie *Coriandrum sativum Pakistan'*, en un estudio donde se evaluó la absorción de nutrientes NPK a lo largo del crecimiento del cultivo se

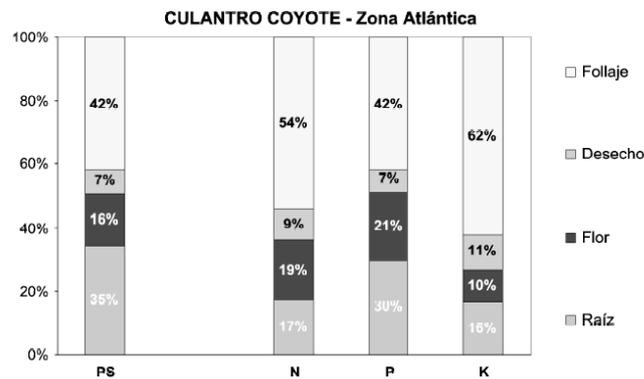


Figura 4. Absorción de nutrientes del culantro coyote según sección de la planta (Bertsch, 2009).

obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 5. En este caso se observa el comportamiento ya mencionado, donde el potasio es el nutriente más absorbido, seguido del nitrógeno y de último el fósforo. Para este caso sí es posible construir una dosificación adecuada a lo largo del tiempo (Cruz Crespo *et al.*, 2017).

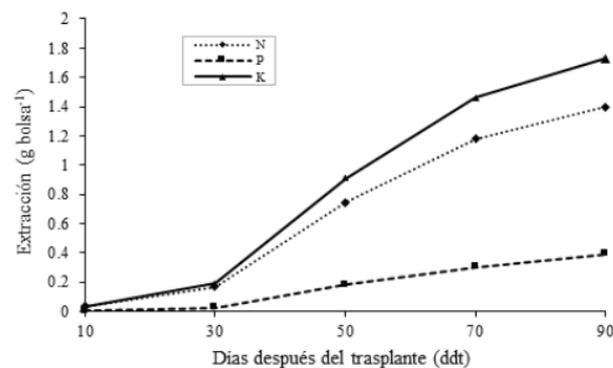


Figura 5. Curvas de extracción nutricional de N, P y K de *Coriandrum sativum* Pak-istan irrigado con solución nutritiva (Cruz Crespo *et al.*, 2017).

3.5.2 Evapotranspiración

A partir de los datos climáticos de la zona se recurrió a la herramienta de la FAO Cropwat 8.0, el cual realiza el cálculo de la evapotranspiración a partir de los datos tabulados. Se obtuvieron los valores que se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Datos de evapotranspiración calculados con Cropwat 8.0

Mes	ET0 (mm)
Enero	138.9
Febrero	162
Marzo	180.6
Abril	180.3
Mayo	165
Junio	160.2
Julio	157.8
Agosto	159.6
Septiembre	156.3
Octubre	142.8
Noviembre	132.3
Diciembre	129.9

3.5.3 Requerimiento hídrico

Inicialmente se realizó el cálculo del pico de requerimiento hídrico al año, a partir de los valores de pluviometría, evapotranspiración, y necesidad hídrica a lo largo del crecimiento del cultivo, utilizando la metodología dada por Carrazón Alocen (2007). Este posteriormente se compara con el requerimiento hídrico obtenido por balance de masa en el sistema. A partir de la duración el ciclo de cultivo, se divide los meses en periodos de 10 días. El ciclo del cultivo ronda el mes y medio de crecimiento, por lo que este se acopla a los periodos asignados. Para cada periodo se realizó el cálculo de la evapotranspiración del cultivo a partir de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de crecimiento del cultivo (K_c), mediante la ecuación 2. Este valor es igual a la necesidad neta de riego, ya que no se incluye la pluviometría al estar dentro de un invernadero. De las necesidades netas para cada periodo de 10 d se selecciona la de mayor valor en todo el año, esta indica la necesidad neta máxima de riego. Para este caso, el valor corresponde al tercer periodo de marzo, siendo de 8.428 mm/d.

$$Et_0 * K_c = Etc \quad (2)$$

Donde,

Et_0 = Evapotranspiración de referencia, mm/d

Kc = Coeficiente de crecimiento del cultivo, adim

Etc = Evapotranspiración de cultivo, mm/d

En relación a esta necesidad neta máxima de agua se calcula un caudal mínimo requerido de agua. Para esto se debe calcular una necesidad bruta de riego tomando en cuenta pérdidas de agua en el sistema. Para este caso, al ser un riego por goteo su eficiencia es del 90 % lo que resulta en una necesidad bruta de riego de 9.36 mm/d. Tomando el área de cultivo y el tiempo de operación se obtiene el caudal a partir de la ecuación 3, que da como resultado 46.8 L/h.

$$Q_m = \frac{N_b * S}{3600 * t_o} \quad (3)$$

Donde,

Q_m = Caudal mínimo de riego en toda el área, L/s

N_b = Necesidad bruta de riego, mm/d

S = Área de cultivo, m²

t_o = Tiempo de operación del sistema, h

Estos valores mencionados indican la necesidad hídrica del cultivo, pero para lograr una mayor eficiencia en la absorción de agua del culantro se debe tomar en cuenta el comportamiento del suelo y su capacidad de retener y ceder agua. Para esto se realizaron las mediciones de densidad aparente, conductividad hidráulica y la curva de retención de humedad. A partir del punto de CC y PMP se puede obtener el porcentaje de agua utilizable en lámina de agua. Esto se realiza mediante la ecuación 4. Tomando un valor de profundidad efectiva de las raíces del culantro de literatura.

$$AU = 10 * (CC - PMP) * d_A * P_e \quad (4)$$

Donde,

AU = Agua útil, mm

CC = Capacidad de campo, %

PMP = Punto de marchitez permanente, %

d_A = Densidad aparente, g/cm³

P_e = Profundidad efectiva de las raíces, m

A partir del agua utilizable y el déficit permisible de manejo se calculó la dosis neta de riego. El déficit permisible de manejo es un indicador del nivel de humedad en la cual a las raíces ya se les dificulta la extracción del agua del suelo. Es una fracción del agua utilizable, y para cultivos tolerantes a la sequía se asigna un valor del 50%. Mediante la ecuación 5 se obtiene la dosis neta de riego.

$$D_n = DPM * AU \quad (5)$$

Donde,

DPM = Déficit permisible de manejo, %

D_n = Dosis neta de riego, mm

La relación entre la dosis neta de riego y la necesidad neta de riego da como resultado el máximo intervalo entre riegos posible en un cultivo. La relación está dada por la ecuación 6. Para este caso se obtuvo un periodo de 2 días entre riego como máximo. Se recalculó la dosis de riego ajustada al tiempo redondeado. Se obtuvo un valor de dosis neta ajustada de 19.38 mm.

$$I_m = \frac{D_n}{N_n} \quad (6)$$

Donde,

I_m = Máximo intervalo entre riegos, d

N_n = Necesidad neta de riego, mm/d

Por último, un factor importante a calcular es el tiempo mínimo de aplicación del agua de riego, esto para evitar encharcamientos. Para esto, la dosis neta ajustada de riego se debe multiplicar por la eficiencia de un sistema de riego por goteo (siendo de 90% según Carrazón Alocen (2007)), para incluir las pérdidas del sistema. Y posteriormente se utiliza la ecuación 7 para calcular el tiempo mínimo. Como resultado se obtuvo 1.4 h para la infiltración básica teórica, y 18 s para la infiltración básica obtenida por medio del análisis de suelos. Lo importante, es que se busque evitar un tiempo de aplicación menor a estos.

$$t_a = \frac{D_b}{I_b} \quad (7)$$

Donde,

t_a = Tiempo de aplicación mínimo, h

D_b = Dosis bruta de riego, mm

I_b = Infiltración básica, mm/h

3.6 Espaciado del cultivo

3.6.1 Espaciado y acomodo de cultivos

A modo de estudio y por simplificación se plantea solamente un escenario de acomodo de los cultivos en el cual se cultivará el culantro con el mismo espaciado ya dado por el agricultor. Se da en montículos de 1 m de ancho separados por hileras de 20 cm, de 4.75 m de largo. Son 10 montículos en el invernadero.

Área de cultivo:

El área de cultivos se obtiene restando el espacio entre montículos y espacio libre del invernadero, lo que da un aproximado de 47.5 m².

Diagrama:

El diagrama de dimensiones de invernadero y distribución preliminar de tuberías se

muestra en la Figura 6.

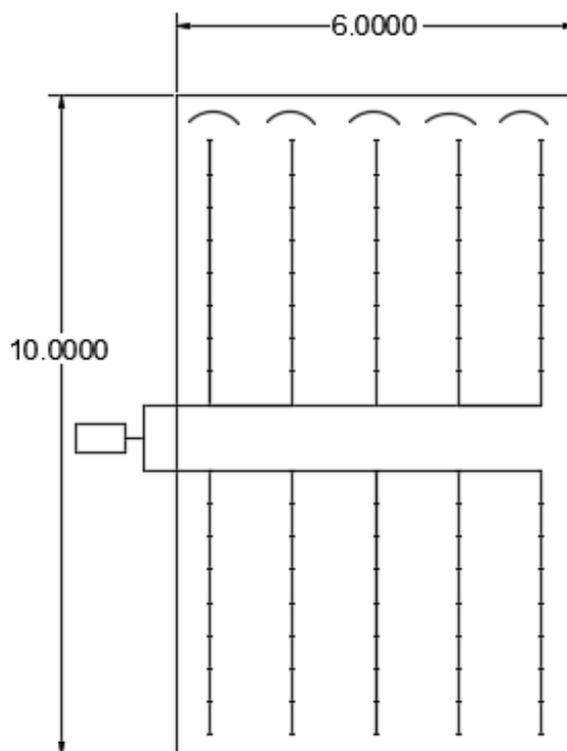


Figura 6. Diagrama de distribución y dimensiones del invernadero utilizando como unidad metros (elaboración propia).

3.7 Análisis de suelos

Para el análisis de suelos se visitó la finca y se tomaron muestras en el invernadero. Para el caso del análisis químico se realizó una mezcla de submuestras tomadas de forma aleatoria en la zona del invernadero. No se realizó un método específico de muestreo, solamente se eligieron cuatro puntos aleatorios en el terreno. Para el caso de los análisis físicos se tomaron dos muestras, una en la primera sección del invernadero (entrando) y otra en la final. Los resultados obtenidos se muestran en los Cuadros 7 y 8.

Asimismo, es importante recalcar que los principales tipos de suelos en la zona de San Ramón, son los ultisoles e inceptisoles, de acuerdo al mapa digital de suelos de Costa Rica. Los ultisoles, siendo los predominantes, se caracterizan por ser suelos

ácidos y con bajo contenido de calcio. Además se caracterizan por tener una buena estructuración y buen drenaje interno (INTA, 2016). Estos suelos se caracterizan por ser arcillosos y poseer un alto grado de Al y óxidos de hierro, Usualmente presentan poca disponibilidad de N y P (Henríquez *et al.*, 2000). Por otro lado los inceptisoles se caracterian por poseer valores de pH bajos y alto contenido de materia orgánica. Generalmente se componen de arcilla y no generan mayor problema en proveer nutrientes (INTA, 2016).

3.7.1 Textura

La textura es un parámetro que indica las composiciones del suelo en proporción de arena, limo y arcilla. A partir de estos valores es posible desarrollar un análisis del comportamiento del suelo ante cultivos y otros nutrientes que se agreguen. Para este caso se obtuvo una textura franco arcilloso arenoso y franco arcilloso, para la muestra 1 y 2 respectivamente, como se observa en el Cuadro 7. Los suelos arenosos se caracterizan por carecer de propiedades coloidales y de reservas de nutrientes, suelen presentar mala estructura, buena aireación y nula retención de agua. Y los suelos arcillosos se caracterizan por ser activos desde una perspectiva química, ya que interactúan mucho en cuanto absorción de iones, son ricos en nutrientes, retienen mucha agua y son bien estructurados, pero son usualmente impermeables. Y por último, los suelos francos son suelos medios, presentan las propiedades de los tres componentes de una forma equilibrada (Carrazón Alocen, 2007).

Cuadro 7. Resultados de análisis físicos de suelos de dos muestras realizados por el CIA.

Análisis	Muestra 1	Muestra 2
Textura (%)	Arena	32
	Limo	28
	Arcilla	40
	Clase	Franco arcilloso
	arenoso	Franco arcilloso
Ret. humedad(%)	33 kPa	61
	1500 kPa	18
	Agua útil	16
Densidad aparente (g/cm ³)	0.7	0.8
Conductividad hidráulica (cm/h)	394	229.79

3.7.2 Curva de retención de humedad

La curva de retención de humedad busca indicar la capacidad del suelo de retener agua en los poros a distintas presiones. Los valores a 33 kPa y 1500 kPa representan los niveles de humedad porcentaje de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). La CC es el máximo nivel de humedad que el suelo puede retener ya habiéndose drenado el agua. Se considera el nivel de humedad ideal para el crecimiento de cultivos, ya que dispone del agua para que las plantas absorban fácilmente. El PMP es nivel de humedad al cual ya no se dispone de agua para que las plantas absorban, la cantidad existente se arraiga al suelo. En este punto se comienza la marchitez de las plantas. Estos valores dan un ámbito adecuado de uso de agua para las plantas, la diferencia entre ambos es el agua utilizable, este cálculo se utiliza para estimar el requerimiento hídrico de agua en los cultivos (Carrazón Alocen, 2007),

3.7.3 Densidad aparente

La densidad aparente es un factor que indica el nivel porosidad del suelo. A mayor densidad menor porosidad. Asimismo, indica la compactación y facilidad de de circulación de agua y aire. El valor obtenido, de 0.75 g/cm^3 indica un nivel alto de porosidad en el suelo de estudio.

3.7.4 Conductividad hidráulica

El valor infiltración o conductividad hidráulica indica la rapidez con la que el agua se infiltra en el suelo. Este valor se utiliza para el diseño general del sistema de riego. Los valores obtenidos de infiltración en el reporte, como se observa en el Cuadro 7, son valores sumamente altos de infiltración, ya que usualmente para suelos arenosos (que poseen los valores más altos de infiltración), se obtienen conductividades entre (25 a 250) mm/h (Carrazón Alocen, 2007). Mientras que acá, según el análisis, se tiene un valor entre (2297 a 2940) mm/h. Y como se mencionó anteriormente la textura no es completamente arenosa. Por lo que para el manejo de datos se utilizan tanto los valores experimentales como los teóricos de conductividad hidráulica.

3.7.5 Análisis químicos

En cuanto al análisis químico se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 8.

Analizando los valores obtenidos se tiene un suelo cuyo pH cumple el rango adecuado para crecimiento tanto de hortalizas como de plantas, pero se cataloga como un suelo ácido de acuerdo a análisis del MAG. A mayor acidez mayor concentración de Fe, Al y Mn en el suelo, y menores concentraciones de Ca, Mg, S y Mo. Además su valor de pH se mantuvo fijo en ambas muestras por lo que se puede deducir que mantiene un pH estable en el área del invernadero. En la misma línea, la capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICE) es un valor que refleja la capacidad del suelo de intercambiar cationes a un pH dado, un alto valor de CICE indica que los suelos son aptos para crecimiento y es un rol importante en la reserva de nutrientes.

Los valores obtenidos son relativamente altos. A partir de la acidez y el CICE se obtiene el porcentaje de SA (saturación de acidez), el cual es un buen indicador de diagnóstico de problemas de acidez. Para este suelo se obtuvo un valor bajo de saturación, de 0.6 %, esto indica que los suelos no se ven afectados por un alta acidez, ya que el límite ronda el 20 %.

Las concentraciones obtenidas de los macro y micro nutrientes que se observan en los reportes se utilizaron para determinar los requerimientos nutritivos del culantro, para verificar cuales son necesarios dosificar y en qué cantidad. Se debe tener controlado, más en suelos ácidos, la dosificación de Ca, Mg, y K. Para este caso, existe una buena concentración de estos en el suelo. Es importante mencionar que el calcio disminuye acidez de los suelos, la dosificación de amonio en presencia de Mg puede resultar en una deficiencia de este, y el potasio, como ya se observó en los requerimientos del culantro, es un macro nutriente sumamente necesario para el crecimiento de la planta.

El fósforo (P), así como el potasio (K), es un macronutriente sumamente importante para el desarrollo de la planta. El suelo ya posee una cantidad promedio de fósforo. Lo importante en este caso es que el fósforo se encuentre disponible para la planta, ya que usualmente se refieren al "P fijado" como es insoluble por lo que no se ioniza, y el "P disponible" es el que logra ionizarse y permite una absorción de la planta. Esto depende del pH del suelo y de los fertilizantes que se utilicen, así como el efecto entre estos y la aplicación con amonio (aumenta el P absorbido). Los micronutrientes mencionados, como Cu, Fe, Zn y Mn presentan valores elevados y su estudio gira en torno al consumo del cilantro durante su crecimiento (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

La conductividad eléctrica (CE) obtenida del suelo ronda valores aceptables, este parámetro indica la concentración de sales en el suelo. Y por último, la relación C/N se recomienda que esté en un rango entre 5 a 30. Cuando se encuentra en ese rango, como en este caso se considera relativamente estable a la descomposición. A altos valores se induce a la fijación de nitrógeno, pero no sucede en este caso (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

Cuadro 8. Resultados de análisis químicos de suelos de dos muestras realizados por el CIA.

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2
pH	5.6	5.6
Acidez (cmol/L)	0.10	0.10
Calcio (cmol/L)	11.43	11.55
Magnesio (cmol/L)	4.15	4.16
Potasio (cmol/L)	1.09	1.10
CICE (cmol/L)	16.77	16.91
SA (%)	0.6	0.6
Fósforo (mg/L)	15	16
Zinc (mg/L)	6.5	6.4
Cobre (mg/L)	10	10
Hierro (mg/L)	67	70
Manganeso (mg/L)	62	59
CE (mS/cm)	1.4	1.2
Carbono (%)	5.3	4.87
Nitrógeno (%)	0.50	0.47
Relación C/N	10.6	10.4

3.8 Agua de riego

3.8.1 Parámetros

El agua de riego a utilizarse, como se mencionó anteriormente, proviene de un proceso de tratamiento de aguas previo, por lo tanto, para diseñar a partir de la calidad del agua se trabajó con los parámetros calculados teóricamente en el diseño de tratamiento de aguas propuesto por parte de la empresa. Los valores se muestran en el Cuadro 9.

Durante el desarrollo del proyecto se construyó el biodigestor y se puso en marcha, por lo que en las últimas etapas de diseño se logró medir experimentalmente la concentración de nutrientes y propiedades químicas del biol de la finca, logrando obtener un análisis más real del sistema, por lo que en este documento se describe de forma paralela el diseño que se planteó con los valores teóricos y la variación con los valores reales. El análisis del biol se realizó en el CIA, siendo uno de tipo químico completo y se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 10. Estos resultados son poco precisos, por lo que no logra detectar fósforo, magnesio ni azufre, lo que puede indicar que sus concentraciones son bajas, menores a 100 mg/L. Para el desarrollo del sistema se suponen cero. Asimismo se caracteriza este biol como una enmienda con una conductividad media-baja, y un pH neutro, lo que genera un sistema con poco riesgo a ser afectado por salinidad.

Cuadro 9. Parámetros generales del efluente del biodigestor.

Parámetro	Efluente del biodigestor
Flujo másico	447.38 kg/d
Humedad	99.69 %
Caudal	0.447 m ³ /d
Densidad	998.83 kg/m ³
Sólidos totales (TS)	3070.72 mg/L
Sólidos suspendidos	2659.23 mg/L
Sólidos sedimentables	0.00 mg/L
Demanda química de oxígeno (DBO)	1274.45 mg/L
<i>DBO</i> _{5,20}	984.79 mg/L
Sólidos volátiles (VS)	998.52 mg/L
Materia seca (DM)	3070.72 mg/L
Nitrógeno total (asumido como NTK)	317.9 mg/L
Fósforo total	183.67 mg/L
Carbono total	788.25 mg/L
Razón C/N	2.48
Potasio total	358.99 mg/L
Magnesio total	13.14 mg/L
Calcio total	841.72 mg/L
Azufre total	36.12 mg/L
pH	6.89
Grasas y aceites	6.3 mg/L

Cuadro 10. Parámetros generales del análisis de tipo químico completo realizado al biol.

Parámetro	Valores
Densidad	1000 kg/m ³
Nitrógeno total (asumido como NTK)	100 mg/L
Fósforo total	ND
Potasio total	300 mg/L
Magnesio total	ND
Calcio total	100 mg/L
Azufre total	ND
pH	7.45
CE	2.4 mS/cm

3.8.2 Disponibilidad

Esta agua/biol se obtiene de la salida del biodigestor de la lechería, hay un bombeo constante desde el sistema al riego, tanto para el invernadero como para el pastizal y el café. El agua que se bombea se almacena en un tanque anexo al invernadero, donde se dispone hasta su uso en el riego del culantro.

3.9 Capacidad del sistema

Se plantea utilizar energía solar, por lo que el horario de funcionamiento del sistema de riego deber ser en horas de exposición al sol en caso de no utilizarse baterías. En caso contrario lo adecuado es regar en horas de la tarde o mañana. Se debe regar el área total del cultivo por un periodo no mayor a 11 horas al día.

3.10 Legislación

Según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601-MINAE-S, esta actividad de reuso de aguas residuales entra en el Tipo 3: aguas tratadas

utilizadas para riego de productos agrícolas sin procesamiento previo. Por lo tanto se deben cumplir los límites mencionados en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Límites máximos permisibles para el reuso de aguas residuales tratadas de Tipo 3

Parámetro	Límite
Nemátodos intestinales,(huevos/L)	1
Coliformes fecales,(NMP/100mL)	1000

3.11 Necesidad de fertilizantes

De acuerdo a literatura dada por el MAG para el culantro coyote se recomienda dosificación de fertilizante fosfatados las primeras dos fertilizaciones (30 d después de siembra y 15 d después del primer ciclo), y se pueden agregar fertilizantes de nitrógeno o fórmula completa, en la tercera. Como se observó en los resultados de suelos y requerimientos de cultivo, se sugiere la adición de potasio y de calcio al suelos, ya que estos son de alta absorción en el culantro y su presencia en el suelo al ser de tipo de ácido se ve reducida.

CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS DEL BIOCHAR Y BALANCES DE MASA DEL VOLUMEN DE CONTROL

4.1 Metodología

Se realizó una investigación bibliográfica sobre la generación de biochar (así como sus características) y la aplicación de biochar en el suelo. Seguidamente se aproximó la capacidad de obtención de la biomasa en la zona de estudio, así como las características, mediante consulta al productor sobre el acceso a esta.

Posteriormente, se eligió el tratamiento térmico, según la biomasa y las facilidades de secado de biomasa en la zona. A partir de estos datos se estudiaron, por medio de literatura, las posibles concentraciones máxicas de nutrientes y minerales, así como área superficial y macroporosidad del biochar, de acuerdo al tipo de biomasa y tratamiento térmico elegido.

Con estos datos de literatura se realizaron balances de masa en el suelo para cada nutriente (estimaciones, ya que se basa en fuentes bibliográficas), y se determinó si la adición de esta enmienda resulta en una mejora al sistema, considerando la concentración de nutrientes que ya hay en el suelo y los requerimientos de los cultivos.

4.2 Caracterización del biochar

En esta sección se busca determinar la cantidad de nutrientes dada por el biochar de acuerdo a literatura. La biomasa que el agricultor puede utilizar para carbonizar es biomasa forestal residual o leña, por lo que las características del biochar, así como la cantidad de nutrientes y minerales de este, se basa en el uso de esta biomasa en general.

En cuanto al procedimiento térmico a utilizar para producir el biochar se seleccionó

la carbonización instantánea. Este tratamiento térmico presenta rendimientos mayores de carbón a los obtenidos por pirólisis lenta, y aún más que por pirólisis rápida. Este procedimiento consiste en presurizar un reactor relleno con la biomasa tipo lecho. Después se enciende un fuego en la base, liberando gases a través de una campana. La carbonización tarda alrededor de 2.5 h. Y posterior a la disminución de gases pirolíticos se coloca nuevamente madera y se permite enfriar por 12 h aproximadamente (Pérez Martínez, 2015).

Hay que tomar en cuenta ciertos detalles respecto a la aplicación del biochar. Se debe buscar que este se carbonice en su totalidad; ya que sino puede que cierta cantidad de carbono se encuentre biodisponible y esto genere la inmovilización del nitrógeno, que genera efectos negativos en los suelos. Otro factor de peso en el uso del biochar es su aumento del pH, pasando de ácido a alcalino. Su capacidad de variarlo depende de factores como la biomasa utilizada y el proceso térmico, pero a grandes rasgos esto se debe a la pérdida de grupos ácidos, separación de minerales y sales alcalinas. Asimismo se debe tener extremo cuidado con los compuestos tóxicos en el biochar, siendo generalmente metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos. Para evitar su generación se debe buscar una combustión completa y una selección adecuada de la biomasa. Por otro lado, el biochar al carbonizarse aumenta su porosidad y se forman grupos funcionales poco hidrófobos, lo que permite el aumento de retención del agua en el biochar, por ende una mayor disponibilidad para las plantas. Para su aplicación se recomienda en combinación con un compost para permitir una activación microbiana y una adecuada estabilidad de los componentes. Para asegurar que la enmienda utilizada no genere daños al suelos se puede utilizar como guía lo estipulado en: Rter 485:2016. Sustancias Químicas. Fertilizantes y Enmiendas para Uso Agrícola. Tolerancias y Límites Permitidos para la Concentración de los Elementos y Contaminantes (Segura Chavarría, 2018), esto al conocer la caracterización de este.

En literatura la información más próxima que se encontró al escenario de estudio fue un biochar a partir de madera de pino en forma de astilla, pasando por un tratamiento de pirólisis lenta o rápida (Abenza, 2012). Los valores de la concen-

tración elemental del biochar se observa en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Valores de concentración elemental en el biochar reportado en literatura (Abenza, 2012).

Elemento	Pirólisis lenta	Pirólisis rápida
C (g/kg)	86.2	71.7
O (g/kg)	23.9	23.9
H (g/kg)	1.9	3.4
N (g/kg)	<0.2	<0.2
S (g/kg)	<0.2	<0.2
C:N	431	330
Na (mg/kg)	329	476
K (mg/kg)	3.484	6.404
Mg (mg/kg)	980	1.42
Ca (mg/kg)	3.769	8.273
P (mg/kg)	3.505	476
Fe (mg/kg)	1.213	1.577
Zn (mg/kg)	92 y 318	181
Cd (mg/kg)	-	-
Cr (mg/kg)	83	26.2
Cu (mg/kg)	35 y 446	12
Ni (mg/kg)	97.3	24.5
As (mg/kg)	-	-
Pb (mg/kg)	16.1	10.1

A parte del análisis químico del biochar se buscó determinar valores teóricos de las propiedades físicas y mecanismos de transferencia. Siendo algunas el área superficial, la retención de humedad, la densidad, la porosidad y la posible transferencia masa con el suelo y sus nutrientes.

El área superficial específica y la densidad del biochar en literatura varían según la temperatura de tratamiento y la biomasa utilizada. Es importante mencionar que la densidad se puede representar como la densidad esquelética y la densidad envolvente, la primera, que se mide por medio del uso de helio, toma en cuenta los poros tanto interpartícula e intrapartícula, y por otro lado la densidad envolvente solo toma en cuenta los poros intrapartícula. Para efectos de retención de agua los poros intrapartícula son los relevantes (Liu *et al.*, 2017), por lo que se presentan los datos de densidad envolvente. Para el caso de madera de pino en astilla se encontró un valor de 72 m²/g de área específica, 0.45 g/cm³ de densidad envolvente y una porosidad de

68.3 % para una temperatura de 400 °C, y 139.8 m²/g, 0.44 g/cm³ y 71.5 % para una temperatura de 550 °C (Singh *et al.*, 2017). Asimismo, Singh *et al.* (2017) presentan un valor para una mezcla de madera blanda, donde se obtiene un área de 56.8 m²/g, densidad de 0.6 g/cm³ y 58.6 % de porosidad (para una temperatura de 550 °C), y 170 m²/g, 0.69 g/cm³ y 56.9 % (para una temperatura de 700 °C). Los valores de área superficial específica se obtienen mediante una caracterización por medio de la prueba BET y la densidad por medio de un picnómetro de gases utilizando helio para la densidad esquelética, y mediante ciclos de compresión utilizando un pistón para la densidad envolvente. La porosidad se calcula por medio de la densidad esquelética y la densidad envolvente. Todos los biochar en la referencia se crearon por medio de pirólisis (Singh *et al.*, 2017).

La retención de agua en suelo, con ayuda del biochar, se debe en gran medida a la alta porosidad del material. Esta propiedad le permite a los suelos enmendados con biochar, retener mayor cantidad agua, y tenerla disponible para las plantas. En la literatura se demuestra como, por medio de curvas de retención de humedad, se consigue un mayor porcentaje de agua disponible en comparación con muestras control. Para un biochar con un tamaño de partícula de (0.8 a 2) mm se obtuvo una capacidad de absorción de agua de 0.52 m³/m³ (Liu *et al.*, 2017).

Por otro lado, la disponibilidad de los nutrientes del biochar hacia la planta varían según el nutriente y el complejo en el que se encuentra, actualmente no hay suficiente información para determinar como se da su transferencia hacia el suelo y la planta. Para el caso del nitrógeno, se cree que el biochar no logra liberar grandes cantidades, esto porque se espera que el grado de mineralización de los complejos con nitrógeno sea bajo, más tomando en cuenta la alta estabilidad del biochar (Lehmann y Joseph, 2009).

Asimismo, la materia orgánica se ve afectada por el biochar, donde su adición logra secuestrar parte del carbono, y así retener y estabilizar la materia orgánica. También, a como aporta beneficios otros estudios indican que la adición de biochar puede disminuir el carbono orgánico disuelto, debido al posible aumento de actividad microbiana, también para el caso del nitrógeno, fósforo y otros nutrientes (Sik *et al.*,

2016).

En cuanto a la aplicación de biochar en el suelo, la frecuencia y dosificación dependen en gran medida de la composición de este biochar. Generalmente la dosis se realizan en un ámbito de (5 a 50) t/ha. Es un rango bastante amplio ya que depende de los cultivos y del tipo de biochar, y además no se tiene información detallada sobre el efecto a largo plazo del biochar en el suelo. Algunos estudios indican que a mayor biochar mayor rendimiento, y otros indican que los beneficios se han visto afectados al aplicar altas dosis. Con base al estudio realizado por (Cambroner, 2018), se recomienda una relación (1 a 5) % biochar a suelo. Asimismo otras referencias recomienda un 2 % (Brye *et al.*, 2015). La aplicación de esta enmienda se realiza una vez para varios ciclos de cultivo, debido al efecto duradero por la recalcitrancia del carbón (Escalante Rebolledo *et al.*, 2016), por lo que para este caso se escoge una frecuencia de 1 vez al año. Y se puede aplicar de diversas formas, siendo la mezcla con la tierra de las más beneficiosas, permitiendo homogeneidad (Major, 2010).

La cantidad de biomasa a utilizar es variable, ya que la recolección se realizaría en las zonas forestales cercanas, así como los residuos de ramas de la finca y demás residuos maderables. Se plantea utilizar un 1 % de mezcla biochar-sustrato, según los estudios realizados por Pérez Martínez (2015), en los cuáles este valor presenta una mejora en retención de agua de los suelos, y no presenta ningún efecto en cuanto al rechazo del biochar por parte de las lombrices. Siendo el 1% volumétrico, y suponiendo una mezcla de sustrato por utilizarse de 30 cm de alto en el suelo, se necesita de 0.15 m³ de biochar para su aplicación, que utilizando dato de densidad teórica de biochar (0.45 g/cm³), sería 67.5 kg necesarios totales por aplicación. Este valor da como resultado una aplicación de 13.5 t/ha de biochar.

4.3 Análisis dinámico del volumen de control

Ya conociendo el tipo de biochar a utilizar y demás variables del sistema se procede a analizar todo el volumen de control. Para responder a las necesidades nutricionales del cultivo, y así como a las necesidades hídricas, se recurrió a determinar las entradas y salidas del volumen de control, siendo estos el suelo, la planta y el

biochar. Mediante este análisis se plantea un sistema de ecuaciones que describen este comportamiento.

En cuanto a los balances de masa en la planta se plantean tanto para el agua como para cada nutriente. El balance de agua en la planta se describe en la ecuación 8.

$$\frac{dH_p}{dt}Y_p + \frac{dY_p}{dt}H_p = w_p(t) - t_p(t) \quad (8)$$

Donde,

H_p = Humedad en base seca, g/g

Y_p = Rendimiento en base seca, g/m²

w_p = Agua de suelo, g/(m²d)

t_p = Transpiración de la planta, g/(m²d)

Tanto para la humedad en base seca como para el rendimiento de biomasa se utilizaron los resultados obtenidos en el estudio de Soto-Bravo y Moreno (2019). Con esto se determinó su comportamiento con respecto al tiempo y se construyeron ecuaciones polinomiales que las describieran. Estas se muestran en las ecuaciones 9 y 10.

$$H_p = -0.00001t^4 + 0.0013t^3 - 0.0335t^2 + 0.3192t + 6.8425 \quad (9)$$

$$Y_p = -0.0137t^3 + 1.0384t^2 - 0.7634t + 56.504 \quad (10)$$

En las Figuras 7, 8 y 9 se observa de forma gráfica las entradas y salidas de cada sistema, siendo tanto balances para agua como para nutrientes.

Para el balance de nutrientes en la planta simplemente se recurrió a la curva de absorción de nutrientes con respecto al tiempo dada por el estudio de Soto-Bravo y Moreno (2019). En las ecuaciones que se muestran a continuación se describe ese comportamiento para los nutrientes de mayor interés y de las que se tiene mayor información. Estos ajustes se realizaron por medio de CurveExpert Basic y Excel.

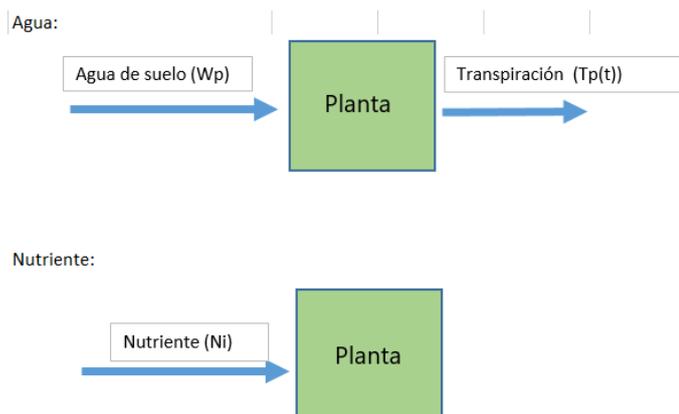


Figura 7. Esquema de balance de masa de agua y nutrientes en la planta.

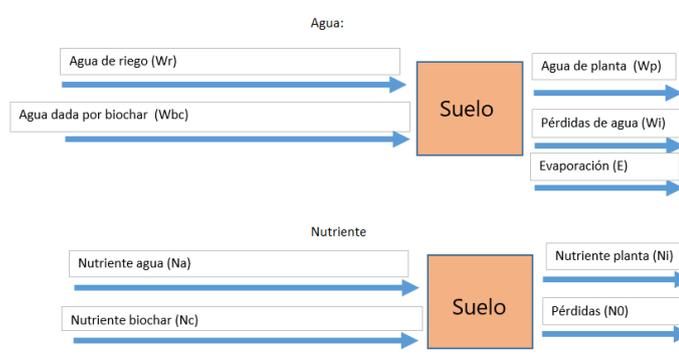


Figura 8. Esquema de balance de masa de agua y nutrientes en el suelo.

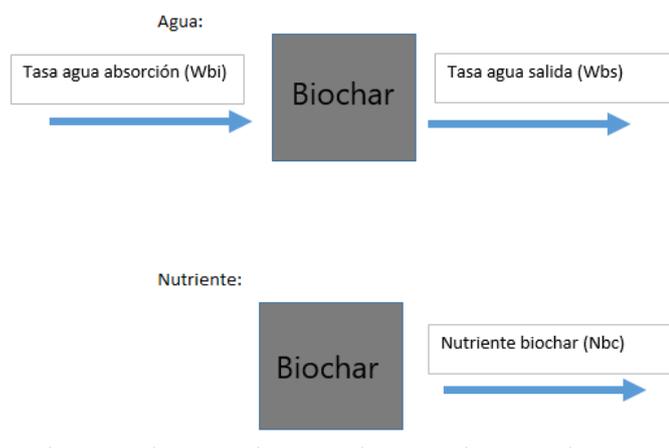


Figura 9. Esquema de balance de masa de agua y nutrientes en el biochar.

$$N_N = -0.0000006t^5 + 0.00007t^4 - 0.0028t^3 + 0.0471t^2 + 0.086t + 0.01 \quad (11)$$

Donde,

N_N = Absorción de nitrógeno en la planta, mg/(m²d)

$$N_K = 0.00003t^4 - 0.0036t^3 + 0.1115t^2 - 0.4628t - 0.147 \quad (12)$$

Donde,

N_K = Absorción de potasio en la planta, mg/(m²d)

$$N_P = \frac{0.27117 - 0.00331t}{1 - 0.04507t + 0.00055t^2} \quad (13)$$

Donde,

N_P = Absorción de fósforo en la planta, mg/(m²d)

$$N_{Ca} = -0.000003t^4 + 0.0002t^3 - 0.0037t^2 + 0.0877t - 0.0029 \quad (14)$$

Donde,

N_{Ca} = Absorción de calcio en la planta, mg/(m²d)

$$N_{Mg} = 0.0000003t^4 - 0.00005t^3 + 0.002t^2 - 0.0083t + 0.011 \quad (15)$$

Donde,

N_{Mg} = Absorción de magnesio en la planta, mg/(m²d)

$$N_S = \frac{0.034106 + 0.004268t}{1 - 0.060782t + 0.001235t^2} \quad (16)$$

Donde,

N_S = Absorción de azufre en la planta, mg/(m²d)

En cuanto al balance de agua en suelo, cuyo esquema se observa en la Figura 8, se obtiene la ecuación 17 para el de agua, y la ecuación 21 para la de nutrientes.

$$\frac{dW_s}{dt} = w_r(t) - w_i(t) + w_{bc}(t) - \left(\frac{dH_p}{dt} Y_p + \frac{dY_p}{dt} H_p \right) - \rho_{agua,r} ET_0(t) * K_c \quad (17)$$

Donde,

W_s = Contenido de agua en el suelo, g/m²

w_r = Agua de riego, g/(m²d)

w_i = Agua de infiltración, g/(m²d)

w_{bc} = Agua aportada por el biochar, g/(m²d)

$\rho_{agua,r}$ = Densidad agua de riego, kg/m³

ET_0 = Evapotranspiración del cultivo, L/(m²d)

K_c = Coeficiente de crecimiento del cultivo, adim

Es importante recalcar que el balance de agua se limita a un periodo de tiempo dado por el ciclo del cultivo y la evapotranspiración de la época del año, por lo que para este caso se describirá el comportamiento matemático para los primeros tres meses del año a modo de ejemplo. Para cada periodo existe una ecuación de evapotranspiración que la caracteriza.

Cada entrada y salida se describe a partir de una ecuación matemática o alguna definición. En este caso el agua de riego es la incógnita. El agua de infiltración según estimaciones de Carrazón Alocen (2007), es de alrededor del 10% del agua aplicada. Y el agua aportada por la evapotranspiración se describe mediante la ecuación 18.

$$K * ET_0 = -2E - 05t^3 + 0.0012t^2 + 0.0981t + 2.8797 \quad (18)$$

Por otro lado, para el caso del agua aportada por el biochar se recurrió a un algoritmo que incluye dos ecuaciones, las cuales dependen del contenido de agua en la interfase

(suelo), en el biochar y en el punto de saturación de este. Estas ecuaciones describen el comportamiento del biochar, donde al saturarse el medio de agua el biochar absorbe hasta su punto de saturación, y al irse perdiendo agua del suelo, el biochar libera el agua. Esta ecuación se describe como un equilibrio, con una constante de tiempo. El algoritmo muestra dos ecuaciones, si se cumple la condición se desarrolla la ecuación 19 y sino se recurre a la ecuación 20. La elección del valor de la constante dinámica de 1/2 se debe al lapso de riego para cada dos días.

$$dH_{bc} = -\frac{(H_{bc} - H_{bci}) * (H_{satbc} - H_{bc})}{tau}; si(H_{bc} - H_{bci}) \leq 0 \quad (19)$$

$$dH_{bc} = -\frac{H_{bc} - H_{bci}}{tau} \quad (20)$$

Donde,

H_{bc} = Contenido de agua en el biochar, g/g

H_{bci} = Contenido de agua en la interfase, g/g

H_{satbc} = Punto de saturación del biochar, g/g

τ = Constante dinámica de tiempo, d

En cuanto al balance de nutrientes en el suelo, se describe su comportamiento en la ecuación 21

$$\frac{dN_{is}}{dt} = N_{ai}(t) - dN_{bci}(t) + N_F - N_{0i} - \frac{dN_i}{dt} \quad (21)$$

Donde,

N_{is} = Contenido de nutriente en el suelo, mg/(m²d)

N_{ai} = Nutriente i aportado por el agua de riego, mg/(m²d)

dN_{bci} = Nutriente i aportado por el biochar, mg/(m²d)

N_F = Nutrientes aportados por fertilizantes, mg/(m²d)

N_{0i} = Pérdida de nutriente i, mg/(m²d)

Para cada entrada y salida, a excepción del aporte por fertilizantes que es la incógnita, se desarrolla la ecuación matemática que lo representa, y estas para cada nutriente. A continuación se describen las ecuaciones de nutrientes aportados por el agua de riego, por el biochar y las pérdidas de nutrientes.

$$N_{ai}(t) = ET_0(t) * K * C_{ia} \quad (22)$$

Donde,

C_{ia} = Concentración del nutriente en el agua de riego, mg/L

Para el caso de los nutrientes en el agua de riego su única variación es la concentración de ellos en esta. Para fines prácticos, se determina constante esta concentración a lo largo del tiempo, ya que el dato con el que se diseña es un valor teórico, de acuerdo al diseño del biodigestor realizado por Biomatec. Para los nutrientes nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio y azufre los valores concentración utilizados son (317.9, 358.99, 183.67, 841.72, 13.14 y 36.12) mg/L, respectivamente. Este valor solo depende de la evapotranspiración, ya que indica la cantidad de agua estimada a regar. Asimismo, se desarrollaron los resultados con los valores reales del biol, las concentraciones utilizadas respectivamente son (100, 300, 0, 100, 0 y 0) mg/L.

Seguidamente, para los datos de infiltración o pérdida de nutrientes se describe su comportamiento de acuerdo a la ecuación 23. Este valor de pérdida se toma como un porcentaje de las entradas de nutrientes, que para este caso es el nutriente del agua de riego y el nutriente por adicionar. Para los nutrientes nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio y azufre los porcentajes de pérdida son de 30 %, 5 %, 30 %, 15 %, 15 % y 20 %. Estos valores se obtuvieron de literatura y aproximaciones de esta, siendo principalmente de Sadeghian *et al.* (2015), Acón *et al.* (2013) y Bacca *et al.* (2011).

$$N_{0i}(t) = X_P * (N_{ai}(t) + N_F) \quad (23)$$

Donde,

X_p = Porcentaje de pérdida de nutrientes, %

Finalmente, para incluir el aporte de nutrientes del biochar al suelo se recurrió a un análisis dinámico, donde se determina una cantidad máxima de adición de nutrientes al suelo por parte de la enmienda, el cuál lo va liberando a lo largo del tiempo asimilando un comportamiento exponencial. Este comportamiento se confirmó con la dinámica presentada por el nitrógeno en el biochar a lo largo del tiempo en un estudio de campo (Sun *et al.*, 2015). Y al no encontrar literatura que desarrollara el comportamiento de otros nutrientes, todas se aproximaron a este. Para este caso se utilizó una constante de tiempo de 73 d, llegando hasta los 365 d, día en el cual se vuelve a aplicar biochar. En la ecuación 24 se describe la ecuación utilizada para la liberación de nutrientes de biochar.

$$\frac{dN_{bci}}{dt} = -\frac{N_{bci} - N_{fbci}}{\tau} \quad (24)$$

Donde,

N_{bci} = Concentración de nutriente en el biochar, mg/kg

N_{fbci} = Concentración final de nutriente en el biochar, mg/kg

CAPÍTULO 5

DISEÑO DEL CARBONIZADOR

5.1 Metodología

Se ahondó en una investigación sobre diseños de carbonizadores y las ventajas de unos sobre otros. Y a partir del tratamiento térmico se eligió el diseño más adecuado para el sistema de carbonización, guiándose con estudios de la FAO y un diseño de carbonizador del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Para el diseño primeramente se determinó la capacidad del carbonizador. Esto con base a la cantidad de biomasa de la zona y de biochar necesario a proveer a los cultivos, estimados en el capítulo 4. Ya con las medidas y el diseño general del carbonizador se determinaron los materiales, condiciones de operación y dimensiones del mismo.

5.2 Diseño del carbonizador

Para el diseño del carbonizador se utiliza como guía el prototipo elaborado en la tesis Evaluación de un carbonizador portátil de bajo costo en la valorización de residuos biomásicos lignocelulósicos del Tecnológico de Costa Rica. En este proyecto realizan una carbonización pirolítica de residuos lignocelulósicos de fábricas de tarimas y construcción. Las etapas de la carbonización se pueden clasificar en cuatro:

- I etapa: etapa de secado (a baja temperatura) donde se libera el agua superficial de la biomasa.
- II etapa (100 a 300) °C: se da la deshidratación exotérmica, donde se libera el agua y ciertos gases de bajo peso molecular. Así como se destilan ciertos aceites.
- III etapa (200 a 600) °C: en esta etapa se da la descomposición de las moléculas largas en carbón.

- IV etapa (300 a 900) °C: se da el craqueo de volátiles a carbón y a gases.

Se plantea construir una réplica del horno metálico transportable de Pérez Martínez (2015), el cual tiene ventajas sobre otros sistemas como las fosas de tierra, parvas u hornos de ladrillo (FAO, 1983). Entre sus ventajas está un tiempo del ciclo menor, se puede transportar, y presenta un mayor rendimiento (30 %), así como un carbón de mejor calidad.

El carbonizador cuenta con 4 partes desarmables: la tapa, el barril modificado, la campana y la chimenea. Todas las partes son metálicas.

- La tapa tiene la función de sellar el barril modificado una vez cargado. Utiliza hebras de brillo fino comercial para lograr un sello hermético (Cambronero, 2018). Esta etapa es de acero.
- El barril cumple la función de ser la cámara de carbonización (en la tesis posee una capacidad de 0,208 m³), y esta sección posee tres tubos (de hierro) que se asemejan a patas, y logran el movimiento de los gases pirolíticos desde la parte superior al lugar inicial donde se genera la combustión. Estos se unen al barril mediante codos.
- La campana es hueca (ya que se coloca encima del barril) y removible. Consta de una parte inferior donde hay tres puertas para permitir la entrada de leña, aire y gases pirolíticos. En la parte del medio se diseñan agarraderas para una mejor manipulación.
- La chimenea se coloca encima de la campana, este dispositivo logra dirigir emisiones a mayores alturas reduciendo exposición.

En cuanto a los materiales del equipo se encuentra un barril, campana y chimenea metálica, y una tapa de acero. Asimismo el material de los tubos de reciclo de los gases es hierro. Por último, para lograr el sello hermético en la tapa del reactor se utiliza un sello de hebras metálicas, conocido como brillo fino.

En las Figuras 10 y 11 se puede observar con mayor detalle las distintas secciones del carbonizador. Asimismo, las dimensiones se muestran en la Figura 12.

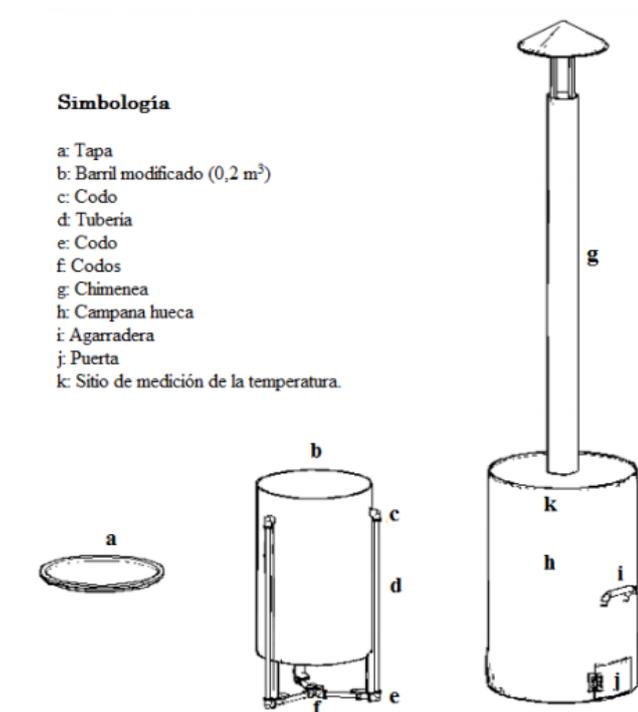


Figura 10. Diagrama general del carbonizador portátil y sus distintas secciones (Pérez Martínez, 2015)



Figura 11. Carbonizador ya puesto en marcha (Pérez Martínez, 2015)

El proceso de operación se puede dividir en varias etapas:

1. Se debe llenar el barril con la biomasa, de forma que queden espacios para la circulación de aire. En caso de ser leña, se coloca los trozos grandes de forma vertical, y los más pequeños rellenan espacios, y sin tapar el fondo.
2. Se tapa el reactor, se coloca la campana sobre el reactor y encima la chimenea.

3. Se coloca cierta cantidad leña debajo del barril (usando las puertas de la campana) y se enciende.
4. Se continúa suministrando leña hasta llegar a la etapa autosostenida, donde se escuchan sonidos y ya hay flujo de gases pirolíticos a través de los tubos.
5. Al observar disminución de salida de gases por tubería se coloca una carga final de leña.
6. Se deja enfriar y se traslada carbón a un saco.

El tiempo de cada etapa del ciclo puede variar, según la biomasa, flujo de aire y otros parámetros, pero de forma general se aproxima de la siguiente manera:

- Adecuación de biomasa y cargado de carbonizador: 20 min
- Calentamiento del reactor: 115 min
- Fase pirolítica: 55 min
- Calentamiento final: 15 min
- Enfriamiento: 90 min

Se obtiene un ciclo total de 295 min.

Como se mencionó anteriormente, los rendimientos rondan el 30 % de biochar a partir de la biomasa, que para una tanda de carbonización (del prototipo de Pérez Martínez (2015)) puede aproximarse a 14 kg de biochar. Y se consume alrededor de 34 % de leña (para sostener el proceso inicial de calentamiento), con respecto a la carga del barril (Pérez Martínez, 2015). Por lo tanto, a partir de la necesidad de biochar en el suelo, se propone el diseño de un carbonizador de mayor tamaño al mencionado por Pérez Martínez (2015), y con esto reducir la cantidad de tandas. En total para producir 67.5 kg de biochar, que es la cantidad necesaria para cubrir el área de cultivo, se necesita de 210.9 kg de biomasa inicial. Y utilizando el carbonizador con las dimensiones dadas en en la Figura 12, se requiere de 3 tandas para producir la cantidad deseada. Por último, la cantidad de leña necesaria para sostener el tratamiento térmico es de 36.25 kg por tanda, o 108.77 kg totales.

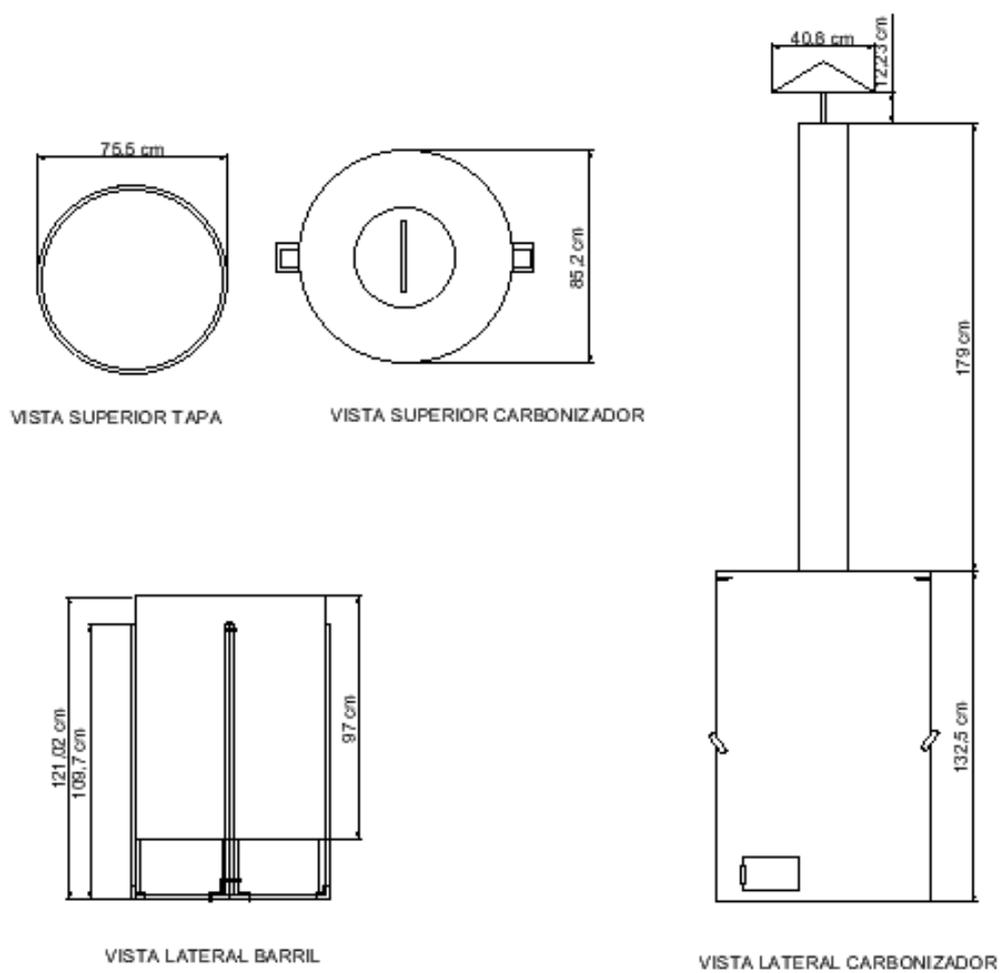


Figura 12. Distintas secciones y dimensiones del carbonizador (Elaboración propia).

CAPÍTULO 6

DISEÑO DEL SISTEMA DE FERTIRRIEGO

A partir del análisis de datos realizados en los capítulos anteriores se prosiguió a proponer el sistema y realizar los cálculos hidráulicos para satisfacer la demanda requerida.

6.1 Metodología

A partir de los resultados obtenidos con los análisis de la zona y los balances de masa a partir del uso de biochar, se realizó el diseño de todo el sistema de fertirriego.

Inicialmente se profundizó, mediante la investigación bibliográfica, en los parámetros y características de diseño recomendados para el sistema en cuestión: fertirriego mediante goteo. Como es la velocidad de flujo, materiales, sistemas de dosificación, elementos del sistema, reguladores, etc.

Conociendo la regulación de flujo según la permeabilidad del suelo, la cinética de absorción de nutrientes y agua de los cultivos (mediante modelado matemático), la distribución de los cultivos, y determinando el aparato de emisor a utilizar se definió el caudal necesario a regar. Asimismo, se propuso una distribución de las tuberías, junto con sus accesorios, adecuado al espacio. A partir de los caudales, accesorios y distribución de tuberías se utilizó la ecuación general de la energía para realizar los cálculos de caída de presión, diámetros y velocidad del fluido, ya sea laminar o turbulento.

A partir de esta información se procedió a realizar una simulación en una plataforma virtual que ayudara a apuntar, mediante análisis de sensibilidad, a una mayor rigurosidad y calidad en el dimensionamiento hidráulico, utilizando el software Comsol. Finalmente, con los resultados obtenidos, se realizó la selección de tanques, bombas, accesorios y materiales adecuados, así como el dimensionamiento completo del sistema.

6.2 Diseño sistema de tuberías

Para conocer el comportamiento del agua y los nutrientes en el suelo se simularon los balances de masa, propuestos anteriormente, en MATLAB. Para este caso se utilizó la función `ode15s`, y se desarrollaron todas las ecuaciones (absorción de la planta, interacción con biochar y pérdidas atmosféricas); en el anexo A se encuentra el código utilizado. Al tener un sistema en el cuál los cultivos son por ciclos, se debe variar la ecuación de evapotranspiración acorde a la época del año. Por esta razón se replicaron siete simulaciones, donde en cada ciclo de cultivo varía la evapotranspiración, las concentraciones de nutrientes en suelo se continúan, y la liberación de nutrientes por parte del biochar responde a la dinámica de desgaste a lo largo de todo el año.

Las condiciones iniciales de nutrientes en el suelo responden al análisis químico realizado, y la del agua al análisis físico, en el cual se utiliza un valor inicial correspondiente al punto de saturación del suelo. Los valores del agua de riego y de nutrientes por adicionar en el fertilizante se igualan a cero, y lo que se busca con la simulación es analizar la faltante de estos a lo largo del tiempo. A partir de este análisis se obtuvieron los resultados que se observan en la Figura 13 y 14. Estos gráficos son representativos del primer ciclo de cultivo del año.

En la Figura 13 se observa el comportamiento de la concentración de agua en el suelo, en el biochar y en la planta. La condición inicial del agua del suelo es el punto de saturación y esta decae, ya que en la simulación no se contempla el riego. Asimismo, el comportamiento del agua en la planta se comporta de acuerdo a lo esperado, ya que al ir creciendo la planta la demanda hídrica aumenta. Por último, para el caso del agua del biochar, aunque no se observe, esta se encuentra en su punto de saturación, y al irse acercando la concentración de agua a este punto el biochar comienza a ceder hasta llegar a cero. De este punto sigue disminuyendo en la gráfica a valores negativos, pero en condiciones reales esto claramente no sucede.

A partir de los datos de concentración de agua en el suelo, se extrajeron los vectores correspondientes a los ejes. Siendo tiempo (cada día) y humedad en el suelo (g/m^2). A partir de estos datos se obtuvo el requerimiento hídrico diario mediante la difer-

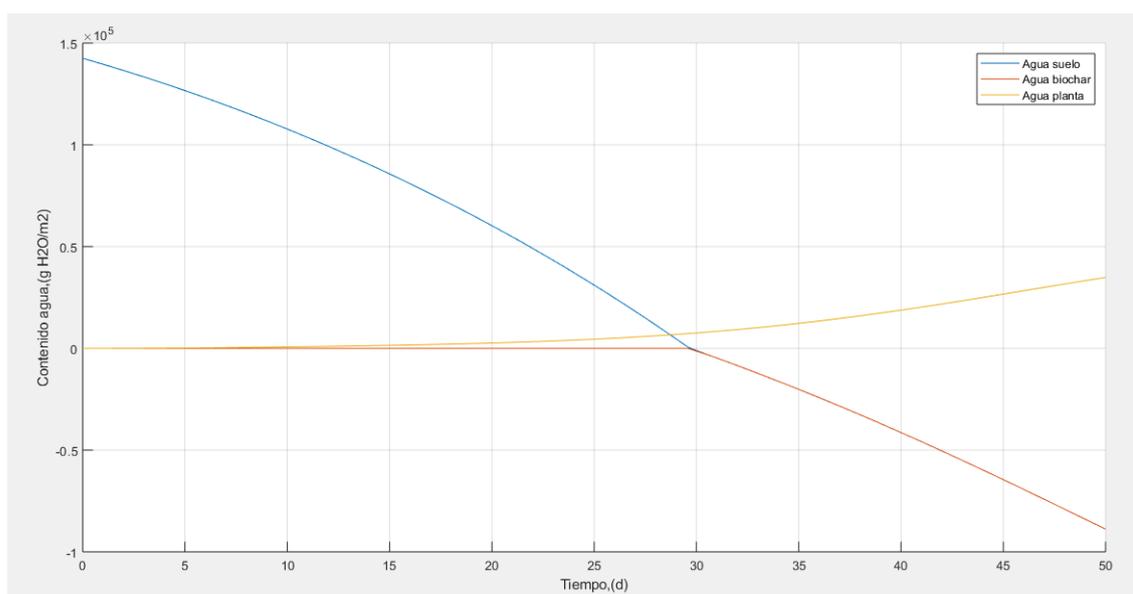


Figura 13. Gráfico de MATLAB de contenido de agua en el suelo, en biochar y en planta a lo largo del tiempo para el primer ciclo de cultivo.

encia de humedad entre días, y se detectó el valor más alto, tanto a lo largo del ciclo como para todos los ciclos (siete ciclos a lo largo del año). Este valor es de $0.41 \text{ m}^3/\text{d}$ (siendo para el cuarto ciclo), incluyendo la pérdida de agua por infiltración. Este dato en comparación al requerimiento hídrico calculado mediante la metodología de Carrazón Alocen (2007) ($0.44 \text{ m}^3/\text{d}$) resulta parecido, aunque un poco menor, esto puede deberse a una mayor precisión y/o el uso de biochar que sí se contempla en este caso.

Y en cuanto a los nutrientes, el gráfico que se observa en las Figuras 14 y 15 describe la concentración de los nutrientes de mayor interés en el suelo a lo largo del tiempo, para los parámetros teóricos y reales del biol. Para la mayoría de nutrientes se observa un incremento significativo, solamente para el caso del biol con datos experimentales se requiere nitrógeno para un buen balance nutricional. El biol contiene gran cantidad de nutrientes, por lo que su aporte es generalmente mayor a lo que la planta consume para su crecimiento. Si este aumenta a más de los límites puede acarrear en daños a la planta, ya que se forman depósitos en los suelos y se altera de forma negativa el pH del suelo. Aunque en la simulación de MATLAB el acumulado de nutrientes aumenta rápidamente, principalmente calcio y potasio, es importante recalcar que las concentraciones de biol pueden variar bastante y además sus con-

centraciones pueden disminuir al trasegar por el sistema de riego que contempla los filtros, por lo que no se descarta su uso. Además, de acuerdo a los parámetros experimentales del análisis del biol, este presenta una CE media, por lo que regula la salinidad del suelo.

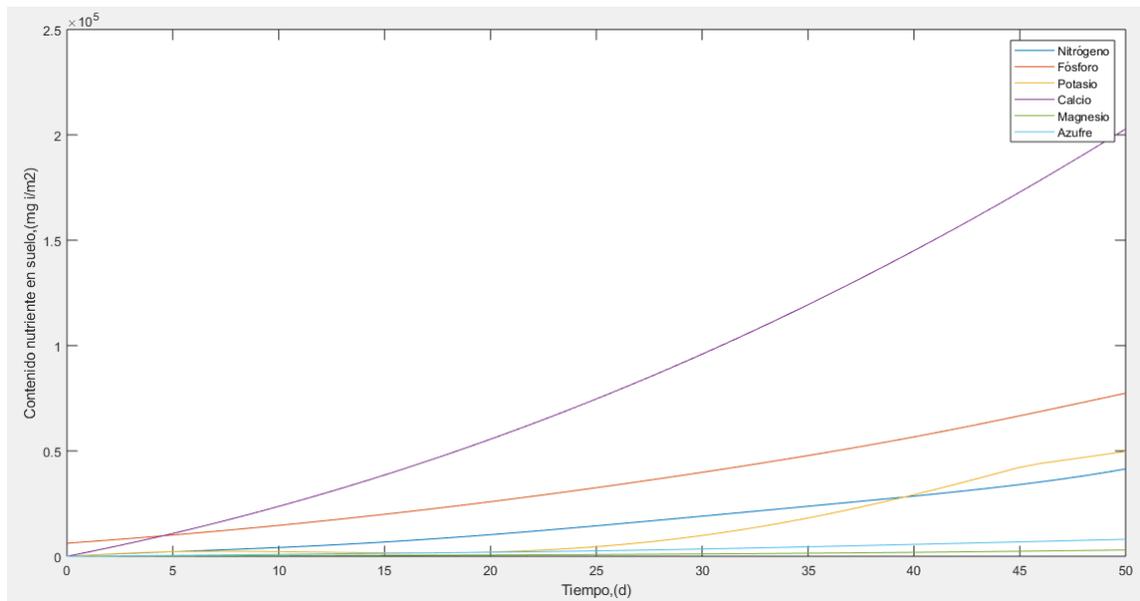


Figura 14. Gráfico de MATLAB de contenido de nutrientes en el suelo a lo largo del tiempo para el primer ciclo de cultivo, utilizando parámetros teóricos del biol.

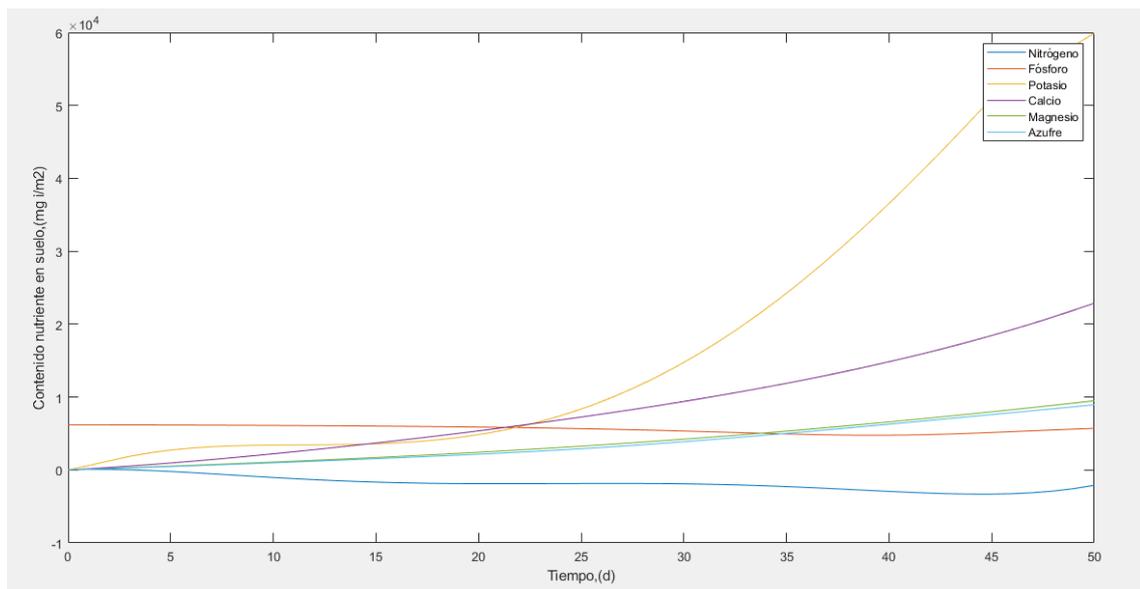


Figura 15. Gráfico de MATLAB de contenido de nutrientes en el suelo a lo largo del tiempo para el primer ciclo de cultivo, utilizando los parámetros experimentales del biol.

Contemplando otro escenario se propone utilizar el biol diluido con agua para reducir las altas concentraciones de nutrientes. En una proporción de 2:1 del volumen del biol con agua se obtienen las concentraciones siguientes (a partir de los datos teóricos): (158.95, 179.5, 91.84, 420.86, 6.57 y 18.063) mg/L de nutriente, respectivamente N,K,P,Ca,Mg y S. Estos valores, a pesar de la disminución, aún logran un aumento de los nutrientes en el suelo, tomando en cuenta la absorción de estos por parte del culantro, excepto para el potasio. En el caso del potasio, si se disminuye su concentración en el agua, habrá un periodo en el que el suelo estará carente de este nutriente, por lo que habría que suplirlo con fertilizantes. Además del potasio, de acuerdo a los datos experimentales del biol, habrá también un requerimiento nutricional de nitrógeno. Por lo tanto, para el caso de estudio se utilizará el biol sin dilución, para lograr suplir todas las necesidades elementales de la planta. En la Figura 16 se puede ver el comportamiento de los diferentes nutrientes en el suelo con esta variación, así como el periodo en el que el potasio se encuentra "bajo cero".

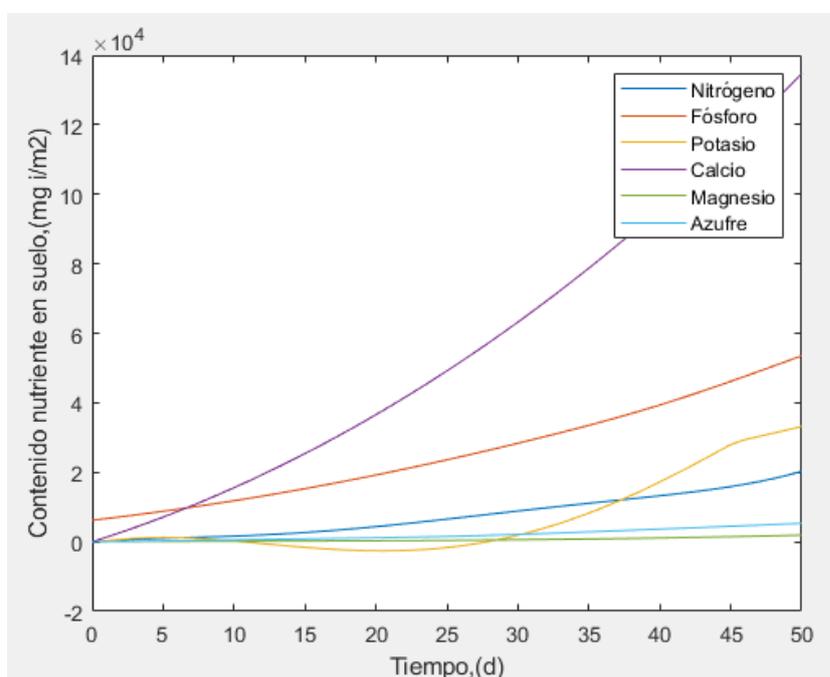


Figura 16. Gráfico de MATLAB de contenido de nutrientes en el suelo a lo largo del tiempo para el primer ciclo de cultivo, con el biol diluido en una proporción 2:1.

Inicialmente, con los valores teóricos del biol, la simulación da como resultado un escenario en el que no es necesario la aplicación de fertilizantes. Pero al diseñarse

este sistema para posibles proyectos con otros cultivos, igual la etapa de inyección de fertilizantes se incluye en el diseño, siendo esta de solamente una entrada. En el caso de estudio, el diseño para la etapa de adición de fertilizantes al culantro se basó con lo que se aplica en las prácticas usuales a este. Por lo que se decide aplicar nitrato de potasio y fosfato monoamónico, los cuales son compatibles y de fácil adquisición. De acuerdo a los cálculos se decide aplicar 920 g de nitrato de potasio y 536.6 g de fosfato monoamónico en un tiempo de aplicación de 20 d.

Al desarrollarse la simulación utilizando los parámetros reales del biol sí se observa la carencia de nitrógeno en su desarrollo. Por lo cual se extrae el vector de concentración de nitrógeno en el suelo de MATLAB, y con este se realiza una diferencia entre los valores para obtener el requerimiento de nitrógeno diario, y finalmente el requerimiento total en el ciclo. El cual es de 2.1 g/m^2 , y este valor se replica para todos los ciclos. El desglose diario se observa en el Cuadro B.15. Los cálculos de inyección de fertilizantes realizados previo a estos resultados se adaptan a las necesidades del sistema real. Con la diferencia de que solo con la adición de nitrato de potasio ya se cubre el requerimiento de nitrógeno total del ciclo.

Tomando en cuenta estos valores de aplicación de fertilizantes se plantea una etapa de fertirrigación con un tanque de fertilizante acuoso de 150 L. De este se extrae para la aplicación alrededor de 6.8 L diarios para el lapso de días en los cuales se añade, siendo el flujo de inyección deseado de alrededor de 30 L/h. Esto es tanto para el nitrato de potasio como para el fosfato monoamónico.

A partir de la demanda hídrica se plantea para la descarga del sistema un arreglo ramificado, donde diez mangueras con goteros se distribuyen a lo largo de la zona, como ya se había comentado en la Figura 6. Estas mangueras, de 4.7 m de largo, poseen goteros separados entre ellos por 20 cm, y cuyo caudal individual es de 2 L/h a una presión máxima de 0.7 bar absoluta. Y entre líneas de goteros habrá una separación de alrededor de 1 m. En este arreglo el sistema es capaz de descargar $0.475 \text{ m}^3/\text{h}$, por lo que el tiempo de riego (realizando el riego cada dos días) es de 2 h. Es importante recalcar que es posible realizar el riego cada dos días por las propiedades físicas de la tierra, donde el máxima intervalo entre riegos debido al

agua utilizable es de 2.31 d, esto para no crear un déficit hídrico en el suelo.

Al ser un flujo tan bajo se dificulta la velocidad a la que sale el agua por las mangueras, ya que se busca que sea de alrededor de 0.6 m/s para evitar obstrucciones. No obstante, para el sistema es necesaria recalcar que se está diseñando con condiciones máximas, y no resulta efectivo aumentar la velocidad de riego porque es recomendable un tiempo de riego suficiente para asegurar una entrada de media hora de fertilizantes, y entre 15 a 30 min al inicio y al final de agua para limpiar los drenajes, logrando apenas alcanzar esa dinámica con las dos horas de riego mencionadas anteriormente. En caso de no aplicarse fertilizantes sí es posible regar todos los días, ya que no hay un tiempo mínimo de aplicación necesario que cumplir.

El sistema hidráulico planteado se observa en la Figura 17. El trayecto comienza en el tanque de almacenamiento (T-101) y sigue en la línea principal conformada por los siguientes accesorios y etapas: bomba (P-102), válvula check, válvula de aire, manómetro, válvula de globo, filtro de arena (F-103), válvula, medidor de flujo, etapa de inyección fertilizante (manómetros y flujos paralelos utilizando una válvula reguladora de flujo y un inyector tipo venturi) y filtro de discos (F-105). Posterior a esto se ramifica en dos línea secundarias, en las que se coloca una válvula de aire y de globo. Y esta líneas secundarias se ramifican cada una en cinco mangueras de goteo.

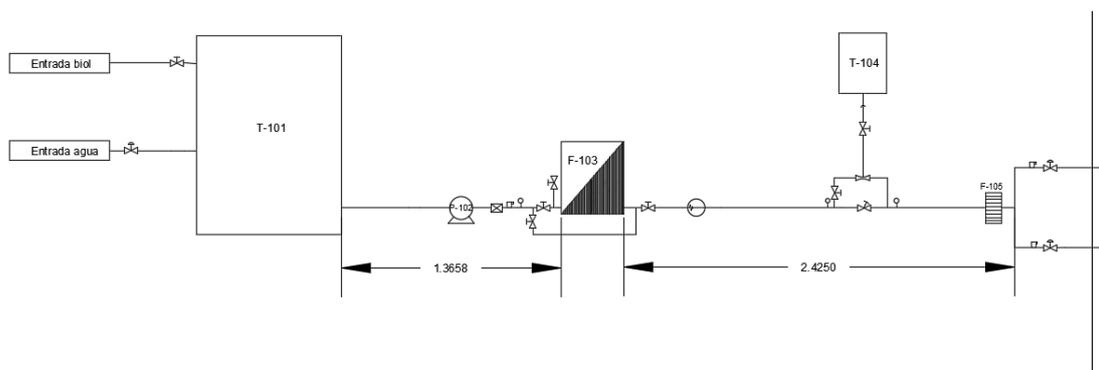


Figura 17. Esquema de equipos y accesorios del diseño del sistema hidráulico de la línea principal.

El primer equipo en la línea es el tanque de almacenamiento (T-101), el cual debe retener el biol que se libera del biodigestor. Como el riego no es continuo, ya que se

realiza solo en un momento del día y en el tiempo dictado por el control automático, se debe asegurar suficiente almacenamiento para este. Por lo tanto, se diseñó un tanque que logre retener el flujo del biodigestor por 4 d máximo, en el cual se recibe un flujo promedio del biodigestor de $0.447 \text{ m}^3/\text{d}$ (según los resultados aportados por Biomatec). Tomando esto en cuenta, el tanque de almacenamiento debe ser de en promedio de 1.8 m^3 . Y en cuanto al material, el plástico es de bajo costo y cumple las propiedades para retener este fluido. En el mercado hay gran diversidad de marcas que cumplen estos requerimientos, por lo que se selecciona como posible tanque uno de marca Ecotank de 1750 L.

Para el diseño del tren de fertirriego las etapas y su orden, se estudió principalmente el manual de fertirriego de Netafim, así como otros manuales comerciales. De estos se obtuvo los valores límites para el diseño de las tuberías, mencionados anteriormente, y los equipos necesarios para conseguir un buen riego.

Posterior al tanque de alimentación se coloca la bomba centrífuga (P-102), y seguida de esta una válvula de aire, un manómetro y una válvula de bola que permite el ingreso al filtro de arena. La válvula de aire tiene como objetivo evacuar cualquier volumen de aire en el sistema que pueda ocasionar daños en la tubería. Y por otro lado, el manómetro en ese punto busca determinar la presión previo a la entrada del filtro. Después del filtro de arena se coloca una válvula y un medidor de flujo. Esta válvula final y válvulas extras permite un retroflujo a la hora de dar mantenimiento al filtro. Y el medidor de flujo busca determinar el flujo real en el sistema para analizar el riego adecuado, por lo que se coloca un medidor simple de flujo en línea.

Seguidamente está la etapa de aplicación de fertilizantes. Para su diseño se utilizó el requerimiento nutricional teórico de nitrógeno que usualmente en la práctica diaria se aplica al culantro. Con este valor y una adecuada distribución de fósforo y potasio se propone un uso de nitrato de potasio y fosfato monoamónico (solubles entre sí), con el primero se aplica un 65 % del requerimiento de nitrógeno y con el segundo el 35 % faltante. Con base en los cálculos de fertilizantes se diseña un sistema con un tanque de 150 L (T-104), en los que se disuelve la cantidad de fertilizantes necesaria para aplicarlos en un tiempo de 20 d. Con la aplicación diaria de fertilizantes y el

tiempo de riego calculado anteriormente se requiere de una inyección de alrededor de 31.8 L/h. Por lo que para el sistema se seleccionó como aparato un inyector venturi, este tiene la ventaja de ser de bajo costo, no requiere de energía externa y es fácil de utilizar. Tiene la desventaja de no poseer gran precisión en su inyección, pero para el caso de estudio no es necesaria tan alta precisión, solo se debe supervisar la presión. El inyector venturi seleccionado como opción para el sistema es marca Mazzei modelo 384.

Este inyector al funcionar por medio de una diferencia de presión en la corriente principal se decide colocarlo de forma paralela a una válvula reguladora de presión, para asegurar una caída de presión y por ende una inyección adecuada. Antes y después de la etapa de inyección de fertilizantes se coloca un manómetro para analizar la caída de presión. Asimismo se coloca una válvula en el sistema de inyección, que se pueda cerrar cuando no se deseen aplicar fertilizantes.

Posterior a esa etapa se coloca un filtro de discos (F-105) previo a la separación en dos líneas secundarias, donde se coloca nuevamente una válvula de aire y una válvula de globo en el inicio de cada línea. Esto permite utilizar las dos líneas secundarias por separado, en caso de que sea necesario. Y estas se ramifican en cinco mangueras con goteros, donde recorre el biol y la adición de fertilizantes en caso de que fuese necesario. Las mangueras de riego propuestas son marca Irritech, y son ideales para riego en invernaderos y con espacio entre goteros cortos, estas son de polietileno. Finalmente se propone conectar estas mangueras a una línea externa para purgar y limpiar el sistema como mecanismo de mantenimiento.

En cuanto a la filtración del sistema la razón para proponer una filtración doble con el filtro de arena y el de discos es para asegurar un flujo continuo evitando obstrucciones y daños al sistema, más considerando que el biol utilizado posee un alto valor de sólidos totales, y estos pueden ocasionar precipitados con los fertilizantes y además inhabilitar goteros por su taponamiento. El filtro de arena se coloca posterior al tanque de almacenamiento ya que es probable que el biol en el tanque permanezca cierto tiempo ahí, y se generen depósitos con el tiempo al irse estabilizando. La primera etapa logra eliminar el grueso de los sólidos, y la segunda etapa asegura la

filtración en caso de posibles reacciones dentro del sistema o sólidos remanentes.

Para obtener la potencia y características de la bomba para impulsar el sistema se realizaron los cálculos hidráulicos manuales correspondientes a las tuberías. Para esto se recopiló de literatura y de datos comerciales la pérdida de presión o carga en cada etapa de los distintos equipos y accesorios. Con esto y aplicando la ecuación general de la energía se obtuvo una potencia muy baja, de 0.015 HP incluyendo un 60 % de eficiencia, esto debido a una pérdida de carga también baja, de 7 m. Paralelo a esos cálculos se buscaron bombas que con sus curvas características se acoplaran a la pérdida de carga y caudal utilizados, que para cuyo caso se encontraron varias con una potencia más alta y con mayor sentido real que la obtenida mediante los cálculos manuales. Por lo que se propone el uso de una bomba dosificadora de diafragma o una bomba centrífuga pequeña adecuada al rango de flujos de interés. Para esto resaltan marcas como Albin pump, Macroy, Lewa y Grundfos. Así como otras bombas centrífuga que podrían adaptarse al caso de estudio.

6.3 Simulación de sistema de tuberías

Para finalizar el diseño de tubería se realizó una simulación en Comsol con la cual se contrastan los resultados y se analiza a fondo el comportamiento del fluido en cuanto a presión y velocidad a lo largo de la tubería principal y las ramas. Para este caso se utilizó la física de flujo en tuberías, y se colocaron todos los equipos descritos anteriormente, así como las pérdidas de carga recopiladas de literatura de cada etapa. A partir de la simulación se obtuvieron los gráficos que se observan en las Figuras 18,19,20, 21, y 22. Asimismo se realizó un barrido paramétrico, donde se analizaron 12 caudales distintos, en las figuras se pueden ver sus diferencias.

La presión, como se observa en la Figura 18, va en aumento desde la bomba hasta las ramas, como es de esperarse, y en cada rama presenta un valor similar de presión, y adecuado para la restricción máxima de presión de las mangueras. La sección roja es la parte inmediata posterior a la bomba, con el valor más alto de presión, y seguido de esto va disminuyendo la presión hasta llegar a las ramas y goteros. En este caso la presión en las ramas resulta un poco mayor a la presión atmosférica, lo que permite

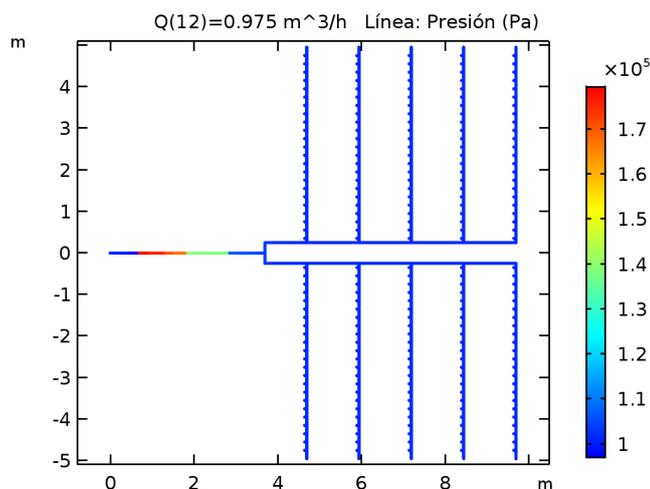


Figura 18. Simulación en Cmsol de la presión en todo el sistema de tuberías utilizando un esquema de colores, y con una escala en Pa.

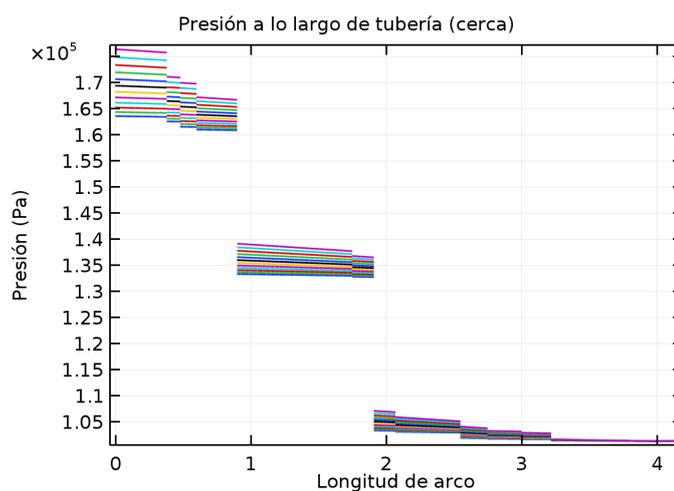


Figura 19. Barrido paramétrico en Cmsol de la presión a lo largo de toda la tubería hasta llegar al primer gotero en la primera línea, cada color representa un caudal distinto.

la salida del fluido. Y en la Figura 19 se observa cómo la presión va disminuyendo al trasegar por la tubería y al ramificarse, para los distintos flujos estudiados en el barrido paramétrico. Este gráfico, que representa la distancia hasta el primer gotero de la primera línea, se comparó con los resultados para la distancia hasta el gotero de la última línea, y con la líneas de goteros de la otra rama secundaria. Con base en la simulación no hay diferencias entre las dos tuberías principales secundarias, pero sí una diferencia no tan importante entre la primera línea y la última línea, que ayuda a entender el movimiento del fluido. Este movimiento se refuerza con el análisis de

los resultados de la velocidad. Y en cuanto al barrido paramétrico la comparación entre los distintos caudales no presenta una diferencia significativa para el caso de la presión, como se observa en la Figura 19, no hay variaciones importantes de presión entre ellas, siendo todavía menores en la última sección (mangueras y goteros).

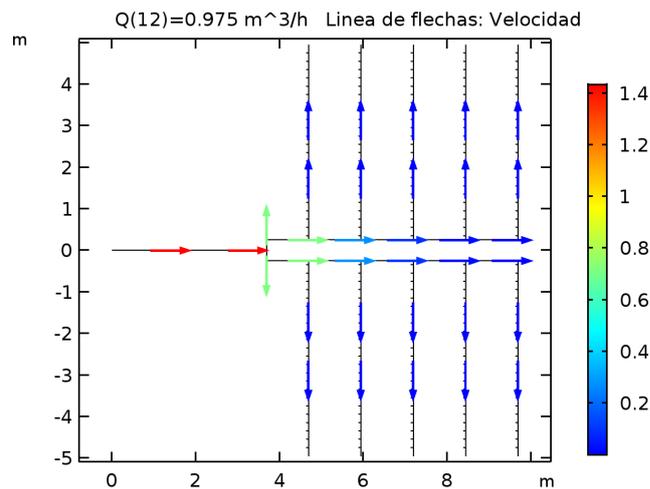


Figura 20. Simulación en Comsol de la velocidad en todo el sistema de tuberías utilizando un esquema de colores y dirección del fluido.

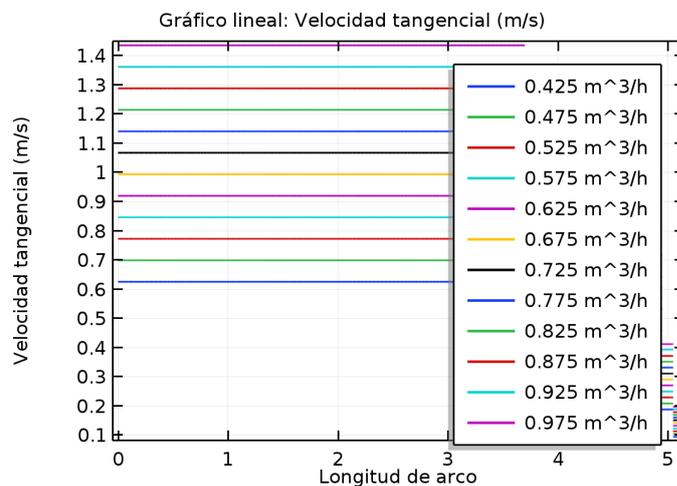


Figura 21. Simulación en Comsol de la velocidad a lo largo de la tubería hasta llegar al primer gotero de la primera línea.

Para el caso de la velocidad se obtuvo los gráficos que se muestran en las Figuras 20, 21 y 22. En la primera se observa el comportamiento del fluido, y sus valores estimados de acuerdo a la escala de colores. En este caso la velocidad que se obtiene en las ramas es menor a la recomendada por la literatura, pero se mantiene en el

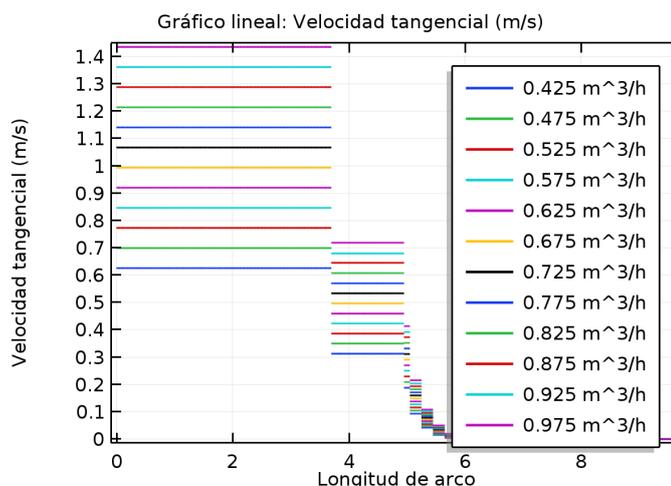


Figura 22. Simulación en Comsol de la velocidad a lo largo de la tubería hasta llegar al último gotero de la última línea.

diseño para cumplir con el tiempo, más tomando en cuenta que el caudal utilizado es un valor máximo de requerimiento hídrico anualmente. Y en cuanto a la Figura 21, se busca analizar a lo largo de la tubería el cambio de velocidad, que para el primer gotero de la primera línea es bajo, y disminuye aún más al estudiarse la transición de velocidad hasta el último gotero de la última línea, el cual se observa en la Figura 22. A partir de esta comparación se logra determinar una diferencia de velocidades alta entre las distintas ramas. Y este análisis se fortalece con los resultados de flujo volumétrico a lo largo de la tubería que se obtuvieron en la simulación.

En el caso de los resultados para el análisis de flujo volumétrico la diferencia, según la simulación, entre el primer gotero de la primera línea y el último gotero de la última línea es de casi 70 L/h. La distribución del agua en las ramas no es del todo equitativa y es un factor a tomar en cuenta a la hora de sembrar la cantidad de plantas por área. Pero para este caso es importante mencionar que en la simulación no se especifica los parámetros o características de la salida, por lo que resulta lógico que en los resultados se obtengan grandes diferencias entre los distintos puntos de salida. En un contexto real, tomando en cuenta los goteros y sus flujos, la distribución resulta más homogénea, y para mejorar esta distribución se propone utilizar una manguera con un coeficiente de variación entre goteros bajo.

Como se mencionó anteriormente, en los gráficos se observan varias líneas debido

al barrido paramétrico con distintos flujos. A partir del estudio de la velocidad y presión se decide utilizar el flujo bajo de $0.475 \text{ m}^3/\text{s}$, originalmente planteado en los cálculos manuales, como el flujo definitivo. Esto ya que no se observa diferencias significativas entre las velocidades y las presiones para cada caudal, sin afectar negativamente el tiempo de riego. Asimismo en el mercado las líneas de riego con goteros poseen flujos similares, solamente a escalas mayores como en cultivos al aire libre se utilizan flujos de goteros mayores.

Además del análisis general del sistema con el modelo propuesto, se realizó una simulación para determinar cómo se comporta el sistema en caso de regar solamente una de las ramas. En el diseño de equipos se incluye una válvula para cada rama, esto para que en caso de que se desee solamente se riegue un lado del invernadero. En este escenario las velocidades y presiones cambian, como es de esperarse. Tanto la presión como la velocidad aumentan, alcanzando presiones un poco mayores, pero que de igual forma, cumplen por mucho con los límites máximos de presión de las mangueras de goteros. Y en cuanto a la velocidad se logran valores más aptos y adecuados para el sistema, logrando reducir la posibilidad de obstrucciones en los goteros. En las Figuras 23 y 24 se observan los resultados.

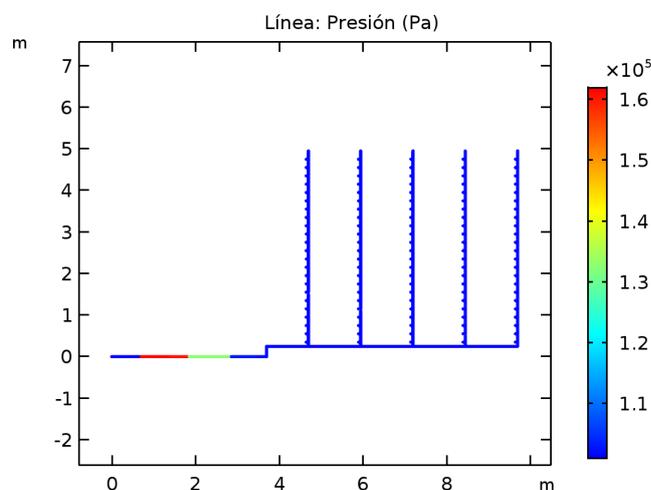


Figura 23. Simulación en Comsol de la presión en una rama del sistema de tuberías utilizando un esquema de colores.

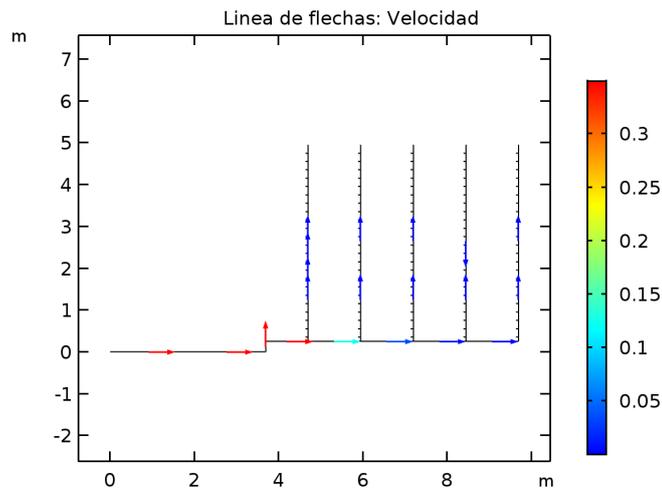


Figura 24. Simulación en Comsol de la velocidad en una rama del sistema de tuberías utilizando un esquema de flechas y colores.

Este aumento de la presión en las tuberías no es tan alto como para generar grandes cambios en el caudal del gotero, su rango máximo de cambio es de 3000 Pa. Por lo que la variación del flujo en los goteros entre ambos escenarios prácticamente no cambia. Esto se puede observar en la Figura 25, donde se muestra la curva de presión contra flujo de la línea de goteros propuesto (marca Irritec, cinta P0), siendo la del estudio la curva amarilla, de 2 L/h de flujo nominal, en otras palabras los goteros se autorregulan para proporcionar un flujo similar al haber cambios de presión pequeños. El flujo total sí disminuye a la mitad, ya que se está regando la mitad del área contemplada en el primer escenario, por lo que se riega un flujo de $0.2375 \text{ m}^3/\text{h}$, y por lo tanto el tiempo de riego no varía.

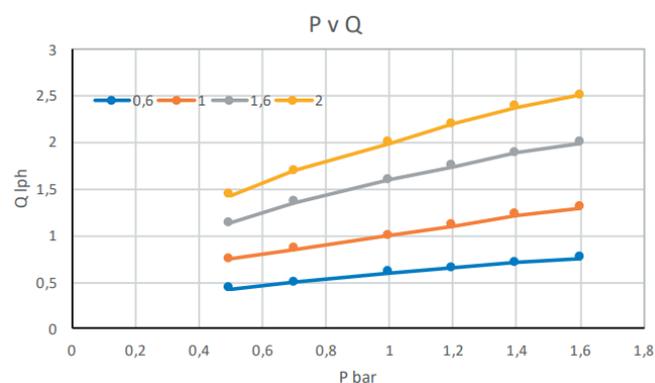


Figura 25. Relación presión caudal para los goteros marca Irritec, cinta P0. Dada por la ficha técnica.

Ambos escenarios son las posibles variaciones que se pueden dar en el sistema. Analizando los resultados, el diseño hidráulico se beneficia más al regar una zona primero seguida de la otra, esto para una velocidad del fluido mayor y por ende reducción de obstrucciones en las tuberías. Estos resultados de la simulación se obtienen ya que al regar ambas ramas las pérdidas de energía son mayores que al regar una, pero si se aumenta la presión por medio de la bomba a valores mayores puede generar daños a la tubería, ya que estas son de diámetro pequeño. Por lo que se mantiene la bomba con las especificaciones antes mencionadas, que de igual forma permite utilizar el sistema en cualquier una de las modalidades; regando solo una zona o ambas.

Y por último, como un estudio adicional se realizó la simulación para el caso en el que no se inyectan fertilizantes, por lo que la carga disminuye y por ende aumenta la presión en las tuberías. En este escenario las presiones y las velocidades siguen estando en el rango aceptado, siendo las presiones máximas de 1.05 bar.

CAPÍTULO 7

DISEÑO SISTEMA CONTROL AUTOMÁTICO

7.1 Metodología

Se realizó una investigación bibliográfica sobre aspectos importantes a considerar en la selección de equipos y posibles configuraciones (que se adapten al caso en estudio) para el diseño de un sistema de control automático que se acoplara al sistema de riego.

Se estudiaron las variables controladas (humedad del suelo), manipuladas, valores de referencia y posibles perturbaciones para plantear una estrategia de control adecuada a la zona de estudio en específico.

Habiendo definido estas variables se planteo un diagrama de bloques y posteriormente un diagrama P&ID, que incluyera los elementos de sistema automático: sensor-transmisor, controlador y elemento final de control.

Aunado a esto se seleccionaron y cotizaron los instrumentos que se van a utilizar en el sistema, como los sensores, controlador y transmisor. Y finalmente se determinó el consumo eléctrico del sistema.

7.2 Sistema control automático

Para el sistema de control automático lo que se busca en primer plano es regular la humedad del suelo utilizando electrobombas y/o electroválvulas que permitan que esta se mantenga en el rango deseado. Pero para que este sistema se ponga en marcha primero es necesario comprobar el almacenamiento mínimo de cierta cantidad de biol de riego por lo que también se utiliza un sensor de nivel.

El tanque de almacenamiento funciona a partir de dos válvulas. La primera permite el flujo del biol hacia el tanque, y se cierra mecánicamente al llenarse el tanque. Y la segunda válvula permite la entrada de agua, y esta se abre solamente al no alcanzar un mínimo de biol al iniciarse el riego (se propone llenar al menos a la mitad el

tanque) , por lo que se ejecuta mediante una electroválvula utilizando un sensor de nivel.

El riego se programa para ejecutarse en la tarde, alrededor de las 4 pm, ya que a esta hora la temperatura ambiente y la exposición solar es mínima, por ende hay menor pérdida de agua al regar. El tiempo de riego ronda (1 a 2) h, dependiendo de la época del año y la adición de fertilizantes, así como el tiempo entre riegos. Cuando se añaden fertilizantes el riego se realiza cada dos días, esto para asegurar una cantidad agua que asegure un tiempo mínimo de riego.

Para el sistema en cuestión se plantean dos escenarios, uno en el que se utilizan electroválvulas y otro en el que no, ya que se debe analizar el costo-beneficio de este cambio. Y para cada escenario se plantea el uso de fertilizantes y si se desea regar la zona 1, 2 o ambas. Esta preselección se toma en cuenta en el caso de que se tenga distintos cultivos en las zonas, o alguna de estas no se esté utilizando, por lo que el análisis de sensores y el riego en esa zona no debe tomarse en cuenta. Por último, se pretenden utilizar los sensores para mantener un rango de contenido volumétrico de agua apto para el crecimiento del cultivo, esto basándose en el estudio de suelos realizado. Asimismo es importante analizar la conductividad eléctrica del suelo, ya que al regarse con biol no se tiene un control de la salinidad del suelo, y puede alcanzar niveles de salinidad mayores a los permitidos. En la Figura 26 y 27 se observa de forma gráfica el algoritmo utilizado para los dos escenarios planteados, los cuales son bastante similares.

Para los sensores de humedad se propone utilizar dos sensores de marca Watermark modelo 200SS, uno en cada rama secundaria de riego. Este sensor funciona con base a la resistencia eléctrica que logra percibir por medio de sus dos electrodos, logrando medir la tensión del agua en el medio. Este sensor se puede colocar de forma permanente en el suelo, y tiene la ventaja de ser económico y de fácil uso e instalación.

Asimismo, a pesar de ser la salinidad un factor que afecta la medición no presenta un gran riesgo, ya que se trabaja en un suelo con una conductividad baja de acuerdo a los estudios de suelo realizados, y además, el sensor posee un sistema de compensación

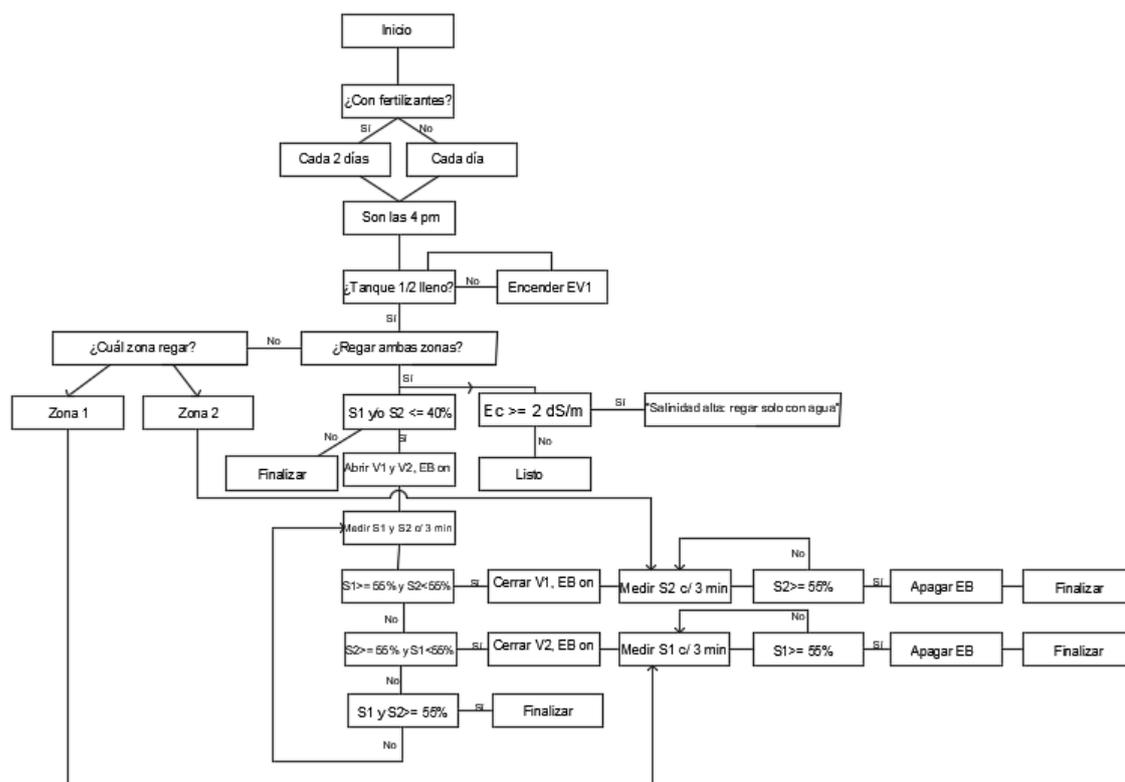


Figura 26. Algoritmo de control automático para el escenario en el que se utilizan electroválvulas.

interna para los altos niveles de salinidad. En cualquier caso, el mecanismo de funcionamiento del sensor permite obtener un valor aproximado de la conductividad eléctrica del medio. A partir del dato de resistencia que da el sensor, y conociendo el área y distancia entre electrodos (el cual se consulta al vendedor) se obtiene la conductividad eléctrica. En la ecuación 25 se observa el relación comentada. Este valor es importante para tener un control de la salinidad del suelo, más tomando en cuenta que se está regando con biol, y esto puede aumentar a niveles límites el contenido de sal.

$$EC = \frac{L}{R * A} \quad (25)$$

Donde,

EC = Conductividad eléctrica, S/m

L = Distancia entre electrodos, m

R = Resistencia, ohm

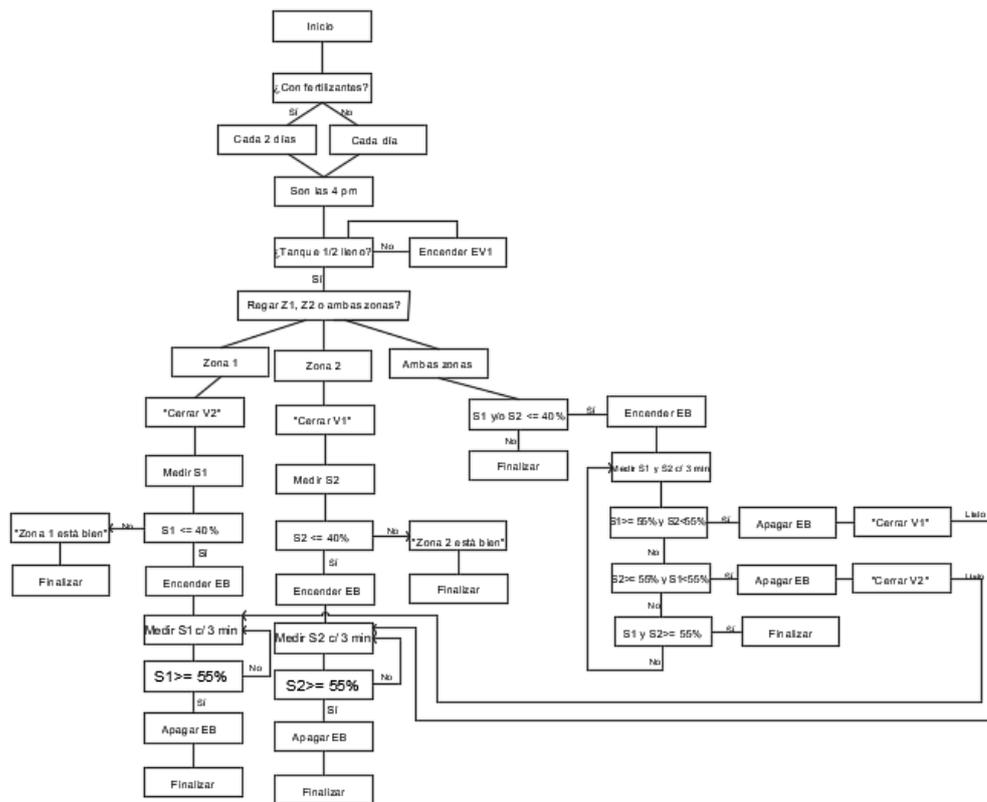


Figura 27. Algoritmo de control automático para el escenario en el que no se utilizan electroválvulas.

$$A = \text{Área de electrodos, m}^2$$

El sensor de humedad se coloca en el centro de cada sección de riego, entre goteros, y alejado unos 10 cm de ellos. En cuanto a los valores en los que la humedad debe mantenerse se determina un mínimo de 160 kPa y un máximo de 8 kPa de potencial hídrico del suelo (PHS). Estos valores se obtuvieron a partir de las medidas de CC y PMP (de contenido volumétrico de agua) obtenidas en el análisis de suelo, los cuales se sobrestiman a un 55 % y 40 %, esto para poner un límite máximo cercano al punto de saturación, que permite regar más y que el mismo sistema drene hasta llegar a la CC (se le suma alrededor de 7 % a la CC, no se le puede sumar más ya que se alcanza el límite de medición del sensor), y un límite inferior mayor al PMP respetando el déficit de riego que puede poseer el cultivo (idealmente no se llega a valores tan bajos que afecten al cultivo por lo que se le suma alrededor de 5 %). Los valores del análisis de suelos son 47.5 % y 34.5 % de contenido volumétrico de agua

(CVA) a 33 kPa y a 500 kPa. Con base a estos dos puntos, y con la suposición dada en el estudio de MnROAD (1993), donde la curva de humedad se describe mediante una curva logarítmica; $CVA = \alpha \cdot \ln|PHS| + \delta$ (α y δ son constantes de la curva), se obtiene la ecuación de la curva. Con la curva de humedad obtenida se relacionan los límites del contenido volumétrico de agua definidos anteriormente con los límites de potencial hídrico del suelo, que son los valores que se utilizan para el algoritmo. Es importante mencionar que estos valores límites deben encontrarse sujetos a cambios de acuerdo a lo que se vea en la práctica, estos valores teóricos se basan en unas series de suposiciones que ya en el campo pueden variar bastante.

Este sensor de humedad, para poder leerse, debe excitarse con pequeños pulsos pseudo AC, los cuales se basan en que dos pines se alternan entre alto y bajo voltaje constantemente para cada lectura, lo que permite al sensor no acumular potencial. De este se obtiene la lectura de voltaje, que con una ecuación se determina la resistencia, y finalmente con la ecuación de calibración se obtiene el potencial (en kPa). Para lograr la lectura se debe utilizar un adaptador de voltaje de salida, la marca Irrometer posee el modelo 200SS-VA adecuado específicamente para este sensor. Este adaptador transforma la señal de resistencia del sensor a una salida de voltaje lineal, que simplifica la lectura casi para cualquier equipo. Esta relación lineal se basa en los rangos de (0 a 2.8) V y (0 a 239) cbar.

Asimismo, para la conexiones es necesario que los circuitos de cada sensor queden aislados. Si existe un bucle de tierra, los electrodos pueden dañarse rápidamente, y además pueden haber malas lecturas si el sensor se enlaza con los electrodos de otro sensor y no los suyos. Por lo que puede resultar necesario crear barreras en la tierra y que cada sensor se alimente individualmente (con multiplexers se puede solucionar abriendo y cerrando los canales respectivos).

El otro sensor a tomar en cuenta es el sensor de nivel del tanque de almacenamiento. Para este caso se eligió un sensor simple marca SST, el Optomax Digital. Este sensor es de bajo costo y de baja potencia. El sensor funciona a partir de una luz LED infraroja y un fototransistor, que al estar en el aire están acoplados ópticamente por la punta, pero cuando se está inmerso en el agua no se acoplan. Este sensor busca

almacenar un mínimo de agua/biol en el tanque en el momento de riego.

El sistema estará manipulado mediante un controlador; se eligió el controlador lógico programable Micro820 marca Allen Bradley. Este controlador funcionará como on/off para facilitar el control del sistema, además de que es suficiente para el caso de estudio. De esta línea este es un controlador de bajo costo, versátil y funcional para el sistema planteado. Posee conexión Ethernet en caso de una configuración remota, se puede colocar una pantalla como accesorio para transmitir los mensajes y posee 12 entradas y 4 salidas, lo cual permite una ampliación de dispositivos a largo plazo. Asimismo este equipo se adapta bien a los requerimientos de los sensores.

En cuanto a la bomba que impulsa el agua de riego se decide utilizar una bomba centrífuga marca Aurora Pro Scientific, de bajo costo y con un flujo y cabeza de (5 a 15) L/min y (1 a 20) m. Esta bomba se sostiene con un voltaje de (6 a 24) VDC y una corriente de 1.0 A máximo.

Por último, para el escenario en el que se utiliza electroválvulas como dispositivo final del sistema de control se eligió utilizar electroválvulas marca GEMU, modelo M75. Estas válvulas son 2/2 vías y de acción directa. Existen distintas versiones de esta, pudiendo realizar la orden según mejor convenga la tensión de alimentación, el material del cuerpo y los tipos de conexión. Para este caso se decide utilizar una electroválvulas normalmente abierta y con una tensión de 24 V, con una corriente de 0.32 A (máximo 1.4 A).

Algunas conexiones entre sensores, controlador y válvulas deberán estar enlazadas por medio de relés. Esto ya que la corriente que el controlador maneja no es suficiente para sostener la demanda de los equipos de salida. Sería necesario principalmente para las válvulas, ya que la bomba requiere un amperaje y voltaje de 0.025 A y 24 VDC. Por facilidad se plantea ordenar el controlador con salidas de relés (equipo 2080-LC20-20QBB).

En la Figura 28 se puede observar el diagrama P&ID de forma esquemática del sistema de riego. Se muestran tres circuitos, uno para cada sensor de humedad y el otro para el control de nivel en el tanque de almacenamiento a la hora de riego.

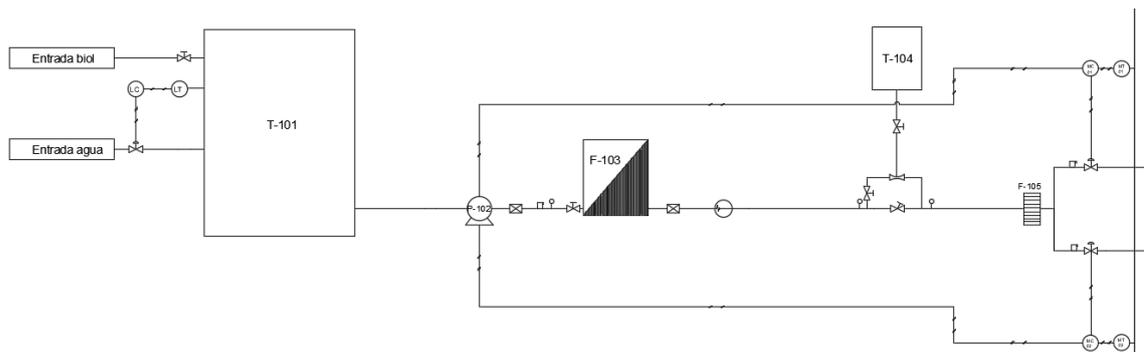


Figura 28. Diagrama P&ID del sistema de riego, mostrando los circuitos de nivel de agua y humedad en el suelo (ambas zonas).

CAPÍTULO 8

DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

8.1 Metodología

Primeramente, se realizó una investigación exhaustiva sobre sistemas de generación fotovoltaica, para respaldar la metodología seleccionada. Para el diseño del sistema de generación fotovoltaica se consultaron los datos climatológicos de la zona (radiación) en el IMN y se realizó el cálculo de energía necesario para satisfacer la demanda de los equipos del fertirriego.

A partir del cálculo de voltaje necesario a suministrar, se analizaron demás requerimientos generales; instalación y equipos a utilizar. Y a partir de la instalación seleccionada y equipos elegidos, se realizó el diseño general del sistema de generación fotovoltaica, eligiendo baterías, reguladores de carga, inversores, bomba y paneles del mercado.

8.2 Sistema generación fotovoltaica

El módulo de energía fotovoltaica que se propone para este proyecto se presenta de forma preliminar, ya que, de acuerdo a las recomendaciones de la teoría, el sistema es hasta cierto punto innecesario. Esto porque la distancia a la red eléctrica desde el invernadero no supera los 500 m y la demanda y carga del sistema hidráulico es relativamente baja. Pero para realizar un análisis exhaustivo se lleva a cabo el diseño para posteriormente determinar las ventajas y desventajas de cada escenario de estudio.

La información base para realizar el diseño del módulo es la demanda energética del sistema y la radiación de la zona (en el mes de menor radiación). En el Cuadro 13 se observa de forma detallada los equipos, consumo y tiempo de uso del sistema, así como la potencia total. En este caso, la bomba es el único actuador que se alimenta

por aparte del controlador, los demás sensores y válvulas se incluyen dentro del consumo del controlador.

Cuadro 13. Requerimiento energético de los distintos componentes del sistema y tiempo de uso.

Equipos	Potencia (W)	Tiempo uso (h/d)
Bomba centrífuga	0.6	2
Controlador (PLC)	8.5	2
Sensores de humedad (2)	0.045	2
Sensor de nivel	0.0385	0.5
Electroválvulas riego (2)	7.68	2
Electroválvula tanque	7.68	0.5
Total	18.2 Wh/d	

Para obtener el valor de radiación se realizaron ciertas correcciones. Con base a los valores de radiación directa y difusa extraídas de la plataforma Nasa Power, se obtuvo mediante una suma la radiación global. Esta radiación debe corregirse por la inclinación de los paneles, efectos atmosféricos y orientación, mediante el uso de tres constantes (K) que lo multiplican. Para el caso de la corrección de inclinación de paneles es primero necesario determinar este valor. Al situarse el sistema en una zona en el Ecuador realmente no es necesario variar la inclinación del panel a lo largo del año, más bien su posición óptima para recibir radiación es horizontalmente. Pero por temas de limpieza en el panel es recomendable cierto de grado de inclinación, por lo que con base en la latitud (10°) se determinó el factor de corrección K para cada mes utilizando tablas de corrección para superficies inclinadas (Alvarado y Francisco, 2015), usando una inclinación de 10° . Se utiliza este valor ya que el factor K se aproxima a la unidad en la mayoría de los meses, logrando mayor eficiencia. Los otros dos factores K, correspondientes a los efectos atmosféricos y orientación, se igualan a 1. Con esta corrección se obtiene una radiación, o equivalente a horas solares pico (HSP), de 4.87 kWh/d. Las horas solares pico se entienden también como la cantidad de energía que se recibe por metro cuadrado.

A pesar de tener el valor de energía requerido, es necesario realizar una corrección a este valor para dimensionar adecuadamente el módulo fotovoltaico. Existirán pérdidas energéticas en todo el equipo y cableado del sistema, que se deben contemplar

en la energía que el módulo de aportar. Para este caso se utilizó la ecuación 26, donde se incluyen los factores de pérdidas para cada componente del sistema. Con esta ecuación se obtuvo un rendimiento de 0.738, y por lo tanto un requerimiento energético total de 24.66 Wh. Los valores de pérdida incluidos en esta ecuación son aproximaciones recomendadas por la teoría de acuerdo a la propuesta de equipos por seleccionar (Alvarado y Francisco, 2015). En el Cuadro B.22 se observan los valores utilizados.

$$R = (1 - K_b - K_r - K_v) * (1 - \frac{K_a * N}{P_d}) \quad (26)$$

Donde,

K_b = Pérdidas debido a la batería, adim

K_r = Pérdidas debido al regulador, adim

K_v = Pérdidas otras, adim

K_a = Pérdida por autodescarga de batería, adim

N = Días de autonomía de batería, d

P_d = Profundidad máxima de descarga de batería, adim

Con base en este requerimiento energético se busca en el mercado la celda solar para el sistema. Se eligió la marca Victron, en este caso ofrece precios razonables y se adapta al bajo requerimiento energético del sistema, además de que permite construir todo el módulo completo con los demás componentes de la misma marca y eso facilita el proceso. Para este caso un módulo policristalino de 36 celdas con 20 W de potencial nominal puede bastar. Pero debido a la selección del regulador de carga (que se muestra posteriormente) se elige una potencia mayor y más cercana a la potencia nominal del regulador dada en la ficha técnica. Asimismo una potencia mayor facilita la adquisición del panel en el mercado, y también se asegura una mayor eficiencia y un suministro completo de energía, aumentando la vida útil de las baterías. Aunado a esto se deja la opción para que un futuro si se desea se conecte un inversor y se pueda alimentar con corriente AC otros equipos. Por lo que se elige un panel con un voltaje de 115 W, y con un voltaje y corriente (para

potencia pico) de 18.94 V y 6.08 A. Esto aunado a una garantía de 5 años. Para cubrir la totalidad del sistema se realiza el cálculo que se muestra en la ecuación C.19, donde se obtiene la cantidad de paneles necesarios para el arreglo. En este caso el valor es menor a la unidad por lo que solamente se necesita de un panel para abastecer el riego.

Posterior a la elección del panel solar se debe elegir el regulador o controlador de carga. Como se mencionó anteriormente se pretende seguir la misma línea o marca para todos los componentes, por lo que para este caso se eligió el regulador que se muestra en la Figura 29. Este regulador soporta un voltaje máximo de 28 V y una corriente máxima de (5, 10, 20 o 30) A (dependiendo de la orden que se realice), asimismo logra una tensión de instalación de 12 V o 24 V a la batería. De acuerdo a la teoría, este debe ser capaz de manejar un 25 % más del amperaje que el panel es capaz de dar (Garro *et al.*, 2014), por lo que no resulta necesario un amperaje tan alto, pero por accesibilidad inmediata de equipos en Costa Rica se elige el de 30 A, sabiendo que cumple con un alto rango de confianza.



BlueSolar PWM-Light 10A

Figura 29. Controlador de carga marca Victron seleccionado para el diseño.

Para seleccionar la batería en el mercado primero se determinaron ciertos parámetros de diseño, que también se contemplaron para determinar los factores K de rendimiento antes utilizados para obtener la pérdida de energía del sistema. Estos son el uso de una batería de 12 V (pudiendo ser de 24 V) de ciclo profundo (para este caso se logra una mayor vida útil), sin necesidad de constante mantenimiento, con 4 d de autonomía y una descarga máxima del 50 %. Establecido esto

y conociendo la potencia requerida del sistema, la descarga máxima y los días de autonomía se obtiene los A·h de batería (utilizando un voltaje 12 V), de 12 A·h. Para este escenario se selecciona una batería Victron AGM de ciclo profundo de 14 Ah y 12 V, la cual se muestra en la Figura 30. Al ser necesario una entrega de 24 V tanto para el controlador como para la bomba se propone el uso de dos baterías en serie, lo cual aumenta el voltaje y mantiene la corriente constante.

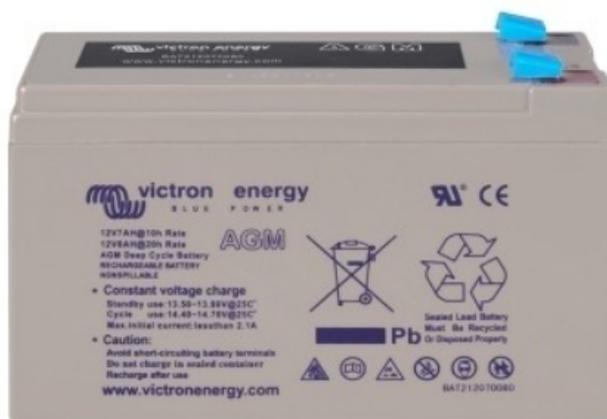


Figura 30. Batería AGM de ciclo profundo marca Victron.

En cuanto a las conexiones de los equipos se recomienda conectar entre ellos breakers para protección del sistema. Se coloca un breaker entre el panel y el regulador, entre el regulador y la batería y entre el regulador y las cargas. Estos breakers se dimensionan con un amperaje mayor o igual a 12.5 A·h. Asimismo, el regulador se debe aterrizar a la puesta a tierra en sitio.

CAPÍTULO 9

ESTUDIO FINANCIERO DEL SISTEMA

9.1 Metodología

Inicialmente se realizó una investigación bibliográfica respaldando la metodología seleccionada. Asimismo, se ahondó en los cálculos financieros y estudio técnico realizado.

Luego, a partir de los diseños realizados previamente, se calculó la inversión inicial, y adicionalmente se realizó un inventario de las fuentes de costos (operación y mantenimiento) y ahorros (energía e insumos). De acuerdo a el costo de inversión, se calculó el monto requerido asociado a la donación, el cual otorga una ONG, y el monto requerido en contrapartida.

Posteriormente se estimaron los parámetros financieros, como la tasa interna de retorno, el valor actual neto, el periodo de pago según componentes de costos directos e indirectos, ahorros directos e indirectos, flujo de caja, un análisis de sensibilidad, entre otros parámetros. Esto para alcanzar un nivel de incertidumbre clase II- según el *Cost Estimating Guide del US Department of Energy* y otras metodologías nacionales e internacionales que se consultaron durante el proceso. Finalmente se integró todo este análisis en un documento que presenta los detalles financieros específicos del proyecto.

9.2 Estudio financiero

Por último, para lograr determinar si el proyecto se puede implementar y resulta rentable se realiza una factibilidad financiera, en la cual mediante análisis de costos, flujo de caja y análisis de sensibilidad se determinan los aspectos relevantes para llevar a cabo el proyecto.

Para realizar este estudio de forma detallada se decide analizar cuatro escenarios. En el escenario base se cultiva culantro sin ningún cambio, de la misma forma

en que se hace actualmente. El primer escenario es contemplando todo lo que se diseñó: sistema de tuberías, control automático, energía solar y carbonizador. El segundo escenario es similar al primero, con la diferencia de que no se utiliza energía solar, sino que se extiende el cableado eléctrico hasta la zona del invernadero para alimentar el sistema de bombeo y control automático. Y el último escenario sería similar al primer escenario pero sin utilizar el carbonizador, y por ende sin aplicar biochar.

Las grandes diferencias entre estos escenarios se contemplan en el rendimiento del cultivo, el uso del agua, la mano de obra, el costo de energía eléctrica, uso de fertilizantes y mantenimiento. En la finca de estudio el agua para riego que utilizan es del río y la mano de obra es representada principalmente por parte del dueño (por lo que no es un pago directamente). Pero para poder comparar de forma financiera los distintos escenarios, y también poder utilizar en el futuro este estudio como réplica para otros agricultores, se estandariza todo como mano de obra de peón agrícola y el costo del agua como de tarifa preferencial o social.

En el escenario base se utiliza un rendimiento de culantro de 665 kg/año para el área de cultivo. Esto con base en un estudio de rendimiento de cultivo utilizando tratamiento químico y orgánico, que para este caso se equipara con el químico teniendo un rendimiento de 2.5 kg/m² (Orjuela Castillo y Ríos Llano, 2018). Asimismo, para obtener el consumo de agua se utiliza el valor de consumo hídrico de diseño obtenido mediante MATLAB, y a este valor se le agrega el 40 % que la teoría indica que se ahorra aproximadamente por el uso de biochar (De Gryze *et al.*, 2010) y fertirriego (Ruiz Granados, 2013). En cuanto a la mano de obra se toma en cuenta un horario de trabajo de 2.5 d a la semana, donde se riegan los cultivos, se limpia la mala hierba, se recoge el cultivo y se trabaja la tierra (aplicación de fertilizantes y demás insumos también). Asimismo, este escenario se diferencia por su necesidad de aplicación de fertilizantes, ya que no se utiliza biol ni biochar. Y por último, se incluye, así como en los demás escenarios, los gastos en distribución y mercadeo, esto suponiendo su distribución en los alrededores del centro de San Ramón.

El escenario uno presenta diferencias significativas al escenario base, empezando por la inversión inicial; los datos del flujo de caja se muestran más adelante. Primero se contempla un rendimiento de 997.5 kg/año, esto al aplicarse el biol y biochar como tratamiento orgánico (Orjuela Castillo y Ríos Llano, 2018). En cuanto a la necesidad hídrica se necesita alrededor del 50 % de la demanda obtenida en MATLAB, esto es una aproximación ya que idealmente se riega solo con biol, pero suponiendo que no continuamente va a haber suficiente se deberá aplicar agua. Por otro lado, la mano de obra para este escenario se aproxima a dos días laborales semanales más cuatro días de labor al año para obtener el biochar. Y por último, hay un mayor gasto en mantenimiento, ya que se deben hacer revisiones continuamente, purgas, si es necesario uso de peróxido de hidrógeno o ácidos de limpieza y contemplar posibles eventualidades con el sistema.

En el escenario dos, las únicas diferencias con el uno es el uso de energía eléctrica. Se incluye el consumo de electricidad por tarifa preferencial y se debe realizar una inversión para hacer la instalación eléctrica hasta el invernadero. El rendimiento, el agua y la mano de obra se mantienen igual.

Por último, en el escenario tres, donde no hay carbonizador, varía el rendimiento, la mano de obra y el uso de agua, así como la inversión inicial ya que no se contempla el gasto de la construcción del carbonizador. El rendimiento disminuye un poco, esto con base a varios estudios que indican la efectividad del biochar para aumentar el rendimiento del cultivo, donde para este cultivo y tipo de biochar su aumento se aproxima al 20 % (Pérez-Cabrera *et al.*, 2007). Y en cuanto al uso del agua, el biochar permite un ahorro de alrededor del 10 % (De Gryze *et al.*, 2010), por lo que se ausencia genera una demanda un poco mayor.

Para determinar el costo y cantidad de semillas en el caso de estudio, y así como para determinar la cantidad de rollos que se genera por peso y sus precios se consultó a productores de culantro. El precio utilizado es de 300 CRC por rollo (siendo el rollo de \approx 140 g de culantro), como aproximación, ya que este fluctúa por temporadas.

En el Cuadro 14 se observa la cotización de los equipos y sus precios. Para el escenario dos se elimina toda la sección de sistema fotovoltaico, y para el escenario

tres se elimina el costo del carbonizador. La mayoría de precios de estos equipos se determinaron mediante cotización en Costa Rica, mientras que otros se encuentran en plataformas digitales internacionales, por lo que se incluye un 50% de su precio para incluir los impuestos y el envío (esto para los que no lo indiquen).

Para realizar el flujo de caja completo se toma en cuenta la depreciación de la mayoría de equipos o etapas del sistema. Para esto se utilizó el método lineal de depreciación, ya que todos los equipos se utilizan de la misma forma a lo largo del tiempo. Con base al Reglamento de la Ley del Impuesto sobre la Renta se determinaron los porcentajes aproximados de depreciación para cada equipo, estos valores se observan en el Cuadro 15.

Además de los costos de los equipos se obtuvo un estimado de los costos para la implementación del sistema. En esto se incluye la instalación, obras civiles, ingeniería y supervisión y posibles eventualidades. Al no poseer datos exactos para todos los casos se utilizó porcentajes recomendados (Peters, 1978) y aproximaciones de costos. En el Cuadro 16 se observan los valores dados para cada sección y escenario. Como es de esperar, algunos valores para cada escenario varían, ya que estos se basan en porcentajes de la inversión de capital fijo o inversión en equipos. Asimismo para la etapa de mantenimiento se incluye un valor aproximado el cuál varía muy poco entre escenarios (excluyendo el escenario base).

En el flujo de caja del escenario uno, que se muestra en el Cuadro 17, se incluyen los ingresos, costos de mantenimiento, materia prima, agua, mano de obra y gastos generales (distribución y mercadeo). Para obtener el valor de los ingresos se utiliza una producción anual de 997.5 kg, esto con base al rendimiento teórico que se obtiene utilizando un tratamiento orgánico (Orjuela Castillo y Ríos Llano, 2018), con un precio de 2 142.86 CRC/kg. Asimismo, se incluye la depreciación de los equipos, antes mencionada, y los impuestos del IVA a pagar por parte del agricultor. Como se analiza exclusivamente esta actividad en el análisis financiero, y el agricultor se dedica a otras áreas, no se toma en cuenta el impuesto de renta que aplica. Asimismo se incluye la inversión inicial y el capital de trabajo (compra de semillas), y por último el ahorro en relación con el escenario base. En el ahorro se incluyen

Cuadro 14. Desglose de la cotización de los equipos y piezas utilizados, y sus unidades, para el primer escenario.

Etapa	Equipo/pieza	Cantidad/Largo (m)	Precio (por unidad o longitud deseada), (CRC)
Sistema hidráulico	Tubería PVC	12	9200
	Manguera goteros	50	17 223
	Válvula check	1	2 425
	Válvula de aire	3	3 705
	Válvula de bola	9	2 000
	Filtro de discos	1	9 080
	Filtro de arena	1	50 000
	Inyector	1	43 673
	fertilizante		
	Tanque	1	21 000
	fertilizantes		
	Tanque	1	180 000
	almacenamiento		
	agua		
	Medidor de flujo	1	18 780
	Medidor de	3	2 800
	presión		
	Regulador de	1	3 315
	presión		
	Bomba centrífuga	1	24 000
Accesorio Ts	3	200	
Accesorio codos	3	200	
Adaptador	10	144	
manguera tubería			
Uso biochar	Carbonizador	1	452 000
	Sensor humedad	2	46 950
	Sensor de nivel	1	23 428
Control auto.	Adaptador sensor	1	52 584
	humedad		
	Electroválvulas	3	15 070
	Controlador	1	213 930
	Pantalla	1	125 115
	controlador		
	Panel solar	1	77 812
Sist. fotovoltaico	Regulador de	1	43 150
	carga		
	Batería	2	100 180
	Cableado	-	28 750
	(menudo)		
Total (CRC)		1 788 781	

Cuadro 15. Depreciación de la mayoría de equipos por el método lineal y su totalidad.

Equipo/pieza	Porcentaje depreciación anual (%)	Total (CRC/año)
Tubería PVC	5	460
Manguera goteros	15	2 583
Filtro de discos	10	908
Filtro de arena	10	5 000
Inyector fertilizante	15	6 551
Tanque fertilizantes	7	1 470
Tanque almacenamiento agua	7	12 600
Bomba centrífuga	10	2 310
Carbonizador	10	16 000
Sensor humedad	20	9 390
Sensor de nivel	20	4 686
Adaptador sensor humedad	20	10 517
Electroválvulas	20	3 014
Controlador	20	42 786
Pantalla controlador	20	25 023
Panel solar	20	15 562
Regulador de carga	20	8 360
Batería	20	20 036
Cableado (menudo)	10	2 875
Total (CRC)		190 401

Cuadro 16. Desglose de los costos directos e indirectos adicionales del sistema para los tres escenarios, así como la inversión inicial total.

Sección	Escenario	Total (CRC)
Instalación	1	200 000
	2	200 000
	3	200 000
Obras civiles	1	178 878
	2	143 871
	3	133 678
Ingeniería y supervisión	1	120 000
	2	120 000
	3	120 000
Eventuales	1	120 403
	2	100 136
	3	89 522

parte de los insumos (fertilizantes), uso de agua y mano de obra. Para este flujo de caja se obtuvo un valor de VAN de 1 877 875 CRC, y un TIR de 37 % utilizando una tasa de descuento de 10 %. Se utiliza esta tasa de descuento ya que las tasas para proyectos del sector agropecuario son bajas y menos riesgosas, además las de crédito rural se aproximan al 8 % (dada por el INDER).

Cuadro 17. Flujo de caja para el primer escenario.

Años	0	1	2	3	4	5
Ingresos (CR- C/año)	-	2 137 500	2 137 500	2 137 500	2 137 500	2 137 500
Materia prima	-	-37 000	-37 000	-37 000	-37 000	-37 000
Mant. y rep.	-	-96 322	-96 322	-96 322	-96 322	-96 322
Servicios auxiliares (agua)	-	-27 958	-27 958	-27 958	-27 958	-27 958
Mano de obra	-	-1 104 000				
Distrib. y mercadeo	-	-15 130	-15 130	-15 130	-15 130	-15 130
Deprecia	-	-219 601	-219 601	-219 601	-219 601	-219 601
Utilidad bruta	-	637 488.57	637 488.57	637 488.57	637 488.57	637 488.57
Imp.	-	-6 374.89	-6 374.89	-6 374.89	-6 374.89	-6 374.89
Utilidad neta	-	631 113.68	631 113.68	631 113.68	631 113.68	631 113.68
Deprecia	-	219 601	219 601	219 601	219 601	219 601
Ahorro	-	286 236.23	286 236.23	286 236.23	286 236.23	286 236.23
Inversión inicial	-2 420 062	-	-	-	-	-
Capital de trabajo	-12 000	-	-	-	-	-
Flujo neto	-2 432 062	1 136 951	1 136 951	1 136 951	1 136 951	1 136 951

Para el segundo escenario la mayor variación en el flujo de caja, que se observa en el Cuadro 18 se contempla en el consumo eléctrico y la inversión inicial para extender

el cableado eléctrico hasta ese punto. Para este caso se obtuvo un VAN y TIR de 2 108 107 CRC y 42 %. Los cuáles resultaron más favorecedores que el primer escenario. Esto se da principalmente por el gasto tan bajo de electricidad al año, y su gran diferencia en inversión inicial.

Cuadro 18. Flujo de caja para el segundo escenario.

Años	0	1	2	3	4	5
Ingresos (CR-C/año)	-	2 137 500	2 137 500	2 137 500	2 137 500	2 137 500
Materia prima	-	-37 000	-37 000	-37 000	-37 000	-37 000
Mant. y rep.	-	-80 109	-80 109	-80 109	-80 109	-80 109
Agua	-	-27 958	-27 958	-27 958	-27 958	-27 958
Electrici.	-	-45	-45	-45	-45	-45
Mano de obra	-	-1 104 000	-1 104 000	-1 104 000	-1 104 000	-1 104 000
Distrib. y mercadeo	-	-15 130	-15 130	-15 130	-15 130	-15 130
Deprecia	-	-172 498	-172 498	-172 498	-172 498	-172 498
Utilidad bruta	-	700 759.5	700 759.5	700 759.5	700 759.5	700 759.5
Imp.	-	-7 007.6	-7 007.6	-7 007.6	-7 007.6	-7 007.6
Utilidad neta	-	693 751.9	693 751.9	693 751.9	693 751.9	693 751.9
Deprecia	-	172 498	172 498	172 498	172 498	172 498
Ahorro	-	286	286	286	286	286
		236.23	236.23	236.23	236.23	236.23
Inversión inicial	-2 014 722	-	-	-	-	-
Inversión sistema eléctrico	-234 000	-	-	-	-	-
Capital de trabajo	-12 000	-	-	-	-	-
Flujo neto	-2 260 722	1 152 486	1 152 486	1 152 486	1 152 486	1 152 486

Finalmente el tercer escenario muestra datos interesantes sobre la factibilidad del uso del carbonizador en relación con los otros escenarios. Para este flujo de caja,

en el Cuadro 19, la mayor diferencia radica en un menor rendimiento y mayor gasto de agua, y una reducción pequeña de la mano de obra, pero se aumenta el valor de la inversión inicial por el costo del carbonizador. La producción anual en este escenario es de 858.85 kg, esto restándole el aumento que teóricamente se obtiene al aplicar biochar. Para este caso se obtuvo un VAN y TIR de 1 813 246 CRC y un 44 %.

Cuadro 19. Flujo de caja para el tercer escenario.

Años	0	1	2	3	4	5
Ingresos (CR-C/año)	-	1 840 625	1 840 625	1 840 625	1 840 625	1 840 625
Materia prima	-	-37 000	-37 000	-37 000	-37 000	-37 000
Mant. y rep.	-	-71	-71	-71	-71	-71
Servicios auxiliares (agua)	-	618.35	618.35	618.35	618.35	618.35
Mano de obra	-	-30 754	-30 754	-30 754	-30 754	-30 754
Distrib. y mercadeo	-	-30 754	-30 754	-30 754	-30 754	-30 754
Deprecia	-	-1 056 000	-1 056 000	-1 056 000	-1 056 000	-1 056 000
Utilidad bruta	-	-15 130	-15 130	-15 130	-15 130	-15 130
Imp.	-	-174 401	-174 401	-174 401	-174 401	-174 401
Utilidad neta	-	455	455	455	455	455
Deprecia	-	721.85	721.85	721.85	721.85	721.85
Ahorro	-	-4 557.22	-4 557.22	-4 557.22	-4 557.22	-4 557.22
Inversión inicial	-1 802 459	-	-	-	-	-
Capital de trabajo	-12 000	-	-	-	-	-
Flujo neto	-1 814 459	957 006	957 006	957 006	957 006	957 006

En la Figura 31 se observa el gráfico que muestra las diferencias de los principales parámetros o costos para los tres escenarios. En este caso se visualiza como la

materia prima, servicios auxiliares y distribución y mercadeo se mantienen iguales o similares, mientras que los demás sí varían en mayor medida, como se mencionó anteriormente. Este gráfico se realiza con los datos del primer año de flujo de caja, esto porque a lo largo de los años estos valores no varían.

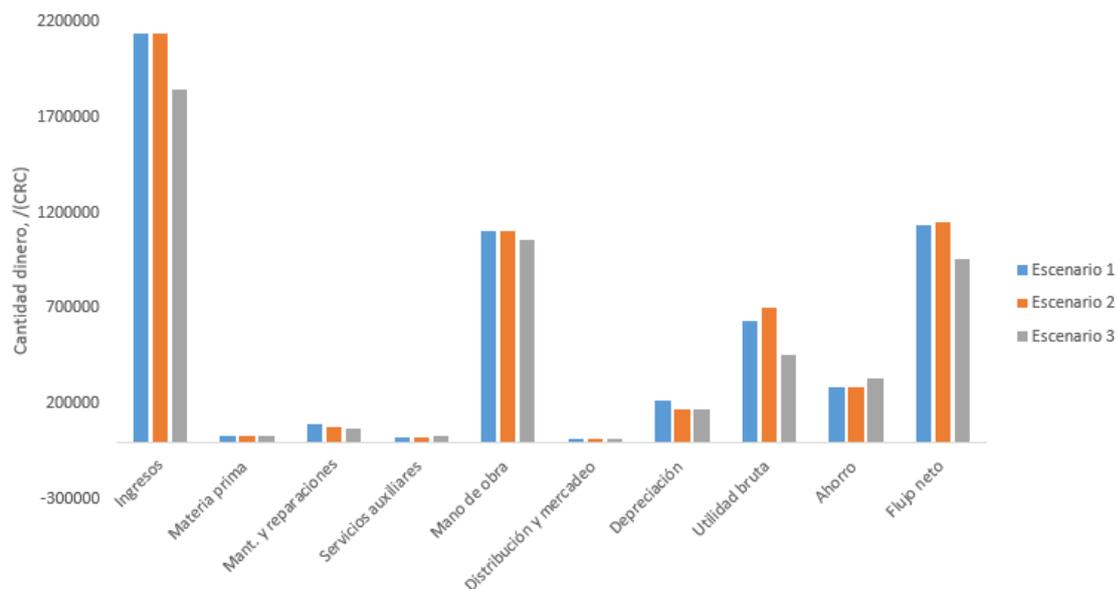


Figura 31. Gráfico que muestra las diferencias en costos de distintos parámetros para los tres escenarios, valores dados en un año de flujo de caja.

Asimismo, como se detalló previamente, en los tres escenarios, los dos indicadores principales, el VAN y TIR muestran beneficios económicos y una buena rentabilidad por realizar los cambios en el escenario base por cualquiera de los demás escenarios. Pero realizando la comparación entre escenarios, basándose principalmente en el VAN por ser casos mutuamente excluyente, resulta más beneficioso el desarrollo del segundo escenario, es el que produce mayor rentabilidad. Seguido del primer escenario y por último el tercero, siendo los últimos dos muy similares.

Por lo tanto, resulta similar el uso o no del carbonizador en términos financieros, siendo un poco más rentable el caso en el que se utiliza. Pero es necesario recalcar que existe un beneficio ambiental extra que no se traduce en un flujo al utilizar carbonizador, que sería la captación de gases del suelo. Asimismo el costo del carbonizador puede variar de acuerdo al lugar de cotización. Este tuvo un valor de 160 000 CRC en la tesis de su diseño, y también se cotizó con dos talleres

separados, obteniendo como precio mayor el de 452 000 CRC , por lo que este se utiliza por seguridad. Esta variación de precio tan alta repercute en gran medida en los indicadores financieros, principalmente en el TIR.

Por otro lado, resulta desde el punto de vista financiero más apropiado la instalación eléctrica, esto ya que el consumo de energía es muy bajo, y la inversión para extender el alumbrado no resulta tan costosa al estar cerca. Además es necesario tomar en cuenta que posterior a esos 5 años, o a los 10 años, posiblemente será necesario el cambio de baterías, lo cual resulta en un gasto extra. En cuanto al PRI (Periodo de Recuperación de Inversión) el segundo escenario es el que posee un PRI menor, siendo de 1 año y 8 meses. Seguido del tercer escenario, siendo de aproximadamente 1 año y 10 meses, y por último el primer escenario siendo de 2 años y un mes. En general estos valores son cercanos, por lo que no tiene un mayor impacto en el análisis financiero. Por lo que con respecto a los tres indicadores se proyecta el segundo escenario como el más rentable.

Para entender a profundidad los resultados anteriores se realizó un análisis de sensibilidad al primer escenario para determinar los factores que generan mayor cambio en los indicadores de rentabilidad, guiándose con los cambios en el TIR. En el Cuadro 20 se observan las variaciones de cada factor de estudio y su impacto en el TIR. Los factores de estudio son la producción anual del culantro, el uso del agua, la mano de obra y costos de mantenimiento. Todos estos se eligieron ya que es posible que cambien dependiendo de las condiciones a lo largo del año. Los factores de más peso son la producción de culantro y el costo de la mano de obra, siendo el más ponderante el primero. La producción del culantro va a depender de una buena dosificación de nutrientes y un balance en la EC del suelo, por lo que son las variables a las que más se les debe prestar atención. Y en cuanto a la mano de obra, se debe balancear bien entre el manejo de trabajo por parte del dueño y el precio a pagar para los peones, esto puede generar cambios anuales importantes en la rentabilidad. Asimismo, se estudió el impacto del uso del agua y el costo del mantenimiento pero no se obtuvieron grandes cambios en la rentabilidad al variar estos. Para el segundo escenario se realizó lo mismo pero sumando el factor de las tarifas eléctricas, estas no variaron

mucho, por lo que su impacto no es tan relevante en la rentabilidad. Los demás factores se comportaron de la misma forma al primer escenario.

Cuadro 20. Análisis de sensibilidad para el primer escenario.

Factor	Variación	TIR
Producción culantro	-10 %	26 %
	Caso base	37 %
	+10 %	48 %
Uso del agua	-40 %	38 %
	Caso base	37 %
	+40 %	36 %
Costo mano de obra	-20 %	58 %
	Caso base	37 %
	+20 %	13 %
Costo mantenimiento	-20 %	38 %
	Caso base	37 %
	+20 %	36 %

Es necesario e importante mencionar que para el desarrollo del proyecto se utilizará una donación. Esta contempla aproximadamente un 80 % de la inversión inicial lo cual hace el proyecto más atractivo de desarrollar, procurando que el productor proporcione un monto simbólico del proyecto, lo que permite un trabajo en conjunto y un compromiso que beneficie a ambas partes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Se concluye, por medio del análisis físico, que el suelo en el invernadero es principalmente tipo franco arcilloso, con una densidad aparente de 0.75 g/cm^3 y una CC y PMP de 47.5 % y 34.5 %. Asimismo sus parámetros químicos se observan en el Cuadro 8, donde se obtuvo un pH de 5.6 y concentración de fósforo y potasio de 15 mg/L y 1.09 cmol/L, además de otros datos.
- Se concluye, a partir de la investigación teórica, que el biochar desarrollado en el carbonizador posee una área superficial, densidad envolvente y porosidad de aproximadamente $72 \text{ m}^2/\text{g}$, 0.45 g/cm^3 y 68.3 %. Además de una capacidad de absorción de agua de $0.52 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y la concentración de nutrientes que se muestra en el Cuadro 12.
- Se concluye, por bases teóricas, que lo más recomendado es realizar una aplicación de biochar una vez al año, siendo esta de una 1 % de concentración volumétrica en el suelo.
- Se concluye, mediante el modelado en MATLAB y los valores teóricos y experimentales asociados al biol y al biochar, que el balance nutricional del culantro es equilibrado a lo largo de su desarrollo, requiriendo solamente dosificación de nitrógeno.
- Se diseña un carbonizador con las dimensiones que se muestra en la Figura 12, el cual llegará a producir aproximadamente 64.7 kg de biochar en tres tandas, utilizando $\approx 200 \text{ kg}$ de biomasa, y 100 kg de leña para sostener el proceso.
- Se concluye, mediante el modelado en MATLAB y los cálculos del diseño agronómico, que el requerimiento hídrico máximo del sistema es de $0.44 \text{ m}^3/\text{d}$.
- Se diseña un sistema de riego por goteo, con dos subsecciones y 5 mangueras de goteo en cada una, con goteros con un flujo de 2 L/h cada uno. El sistema

descarga $0.425 \text{ m}^3/\text{h}$, y es de PVC con un diámetro de $1/2''$ hasta llegar a las mangueras, que son de PE y posee un diámetro de 16.1 mm.

- Se concluye, mediante la simulación en Comsol que se consigue una distribución más homogénea, con un rango de velocidad y presión adecuados regando solamente una sección y posteriormente la siguiente.
- Se concluye que un sistema de control automático con sensores de humedad y nivel, cuyo accionamiento se da por medio de la bomba y electroválvulas o válvulas, que sigue el algoritmo de ejecución descrito en las Figuras 26 y 27 es apto para el escenario en cuestión.
- Se concluye que un sistema fotovoltaico adecuado da para abastecer una demanda de 18.2 Wh/d , con un voltaje de 24 V. Por lo que se realiza un acomodo de un panel solar de 115 W, con un regulador de carga y dos baterías en serie.
- Se concluye mediante el análisis financiero que los tres escenarios resultan rentables en relación con el escenario actual, esto analizando los resultados de VAN y TIR obtenidos. Siendo el escenario más rentable el sistema completo impulsado mediante energía eléctrica, obteniendo un VAN de 2 108 107 CRC y un TIR de 42 %.
- Se concluye que las variables de más peso que pueden incidir en las ganancias de la actividad son la producción del culantro y el costo de la mano de obra, esto con base al análisis de sensibilidad realizado, donde se obtienen diferencias significativas en el TIR.
- Se concluye, mediante comparación de los VAN entre escenarios, que el carbonizador es una adquisición que proyecta beneficios en cuanto a rentabilidad, esto si se consigue un precio de construcción bajo, ya que este disminuye el consumo de agua y logra un mayor rendimiento de producción.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un riego diario al culantro, y solamente en el caso en el que se inyecte fertilizantes este se dé cada dos días. Un riego constante reduce el esfuerzo de la planta en la absorción de agua.
- Se recomienda realizar el riego de una sección primero seguida de la otra, esto puede alargar la vida útil de los goteros al reducir el riesgo de obstrucción por el aumento de presión.
- Se recomienda, al colocar los sensores, evaluar por un mes su funcionamiento y de acuerdo a los resultados variar los límites de riego hasta que su desempeño mejore.
- Se recomienda probar el sistema en distintos horarios para probar cual se acopla bien a la temperatura y al horario del productor.
- Se recomienda recopilar información de nutrientes y absorción de otros cultivo de interés para modelarlo en MATLAB y verificar si el biol y el biochar logran proveer al sistema los nutrientes suficientes.
- Se recomienda, al aplicar un fertilizante, realizar una mezcla previa a pequeña escala para verificar que estos no reaccionen entre sí, generando precipitados que pueden obstruir el sistema o corroerlo.
- Se recomienda realizar una caracterización del biochar obtenido para analizar sus beneficios reales, determinar el área superficial, densidad y concentración elemental presente.
- Se recomienda realizar un análisis foliar a los primeros cultivos del culantro, para determinar los nutrientes característicos del cultivo y tanto las deficiencias como los excesos.
- Se recomienda realizar un análisis microbiológico al biol, esto para analizar la población microbiana tanto de nemátodos intestinales como coliformes fecales, lo que garantice su calidad como fertilizante.

- Se recomienda desarrollar un análisis de impacto ambiental para cada uno de los escenarios, y poder tener otra perspectiva de contraste.

NOMENCLATURA

Acrónimos

AU	Agua útil, mm
CC	Capacidad de campo, %
DPM	Déficit permisible de manejo, %
HSP	Horas solares pico, kWh/d
NP	Número de paneles, adim
PMP	Punto de marchitez permanente, %

Griegas

γ	Peso específico, kN/m ³
μ	Viscosidad fluido, Pa * s
ϕ	Espacio vacío carbonizador, adim
$\rho_{agua,r}$	Densidad agua de riego, kg/m ³
τ	Constante dinámica de tiempo, d

Mayúsculas

A	Área del cultivo, m ²
C_N	Concentración de nitrógeno en el fertilizante, adim.
C_{ia}	Concentración del nutriente en el agua de riego, mg/L
D_b	Dosis bruta de riego, mm
D_n	Dosis neta de riego, mm
EC	Conductividad eléctrica, S/m
Et_0	Evapotranspiración de referencia, mm/d
ET_0	Evapotranspiración del cultivo, L/(m ² d)
Etc	Evapotranspiración de cultivo, mm/d
$F_{dKH_2PO_4}$	Cantidad de fertilizante KH ₂ PO ₄ a disolver en el tanque, g
F_{dKNO_3}	Cantidad de fertilizante KNO ₃ a disolver en el tanque, g
$F_{IKH_2PO_4}$	Fertilizante KH ₂ PO ₄ inyectado por día, L
F_{IKNO_3}	Fertilizante KNO ₃ inyectado por día, L
$F_{KH_2PO_4}$	Cantidad de fertilizante necesario, tipo (12-61-0), g/m ²
F_{KNO_3}	Cantidad de fertilizante necesario, tipo (13-0-46), g/m ²

H_p	Humedad en base seca, g/g	
H_{bci}	Contenido de agua en la interfase, g/g	
H_{bc}	Contenido de agua en el biochar, g/g	
H_{satbc}	Punto de saturación del biochar, g/g	
I_b	Infiltración básica, mm/h	
I_m	Máximo intervalo entre riegos, d	
II	Inversión inicial, CRC	
K	Factor de pérdida, adim	
K_c	Coefficiente de crecimiento del cultivo, adim	
L	Largo	m
$Leq_{KH_2PO_4}$	Litros equivalentes a 1 g de N para el fertilizante KH_2PO_4 , L	
Leq_{KNO_3}	Litros equivalentes a 1 g de N para el fertilizante KNO_3 , L	
N	Días de autonomía de batería, d	
N_b	Necesidad bruta de riego, mm/d	
N_F	Nutrientes aportados por fertilizantes, mg/(m ² d)	
N_K	Absorción de potasio en la planta, mg/(m ² d)	
N_N	Absorción de nitrógeno en la planta, mg/(m ² d)	
N_n	Necesidad neta de riego, mm/d	
N_P	Absorción de fósforo en la planta, mg/(m ² d)	
N_S	Absorción de azufre en la planta, mg/(m ² d)	
N_{0i}	Pérdida de nutriente i, mg/(m ² d)	
N_{ai}	Nutriente i aportado por el agua de riego, mg/(m ² d)	
N_{bci}	Concentración de nutriente en el biochar, mg/kg	
N_{bci}	Nutriente i aportado por el biochar, mg/(m ² d)	
N_{Ca}	Absorción de calcio en la planta, mg/(m ² d)	
N_{fbci}	Concentración final de nutriente en el biochar, mg/kg	
N_{is}	Contenido de nutriente en el suelo, mg/(m ² d)	
N_{Mg}	Absorción de magnesio en la planta, mg/(m ² d)	
P	Presión, kPa	
P_b	Potencia de la bomba, W	
P_d	Profundidad máxima de descarga de batería, adim	

P_e	Profundidad efectiva de las raíces, m
P_f	Porcentaje de fertilizante a aplicar en relación con el total de fertilizante, m
P_r	Potencia diaria requerida, Wh/d
P_{MPP}	Potencia nominal del panel solar, W
PRI	Periodo recuperación inversión, aos
Q_m	Caudal mínimo de riego en toda el área, L/s
Q_n	Flujo neto anual, CRC
R_N	Requerimiento nitrógeno del culantro, g/m ²
TIR	Tasa interna de retorno, CRC
V_{bc}	Volumen de biochar necesario, m ³
V_b	Volumen de biomasa necesario, m ³
V_{tf}	Volumen tanque fertilizantes, L
VAN	Valor actual neto, CRC
W_s	Contenido de agua en el suelo, g/m ²
X_p	Porcentaje de pérdida de nutrientes, %
Y_p	Rendimiento en base seca, g/m ²
Re	Número de Reynolds, adim

Minúsculas

d_A	Densidad aparente, g/cm ³
d_c	Diámetro del carbonizador, m
d_t	Diámetro de tubería, m
g	Aceleración gravitacional, m/s ²
h	Altura del suelo al que se aplica biochar, m
h_A	Energía que se agrega al fluido mediante un dispositivo mecánico, m
h_c	Altura del carbonizador, m
h_L	Pérdidas de energía del sistema, m
h_m	Pérdidas menores, m
h_R	Energía que se retira del fluido mediante un dispositivo mecánico, m
h_t	Pérdidas de carga en la tubería, m
t_a	Tiempo de aplicación, h

t_o	Tiempo de operación del sistema, h	
t_p	Transpiración de la planta, g/(m ² d)	
td	Tasa de descuento del proyecto, %	
v	Velocidad del fluido, m/s	
w_i	Agua de infiltración, g/(m ² d)	
w_p	Agua de suelo, g/(m ² d)	
w_r	Agua de riego, g/(m ² d)	
w_{bc}	Agua aportada por el biochar, g/(m ² d)	
x	Composición del biochar en el suelo, adim	
y	Posición vertical	m
z	Altura, m	
f	Factor de fricción, adim	

Superíndices

\bar{X} Refiérase al promedio de X

Subíndices

1 Se refiere al primer valor

2 Se refiere al último valor

bc Refiérase a biochar

W Refiérase a interacción con agua

BIBLIOGRAFÍA

- Abenza, D. P. (2012). *Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta*. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Acón, J., Alpízar, L., y WingChing, R. (2013). Percolación y lixiviación de nutrientes en suelos bananeros. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2):329–336.
- Ahmad, S. y Ajaz, A. (2013). *Design and operations manual pressurized irrigation systems. A Joint Venture of NESPAK and NDC*, volumen I.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Technical report, Roma. Italia.
- Alvarado, J. y Francisco, S. (2015). DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA. Technical report, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Bacca, H., Narvaez, J., y Unigarro, A. (2011). Evaluación de la movilidad del azufre en un suelo Vitric haplustand. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1):107–118.
- Bertsch, F. (2009). *Absorción de nutrientes por los cultivos*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Brye, K. E., Savin, K. R., y Longer, M. C. (2015). Biochar Source and Application Rate Effects on Soil Water Retention Determined Using Wetting Curves. *Open Journal of Soil Science*, 5:1–10.
- Cambronero, C. A. (2018). *Producción y evaluación de uso de carbón activado como un coadyuvante en la fertilización de los cultivos de cebolla*. Tesis doctoral, Universidad de Costa Rica.
- Carrazón Alocen, J. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de miniriego*.

- Castro, H. (2000). Estudio de Factibilidad de Producción de Plántulas de Tomate y Repollo en Invernaderos en Siguatepeque, Honduras. Technical report, Zamorano-Honduras.
- Cruz Crespo, E., Can Chulim, ., Javier Loera Rosales, L., Aguilar Benítez, G., Pineda Pineda, J., y Bugarín Montoya, R. (2017). Extracción de NPK en *Coriandrum sativum* 'Pakistan' en hidroponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2):355–367.
- De Gryze, S., Cullen, M., Phil, D., Durschinger, L., Lehmann, J., Bluhm, D., Six, J., y Suddick, E. (2010). Evaluation of the Opportunities for Generating Carbon Offsets from Soil Sequestration of Biochar.
- De Tafur, M. S. M., Pimentel, G. E. M., y Flores, J. C. M. (2014). Respuesta fisiológica de cilantro (*Coriandrum sativum* L.) a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronomica*, 63(3).
- Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., Etchevers Barra, J. D., Rebolledo, E., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., y Valtierra Pacheco D Etchevers Barra, E. J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo . *Revista Terra Latinoamericana*, 34(3):367–382.
- FAO (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*, volumen 41. Roma.
- García, F., Bedoya, J., y López, G. (2013). Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano. *Tecnura*, 17(2):33–47.
- Garro, A., Carraza, C., y Zúñiga, Y. (2014). Sistema de Riego por Goteo Energizado con Módulos Solares. Technical report, Tecnológico de Costa Rica, Alajuela.
- Government of India (2017). Guidelines for planning and design of piped irrigation network. Technical Report July.

- Henríquez, C., Cabalceta, G., Bertsch, F., y Alvarado, A. (2000). Principales tipos de suelos de Costa Rica.
- Herrera, A., Poveda, W., y García, O. (2019). Diseño de un sistema de fertirriego por goteo para la optimización de agua y fertilizantes en cultivos de cebolla larga del municipio de Aquitania (Boyacá). Technical report, Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Kafkafi, U. y Tarchitzky, J. (2012). *Fertirrigación Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua*.
- Lehmann, J. y Joseph, S., editores (2009). *Biochar for Environmental Management Science and Technology*, volumen 26. Earthscan, London.
- Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., y Gonnermann, H. M. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties.
- Major, J. (2010). Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems . Technical report, International Biochar Initiative.
- Martínez, L. C. y López, J. C. (2013). *Diseño de sistema de de fertirrigación con obras de captación utilizando cosecha de agua en cítricos injertos, naranja valencia (citrus cinenses), limón tahití (citrus latifolia), mandarina (citrus reticulata), en la Finca El Paraíso, Municipio San Juan d.* Tesis doctoral, Universidad Nacional de Ingeniería.
- MnROAD (1993). Moisture Sensing Documentation General Overview.
- Mott, R. L., Enríquez, J., y Leon, J. (2006). *Mecánica de fluidos*. Prentice-Hall, 6 edición.
- Orjuela Castillo, D. S. y Ríos Llano, D. C. (2018). Evaluación de la productividad de cilantro (coriandrum sativum) a través de la fertilización química y orgánica en la huerta de la IETA Mariano Melendro de la Ciudad de Ibagué. Technical report, UNIMINUTO, Ibagué.

- Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejacal, I., Salcedo-Pérez, E., y Balois-Morales, R. (2007). Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas . *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4):713–725.
- Pérez Martínez, E. Y. (2015). *Evaluación de un cabonizador portátil de bajo costo en la valorización de residuos biomásicos lignocelulósicos* . Tesis doctoral, Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Peters, M. (1978). *Diseño de plantas y su evaluación económica para ingenieros químicos* /. McGraw Hill, New York, segunda edición.
- Power, N. (2015). NASA POWER | Prediction Of Worldwide Energy Resources.
- Rivera, D. R., Paduman, S. I., Uon, L., y Chua, A. (2020). A new automated drip irrigation and fertigation system for sugarcane crops. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 715(1).
- Ruiz Granados, C. (2013). Riego por goteo permite ahorros de un 40% en el consumo de agua.
- Sadeghian, S., González, H., y Arias, E. (2015). *Lixiviación de nutrientes en suelos de la zona cafetera: Prácticas que ayudan a reducirla*.
- Sandia National Laboratories (2011). Guía para el desarrollo de proyectos de Bombea de Agua con Energía Fotovoltaica. Technical report.
- Sapag Chain, N. (2007). *Proyectos de inversion : formulacion y evaluacion*. Person Educacion.
- Segura Chavarría, D. M. (2018). Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta" . Technical report, Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Sik, Y., Uchimiya, S., y Bolan, N., editores (2016). *Biochar: production, characterization and applications*. CRC Press/Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, Florida.

- Singh, B., Campos-Arbestain, M., y Lehmann, J., editores (2017). *Biochar: a guide to analytical methods*. CRC Press/Taylor and Francis Group, LLC, Clayton South.
- Smith, C. A. y Corripio, A. B. (2001). *Control automatico de procesos : teoria y practica*. Limusa.
- Soto-Bravo, F. y Moreno, F. B. (2019). Hydroponic wild coriander (*Eryngium foetidum*) with drip irrigation and under protection: system characterization and nutrient absorption. *Applied Research & Agrotechnology*, 12(03):39–54.
- Sun, H., Brewer, C. E., Masiello, C. A., y Zygourakis, K. (2015). Nutrient transport in soils amended with biochar: A transient model with two stationary phases and intraparticle diffusion. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54(16):4123–4135.
- US Department of Energy (2018). Cost Estimating Guide. Technical report, Washington DC.
- Yara (2020). Yara Fertigation Manual .

APÉNDICES

A DATOS TEÓRICOS

Cuadro A.1. Comportamiento de humedad en base seca del culantro en su desarrollo, construido a partir del rendimiento húmedo dado en (Soto-Bravo y Moreno, 2019).

Tiempo (d)	Humedad (g/g)
5	7.75
15	7.64
25	7.98
35	9.29
45	8.49

Cuadro A.2. Rendimiento de la materia seca del culantro en su desarrollo (Soto-Bravo y Moreno, 2019).

Tiempo (d)	Rendimiento (g/m ²)
5	80
15	220
25	490
35	700
45	875

Cuadro A.3. Datos de absorción de nitrógeno por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).

Tiempo (d)	Absorción no acumulada (g/m ²)
0	0.01
10	3.39
20	7
30	9.3
40	10.4
50	4.7

Cuadro A.4. Datos de absorción de fósforo por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).

Tiempo (d)	Absorción no acumulada (g/m ²)
0	0.01
10	0.49
20	0.8
30	1.1
40	1.7
50	0.8

Cuadro A.5. Datos de absorción de calcio por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).

Tiempo (d)	Absorción no acumulada (g/m ²)
0	0.01
10	0.59
20	1.4
30	1.8
40	2.1
50	0.3

Cuadro A.6. Datos de absorción de magnesio por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).

Tiempo (d)	Absorción no acumulada (g/m ²)
0	0.01
10	0.09
20	0.3
30	0.5
40	0.5
50	0.3

Cuadro A.7. Datos de absorción de azufre por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).

Tiempo (d)	Absorción no acumulada (g/m ²)
0	0.01
10	0.19
20	0.4
30	0.6
40	0.3
50	0.3

Cuadro A.8. Datos de absorción de potasio por parte del culantro (Soto-Bravo y Moreno, 2019).

Tiempo (d)	Absorción no acumulada (g/m ²)
0	0
10	2.36
20	13.06
30	14.11
40	14
50	10.6

B RESULTADOS INTERMEDIOS

Cuadro B.9. Datos y resultados generales de los cálculos obtenidos del diseño agronómico (metodología de Carrazón Alocen (2007))

Parámetro	Valor	Unidades
Infiltración básica suelo	15	mm/h
Densidad aparente suelo	0.75	g/cm ³
Capacidad de campo	47.5	%(gravimétrico)
Punto de marchitez permanente	34.5	%(gravimétrico)
Profundidad efectiva de las raíces	0.4	m
Agua utilizable	39	mm
Déficit permisible de manejo	50	%
Dosis neta de riego	19.5	mm
Máximo intervalo entre riegos	2.31	d
Dosis neta ajustada	8.43	mm
Dosis bruta de riego	9.36	mm
Tiempo mínimo de aplicación	0.624	h
Necesidad bruta de riego	9.36	mm/d
Caudal mínimo requerido	0.44	m ³ /d

Cuadro B.10. Datos y resultados generales de los cálculos obtenidos del diseño del carbonizador.

Sección	Parámetro	Valor	Unidades
Dimensiones	Diámetro	0.755	m
	Altura	0.97	m
	Espacio vacío	0.68	-
	Rendimiento	32	%
	Biomasa necesaria	202.4	kg
	Volumen biomasa	0.14	m ³
	Densidad biomasa	500	kg/m ³
	Masa biomasa por tanda	70.38	kg
	Número de tandas	2.9	-
Necesidad biochar	Composición bc	0.01	Volumétrica
	Altura mezcla	0.3	m
	Volumen bc necesario	0.144	m ³
	Densidad bc	450	kg/m ³
	Masa bc	64.77	kg
	Aplicación	1.36	kg/m ²
Consumo leña	Consumo	34 %	
	Necesidad leña por tanda	36.25	kg
	Necesidad de leña total	105.14	kg

Cuadro B.11. Datos de requerimiento hídrico del suelo obtenido mediante vectores en MATLAB, para el primer, segundo, tercer y cuarto ciclo.

Tiempo (d)	Primer ciclo	Segundo ciclo	Tercer ciclo	Cuarto ciclo
	Req. híd.	Req. híd.	Req. híd.	Req. híd.
	(g/m ²)	(g/m ²)	(g/m ²)	(g/m ²)
1	0	470	1580	880
2	3010	1040	2100	1410
3	3130	1590	2590	1920
4	3240	2120	3040	2400
5	3370	2610	3480	2830
6	3490	3070	3870	3260
7	3620	3510	4250	3640
8	3740	3930	4590	4000
9	3870	4300	4910	4330
10	4000	4670	5190	4650
11	4140	5000	5460	4940
12	4260	5300	5700	5210
13	4390	5600	5910	5460
14	4530	5860	6100	5690
15	4670	6100	6280	5910
16	4800	6340	6420	6120
17	4950	6530	6560	6310
18	5090	6730	6660	6480
19	5240	6900	6770	6670
20	5390	7060	6840	6830
21	5540	7210	6900	6990
22	5700	7330	6950	7150
23	5870	7450	6990	7310
24	6030	7560	7000	7460
25	6200	7650	7020	7620
26	6380	7740	7020	7770
27	6550	7810	4670	7930
28	6740	4460	3490	4730
29	6920	3970	3470	4130

Cuadro B.12. Continuación Cuadro de datos de requerimiento hídrico del suelo obtenido mediante vectores en MATLAB, para el primer, segundo, tercer y cuarto ciclo.

Tiempo (d)	Primer ciclo	Segundo ciclo	Tercer ciclo	Cuarto ciclo
	Req. híd. (g/m ²)			
30	7100	3990	3450	4220
31	3930	4000	3430	4320
32	3750	4030	3390	4410
33	3840	4030	3350	4500
34	3930	4040	3320	4610
35	4030	4040	3270	4720
36	4130	4040	3210	4830
37	4220	4030	3160	4950
38	4310	4010	3100	5070
39	4400	4000	3030	5200
40	4480	3980	2950	5340
41	4570	3940	2880	5470
42	4640	3920	2790	5620
43	4720	3870	2690	5760
44	4780	3820	2600	5920
45	4850	3760	2480	6100
46	4900	3710	2370	6250
47	4940	3630	2240	6430
48	4980	3550	2110	6590
49	5000	3470	1970	6780

Cuadro B.13. Datos de requerimiento hídrico del suelo obtenido mediante vectores en MATLAB para el quinto, sexto y séptimo ciclo.

Tiempo (d)	Quinto ciclo	Sexto ciclo	Séptimo ciclo
	Req. híd. (g/m ²)	Req. híd. (g/m ²)	Req. híd. (g/m ²)
1	3740	3010	3010
2	3930	3130	3130
3	4120	3240	3240
4	4290	3370	3370
5	4470	3490	3490
6	4640	3620	3620
7	4800	3740	3740
8	4950	3870	3870
9	5110	4000	4000
10	5250	4140	4140
11	5390	4260	4260
12	5520	4390	4390
13	5660	4530	4530
14	5780	4670	4670
15	5910	4800	4800
16	6020	4950	4950
17	6150	5090	5090
18	6260	5240	5240
19	6380	5390	5390
20	6490	5540	5540
21	6600	5710	5710
22	6720	5860	5860
23	6830	6030	6030
24	6940	6200	6200
25	7060	6380	6380
26	5340	6550	6550
27	3640	6740	6740
28	3700	6920	6920
29	3750	7100	7100

Cuadro B.14. Continuación Cuadro de datos de requerimiento hídrico del suelo obtenido mediante vectores en MATLAB para el quinto, sexto y séptimo ciclo.

	Quinto ciclo	Sexto ciclo	Séptimo ciclo
Tiempo (d)	Req. híd. (g/m ²)	Req. híd. (g/m ²)	Req. híd. (g/m ²)
30	3810	3930	3930
31	3870	3750	3750
32	3920	3830	3830
33	3980	3940	3940
34	4020	4030	4030
35	4080	4130	4130
36	4130	4210	4210
37	4170	4310	4310
38	4220	4400	4400
39	4260	4490	4490
40	4290	4570	4570
41	4320	4640	4640
42	4350	4720	4720
43	4370	4780	4780
44	4380	4850	4850
45	4390	4890	4890
46	4380	4940	4940
47	4370	4980	4980
48	4360	5000	5000
49	4320	5020	

Cuadro B.15. Datos del requerimiento de nitrógeno diario a lo largo del ciclo, con base a los parámetros del análisis del biol.

Tiempo (d)	Conc. N en suelo (mg/m ²)	Req. N (mg/m ²)	Tiempo (d)	Conc. N en suelo (mg/m ²)	Req. N (mg/m ²)
1	0	0	26	-1847.1	-9.3
2	74.7	-74.7	27	-1842.7	-4.4
3	75.5	-0.8	28	-1845.9	3.2
4	17.7	57.8	29	-1859.1	13.2
5	-85	102.7	30	-1884.7	25.6
6	-220.4	135.4	31	-1924.3	39.6
7	-377.9	157.5	32	-1979.2	54.9
8	-548.4	170.5	33	-2050.1	70.9
9	-724.1	175.7	34	-2137.3	87.2
10	-898.3	174.2	35	-2240	102.7
11	-1065.7	167.4	36	-2356.9	116.9
12	-1222.1	156.4	37	-2485.6	128.7
13	-1364.3	142.2	38	-2623	137.4
14	-1490	125.7	39	-2764.7	141.7
15	-1597.9	107.9	40	-2904.9	140.2
16	-1687.3	89.4	41	-3037.4	132.5
17	-1758.4	71.1	42	-3153.6	116.2
18	-1811.9	53.5	43	-3245.9	92.3
19	-1849.2	37.3	44	-3302.8	56.9
20	-1872.1	22.9	45	-3312.7	9.9
21	-1882.7	10.6	46	-3257.4	-55.3
22	-1883.6	0.9	47	-3124.3	-133.1
23	-1877.6	-6	48	-2899.2	-225.1
24	-1867.5	-10.1	49	-2562	-337.2
25	-1856.4	-11.1	50	-2091.5	-470.5
Req. total			2091.5		
	(mg N/m ²)				

Cuadro B.16. Especificaciones del tanque de almacenamiento del biol o agua de riego.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo másico entrada	447.4	kg/día
Flujo volumétrico entrada	0.44	m ³ /d
Tiempo máx almacenamiento	4	d
Volumen mín	1.79	m ³
Altura	1.5	m
Área	1.19	m ²
Diámetro	1.23	m
Material	Plástico	-

Cuadro B.17. Diseño de sección de inyección de fertilizantes, para dos posibles fertilizantes solubles entre sí. Utilizando la metodología dada por Yara (2020).

Parámetro	Valor	Unidades
Requerimiento N del culantro (R_N)	3.68	g/m^2
Porcentaje aplicación KNO_3	65	%
Porcentaje aplicación KH_2PO_4	35	%
Cantidad KNO_3 (13-0-46)	18.4	g/m^2
Cantidad KH_2PO_4 (12-61-0)	10.73	g/m^2
Tiempo aplicación fertilizantes	20	d
Volumen tanque fertilización	150	L
Cantidad KNO_3 total	1000	g
Cantidad KH_2PO_4 total	600	g
Nitrógeno equivalente KNO_3	130	g
Nitrógeno equivalente KH_2PO_4	72	g
Litros equivalentes a 1 g N (KNO_3)	1.154	L
Litros equivalentes a 1 g N (KH_2PO_4)	2.083	L
Área irrigación	47.5	m^2
Fertilizante inyectado por día (KNO_3)	6.5	L
Fertilizante inyectado por día (KH_2PO_4)	6.37	L

Cuadro B.18. Datos de descarga y diseño del sistema de fertirriego

Parámetro	Valor	Unidades
Mínima humedad en suelo	123 015.5	g/m ²
Cantidad de mangueras	10	-
Longitud manguera	4.7	m
Distancia entre emisores	0.2	m
Descarga emisor	2	L/h
Número emisores por manguera	23	-
Descarga máxima de agua	0.415	m ³ /d
Distancia entre líneas de goteros	1	m
Razón de irrigación	10	L/(m ² h)
Razón de irrigación total	0.475	m ³ /h
Tiempo irrigación diaria	≈ 52	min
Flujo inyector Venturi	31.8	L/h
Total fertilizante inyectar	13.11	L
Tiempo de inyección	≈ 25	min

Cuadro B.19. Resultados y valores utilizados para los cálculos del sistema hidráulico.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo tubería	0.475	m ³ /h
Temperatura	25	C°
Largo tubería PVC	10.26	m
Largo manguera (PE)	47	m
Rugosidad	0.0000015	m
Velocidad pto 1 (V1)	0	m/s
Velocidad pto 2 (V2)	0.0648	m/s
Altura pto 1 (Z1)	1	m
Altura pto 2 (Z2)	0	m
Presión pto 1 (P1)	101325	Pa
Presión pto 2 (P2)	101325	Pa
Densidad	998.83	kg/m ³
Viscosidad	0.00763	Pa*s
Largo tubería T1	3.7	m
Largo tubería T2	6.15	m
Largo tubería T3	4.7	m
Diámetro T1 y T2	0.0155	m
Diámetro T3	0.0161	m
Velocidad T1	0.7	m/s
Velocidad T2	0.35	m/s
Velocidad T3	0.065	m/s
Reynolds T1	1418.85	-
Reynolds T2	709.4	-
Reynolds T3	136.6	-
Rugosidad relativa T1 y T2	9.67E-05	-
Rugosidad relativa T3	9.32E-05	-
Factor fricción Darcy T1	0.045	-
Factor fricción Darcy T2	0.09	-
Factor fricción Darcy T3	0.47	-

Cuadro B.20. Pérdidas de carga en la tubería y potencia necesaria para impulsar el sistema.

Parámetro	Valor	Unidades
Pérdidas de carga en tubería (h_t)	0.773	m
Pérdidas menores (h_m)	6.59	m
Pérdidas totales (h_L)	7.36	m
Potencia de bomba (P)	9.43	W
	0.0126	hp
Eficiencia aproximada	60	%
Potencia	0.021	hp

Cuadro B.21. Datos para determinar la NPSHd del sistema.

Parámetro	Valor	Unidades
Elevación	1	m
Presión recipiente (hsp)	10.34	m
Pérdidas de carga (h)	7.36	m
Presión de vapor	0.3234	m
NPSHd	1.66	m

¹T1: Trayecto hasta primer ramificación. T2: Segunda a tercer ramificación. T3: Trayecto final.

Cuadro B.22. Datos generales de pérdida energética para el diseño del sistema de generación fotovoltaica.

Parámetro	Valor
Factor pérdida en batería	0.05
Factor pérdida en regulador	0.1
Factor pérdida cableado y equipos	0.1
Factor pérdida autodescarga batería	0.002
Días de autonomía batería	4
Profundidad máxima descarga	0.5
Factor pérdida energía en sistema	0.738

Cuadro B.23. Datos generales del sistema fotovoltaico

Parámetro	Valor	Unidades
Energía requerida en el sistema	24.66	Wh/d
Horas solares pico (HSP)	4.87	kWh/d
Potencia nominal panel (P_{MPP})	20	W
Número de paneles	1	-

C MUESTRA DE CÁLCULO

C.1 Cálculos diseño carbonizador

Para obtener las dimensiones del carbonizador se recurrió primero a determinar la cantidad de biochar necesario para aplicar en un año. Para esto se emplea la siguiente ecuación:

$$V_{bc} = \frac{A * h * x}{1 - x} \quad (C.1)$$

Donde,

V_{bc} = Volumen de biochar necesario, m³

A = Área del cultivo, m²

h = Altura del suelo al que se aplica biochar, m

x = Composición del biochar en el suelo, adim

Sustituyendo los valores conocidos del Cuadro B.10, en la columna 3, fila 11 y 12 se obtiene:

$$V_{bc} = \frac{47.5 * 0.3 * 0.01}{1 - 0.01} = 0.144 \quad (C.2)$$

A partir de este volumen de biochar se calcula la masa biochar necesaria con el dato de densidad que se muestra en el Cuadro B.10. Conociendo la necesidad de biochar se determina la biomasa necesaria total a partir del rendimiento que se detalla en el Cuadro B.10. Y conociendo esto se varía la altura y diámetro de forma que sean coherentes y logren un volumen apto para el sistema mediante la ecuación siguiente:

$$V_b = \frac{\pi * d_c^2}{4} * h_c * (1 - \phi) \quad (C.3)$$

Donde,

V_b = Volumen de biomasa necesario, m³

d_c = Diámetro del carbonizador, m

h_c = Altura del carbonizador, m

ϕ = Espacio vacío carbonizador, adim

Sustituyendo en la ecuación por los valores del Cuadro B.10, columna 3, fila 2,3 y 4 se obtiene:

$$V_b = \frac{\pi * 0.755^2}{4} * 0.97 * (1 - 0.676) = 0.14 \quad (C.4)$$

A partir del volumen de biomasa y la densidad de biomasa que se encuentra en el Cuadro B.10 columna 3, fila 8, se obtiene la masa necesaria. Conociendo la masa que cabe en el horno y biomasa necesaria total, se calcula el número de tandas para carbonizar todo.

C.2 Cálculos de aplicación de fertilizantes

Para determinar la inyección de fertilizantes diaria se siguió la metodología dada por Yara (2020). Primero se calculó la cantidad fertilizante necesario a partir de la necesidad de nitrógeno. Se empleó la ecuación siguiente:

$$F_{KNO_3} = R_N * P_f / C_N \quad (C.5)$$

Donde,

F_{KNO_3} = Cantidad de fertilizante necesario, tipo (13-0-46), g/m²

R_N = Requerimiento nitrógeno del culantro, g/m²

P_f = Porcentaje de fertilizante a aplicar en relación con el total de fertilizante, m

C_N = Concentración de nitrógeno en el fertilizante, siadim

A partir de los datos del Cuadro B.17, de la columna 2, fila 2 y 3, se sustituye:

$$F_{KNO_3} = 3.68 * 0.65 / 0.13 = 18.4 \quad (C.6)$$

Esto sería para el caso del nitrato de potasio, pero se realiza de la misma con el fosfato monoamónico, cuyos datos se encuentran en el Cuadro B.17. Ahora, se debe calcular los litros equivalentes a 1 g de N, en este caso se describe el procedimiento para el

nitrate de potasio, por lo que se utiliza la ecuación que se muestra a continuación:

$$Leq_{KNO_3} = \frac{V_{tf}}{F_{dKNO_3} * C_N} \quad (C.7)$$

Donde,

Leq_{KNO_3} = Litros equivalentes a 1 g de N para el fertilizante KNO_3 , L

V_{tf} = Volumen tanque fertilizantes, L

F_{dKNO_3} = Cantidad de fertilizante KNO_3 a disolver en el tanque, g

Sustituyendo los valores de la ecuación por los que se encuentran en el Cuadro B.17, columna 2, fila 8 y 9, se desarrolla la ecuación de esta forma:

$$Leq_{KNO_3} = \frac{150}{1000 * 0.13} = 1.154 \quad (C.8)$$

Esto se desarrolla de la misma forma para el fosfato monoamónico (12-61-0). A partir de este valor y de la cantidad de fertilizante necesaria a suplir se obtiene la cantidad de fertilizante inyectado al día mediante la ecuación siguiente:

$$F_{IKNO_3} = \frac{F_{KNO_3}}{T_a} * A * C_N * Leq_{KNO_3} \quad (C.9)$$

Donde,

F_{IKNO_3} = Fertilizante KNO_3 inyectado por día, L

Sustituyendo los valores obtenidos en las ecuaciones anteriores, que se muestran en el Cuadro B.17, columna 2, fila 5,7 y 13, se obtiene:

$$F_{IKNO_3} = \frac{18.4}{20} * 47.5 * 0.13 * 1.154 = 6.55 \quad (C.10)$$

Así como se describió en las ecuaciones anteriores, se realiza el mismo procedimiento para el caso del fertilizante KH_2PO_4 .

C.3 Cálculos del sistema hidráulico

Para el diseño del sistema hidráulico se calculó inicialmente el número de Reynolds, mediante la ecuación siguiente:

$$Re = \frac{\rho_{agua,r} * V * d_t}{\mu} \quad (C.11)$$

Donde,

Re = Número de Reynolds, adim

v = Velocidad fluido, m/s

d_t = Diámetro de tubería, m

μ = Viscosidad fluido, Pa * s

Para obtener el valor de Reynolds 1 se utilizan los valores que se muestran en el Cuadro B.19, en la columna 2, fila 13, 14, 18 y 20 y se desarrolla la ecuación de esta forma:

$$Re = \frac{998.83}{*0.7 * 0.0155} 0.00763 = 1418.86 \quad (C.12)$$

Esto se desarrolla para los tres tramos, T1, T2 y T3 con sus valores respectivos. Posterior al cálculo del Reynolds se determina el factor de fricción mediante la ecuación de Darcy, que se muestra a continuación:

$$f = 64/Re \quad (C.13)$$

Donde,

f = Factor de fricción, adim

Sustituyendo se obtiene,

$$f = 64/1418.86 = 0.045 \quad (\text{C.14})$$

A partir de estos valores se calcula las pérdidas de carga totales del sistema de tuberías. Para esto se utiliza la ecuación:

$$h_L = h_t + h_m \quad (\text{C.15})$$

Donde,

h_L = Pérdidas de energía en el sistema, m

h_t = Pérdidas de carga en la tubería, m

h_m = Pérdidas menores, m

Sustituyendo estos datos por los valores reales, que se observan en el Cuadro B.20, columna 2, fila 2 y 3 se obtiene:

$$h_L = 0.773 + 6.59 = 7.36 \quad (\text{C.16})$$

A partir de esta pérdida de carga se calcula la potencia necesaria para mover el sistema. Para esto se emplea la siguiente ecuación:

$$P_b = [(Z_2 - Z_1) + \frac{V^2}{2 * g} + h_L] * g * \rho_{agua,r} * Q \quad (\text{C.17})$$

Donde,

P_b = Potencia de la bomba, W

Z_2 = Altura en el pto 2, m

Z_1 = Altura en el pto 1, m

V_2 = Velocidad en el pto 2, m/s

Q = Flujo volumétrico, m³/s

g = Aceleración gravitacional, m/s²

Sustituyendo los valores de la ecuación con los que se indican en el Cuadro B.19, columna 2, fila 2, 8, 9, 10 y 13, y Cuadro B.20, columna 2 y fila 4 se obtiene:

$$P_b = [(0 - 1) + \frac{0.065^2}{2 * 9.81} + 7.36] * 9.81 * 998.83 * 0.00015 = 9.43 \quad (C.18)$$

C.4 Cálculos de la cantidad de paneles

Para obtener el número de paneles necesarios para abastecer el sistema se utiliza la siguiente ecuación:

$$NP = \frac{P_r}{HSP * P_{MPP}} \quad (C.19)$$

Donde,

NP = Número de paneles, adim

P_r = Potencia diaria requerida, Wh/d

P_{MPP} = Potencia nominal del panel solar, W

HSP = Horas solares pico, kWh/d

Sustituyendo los valores por los que se muestran en el Cuadro B.23, de columna 2

y fila 2,3 y 4 se obtiene:

$$NP = \frac{24.66}{4.87 * 20} = 0.25 \quad (C.20)$$

C.5 Cálculos de los indicadores financieros

Los tres indicadores de interés son el VAN, el TIR y el PRI. La ecuación para determinar el VAN es la siguiente:

$$VAN = \sum_0^5 \frac{Q_n}{(1 + td)^n} \quad (C.21)$$

Donde,

VAN = Valor actual neto, CRC

Q_n = Flujo neto anual, CRC

td = Tasa de descuento del proyecto, %

n = Años de flujo de caja, aos

Sustituyendo los valores con los del flujo de caja del escenario 1, que se muestra en el Cuadro 17, fila 16, se obtiene:

$$VAN = \frac{-2409874}{(1 + 0.1)^0} + \frac{1141487}{(1 + 0.1)^1} + \frac{1141487}{(1 + 0.1)^2} + \frac{1141487}{(1 + 0.1)^3} + \frac{1141487}{(1 + 0.1)^4} + \frac{1141487}{(1 + 0.1)^5} \quad (C.22)$$

Esto se desarrolla de la misma forma para los otros flujos de caja. Ahora, para el caso del TIR, la ecuación que se emplea es la misma del VAN, pero igualándola a 0 y despejando la tasa de descuento. Finalmente el PRI se obtiene utilizando la

siguiente ecuación:

$$PRI = \frac{II}{Q_n} \quad (C.23)$$

Donde,

PRI = Periodo recuperación inversión, aos

II = Inversión inicial, CRC

Sustituyendo los datos con los del escenario 1 se desarrolla la ecuación de esta forma:

$$PRI = \frac{2081957}{(1141487)} = 1.8 \quad (C.24)$$

ANEXOS

A Código de MATLAB para el modelado matemático

A.1 Balance en el suelo

```
function dx = BalanceSuelo2(t,x,u)
% Definición de las variables de estado:
% x(1) = W_s; % Contenido de agua en el suelo, g/m2
% x(2) = N_s; % Contenido de nitrógeno en el suelo, mg/m2
% x(3) = N_b; % Variable de estado promedio de concentración en el biochar nitrógeno (mg/m2)
%% Entradas
% Wc = u(1); % Constante de la ecuación de transferencia en biochar
% par_N = [5.165; 158; 285.6; 4.483; 0.984; 0.827; 108]; % Constante dinámica nutrientes biochar (K) y concentraciones finales de nutriente en el biochar (mg/kg biochar)
% Definición de las entradas balance agua:
% Riego
u = u(1);
% Infiltración
% i_s = 0.15*u;
% Evapotranspiración
% E_s = 0.480821715 + 0.00227172 * 0.480821715 * 2.4707; % Evapotranspiración para los meses Enero-Febrero (58 días). Primer ciclo del cultivo, (L/ha/día).
% E_b = E_s * E_s/N_s; % Agua evaporada y transpirada por la planta, (g/m2/día)
% Definición de las entradas balance nutrientes:
% Entradas de nutrientes del agua (mg 1/ha2/día)
% C_w = [127.80; 158.59; 183.47; 842.72; 13.143; 16.128]; % [N;P;K;Ca;Mg;S]; Diluido en una proporción de 2:1. Concentración de nutrientes en el agua (N,K,P,Ca,Mg,S), mg 1/L
% S = 1.144 * C_w;
% Entradas fertilizantes
% F = [0; 0; 0; 0; 0; 0]; % [N;P;K;Ca;Mg;S]; Aplicación de fertilizantes, mg/ha2/d
% Definición de las fertilizantes
% param = [0; 0; 0; 0; 0; 0]; % [N;P;K;Ca;Mg;S];
% S = param * F;
%% Ecuaciones diferenciales
% dW_s = W_c * (1 - W_s); % Agua en la planta, g/m2/d
% dN_b = W_c * (N_s - N_b); % Absorción de nutrientes por la planta. Regresiones están a 58 días máximas.
% dN_s = [1364 222750]; % Constante dinámica (K), constante g/bc/m2 y saturación biochar (g H2O/m2 bc)
% dW_b = A_b * (W_s - W_b) + N_b * (1 - W_b); % Biochar, g H2O/m2/d
% dN_b = V_b * (N_b - N_s); % Biochar, g H2O/m2/d
% dN_s = -N_s * (1 - N_s) + N_b * (1 - N_b); % Biochar, g H2O/m2/d
% dN_b = -N_b * (1 - N_b) + N_s * (1 - N_s); % Biochar, g H2O/m2/d
% dN_s = -N_s * (1 - N_s) + N_b * (1 - N_b); % Biochar, g H2O/m2/d
dx = [dW_s; dN_b; dN_s];
```

Figura 32. Código de MATLAB para el balance del suelo.

A.2 Balance en biochar

```
function dx = Balance_biochar(t,x,u)
% Definición de las variables de estado:
% W_bc = x(1); % Contenido de agua en el biochar, g H2O/m2 bc
% N_bc = x(2:7); % Contenido de nutriente en el biochar (N,K,P,Ca,Mg,S), mg/m2 bc
%% Entradas
% W_s = u; % Humedad del suelo, g H2O/m2
% u_W_bc = [1364 222750]; % Constante g/bc/m2 y g suelo/m2
%% Ecuaciones diferenciales
% dW_bc = A_b * (W_s - W_bc) + u_W_bc; % Biochar, g H2O/m2/d
% dN_bc = V_b * (N_bc - N_s); % Concentración de nutriente en el biochar mg/m2/d
dx = [dW_bc; dN_bc];
```

Figura 33. Código de MATLAB para el balance en el biochar.

A.3 Ecuaciones nutrientes y agua del biochar

```

function dH_bc = A_bc(x,u)
% u: g bc/m2
tau = 2 ; % Constante dinámica, día
H_satbc = 1.15; % Sería capacidad de campo del biochar o saturación de intraporos, g H2O/m2
H_bci = x(1); % Humedad del suelo, g H2O/m2
H_bc = x(2); % Humedad del biochar, g H2O/m2
if (H_bc - H_bci) <= 0 % H_bci es en la interfase (suelo) y H_bc en el biochar
dH_bc = -((H_bc - H_bci)*(H_satbc*u(2) - H_bc)/(H_satbc*u(2)))/tau ;
else
dH_bc = -(H_bc - H_bci)/tau; % g H2O/m2/día
end

function dN_bc = V_bc(t,x,u)
N_Nbc = x(1); %Concentración de nitrógeno en el biochar, mg de N/kg de biochar
N_Pbc = x(2); %Concentración de fósforo en el biochar, mg de P/kg de biochar
N_Kbc = x(3); %Concentración de potasio en el biochar, mg de K/kg de biochar
N_Mgbc = x(4); %Concentración de magnesio en el biochar, mg de Mg/kg de biochar
N_Cabc = x(5); %Concentración de calcio en el biochar, mg de Ca/kg de biochar
N_Sbc = x(6); %Concentración de azufre en el biochar, mg de S/kg de biochar

k = u(1); %Constante de tiempo en el cual se desarrolla la difusión, d^-1
xfN = u(2); %Concentración final de nitrógeno en el biochar, mg de N/kg de biochar
xfP = u(3) ; %Concentración final de fósforo en el biochar, mg de P/kg de biochar
xfK = u(4) ; %Concentración final de potasio en el biochar, mg de K/kg de biochar
xfMg = u(5) ; %Concentración final de magnesio en el biochar, mg de Mg/kg de biochar
xfCa = u(6) ; %Concentración final de calcio en el biochar, mg de Ca/kg de biochar
xfS = u(7) ; %Concentración final de azufre en el biochar, mg de S/kg de biochar

tau = 1/k;

dN_Nbc = -(N_Nbc-xfN)/tau ; %Concentración nitrógeno en biochar, mg de N/kg bc*d
dN_Pbc = -(N_Pbc-xfP)/tau ;
dN_Kbc = -(N_Kbc-xfK)/tau ;
dN_Mgbc = -(N_Mgbc-xfMg)/tau ;
dN_Cabc = -(N_Cabc-xfCa)/tau ;
dN_Sbc = -(N_Sbc-xfS)/tau ;

dN_bc = [dN_Nbc;dN_Pbc;dN_Kbc;dN_Mgbc;dN_Cabc;dN_Sbc] ;

```

Figura 34. Código de MATLAB para las ecuaciones que marcan el comportamiento del agua y nutrientes en el biochar.

A.4 Documento del main de MATLAB

```

close all
clear
clc

% Obtención de los estados en el punto de operación seleccionado.
% Valor porcentual de las entradas en el punto de operación.
u = [0] ; % [1; 9.3535366] ;

% Se resuelve el sistema en estado estacionario.
fun = @(t,x)Balancedesuelo2(t,x,u) ;
tspan = linspace(0,50,50) ;

% options = odeset('NonNegative',1);
x0 = [142517.9; 0; 6200 ; 0.17082 ; 1.8384 ; 0.403866 ; 0; 0.00 ; 200; 476; 6.404; 1.42; 8.273; 200; 0; 0; 0; 0; 0] ;
[t,x] = ode15s(fun,tspan,x0) ;

% Se definen los estados iniciales para simulink.
Ns = x(:,1) ; %Contenido agua inicial -CC- (g H2O/m2)
N_Ns = x(:,2) ; %Contenido nitrógeno inicial (mg/m2)
N_Ps = x(:,3) ; %Contenido fósforo inicial (mg/m2)
N_Ks = x(:,4) ; %Contenido potasio inicial (mg/m2)
N_Cas = x(:,5) ; %Contenido calcio inicial (mg/m2)
N_Mgs = x(:,6) ; %Contenido magnesio inicial (mg/m2)
N_Ss = x(:,7) ; %Contenido azufre inicial (mg/m2)

figure
plot(t,N_Ns,t,N_Ps,t,N_Ks,t,N_Cas,t,N_Mgs,t,N_Ss) ;
legend('Nitrógeno','Fósforo','Potasio','Calcio','Magnesio','Azufre')
ylabel('Contenido nutriente en suelo,(mg i/m2)')
xlabel('Tiempo,(d)')

figure
for i = 1:6
hold on
plot(t,x(:,15+i))
hold off
end
grid on
legend('Nitrógeno','Fósforo','Potasio','Calcio','Magnesio','Azufre')
xlabel('Tiempo,(d)')
ylabel('Absorción nutrientes,(mg i/m2)')

figure
for i = [ 8 15]
hold on
plot(t,x(:,i))
hold off
end
grid on
legend('Agua suelo','Agua biochar','Agua planta')
xlabel('Tiempo,(d)')
ylabel('Contenido agua,(g H2O/m2)')

```

Figura 35. Código de MATLAB para el documento central.

B Algunas cotizaciones

elvatron		ELVATRON S.A. Cédula Jurídica N° 3-101-020826-35 Tel.: 2242-9900 - Fax: 2220-0897 425 mts Norte de la Entrada Principal de la CNFL Costa Rica, San José, Central, La Uruca. www.elvatron.com		Cotización No. P26-A44J7 Versión: 1			
Asunto: Micro 820		Condición de venta: Contado		Página: 1 de 1			
Cliente: CONTADO		Vendedor: Jacob Monge		Cel: 89953336			
Dirección: SAN JOSE, COSTA RICA		Teléfono: 22429960 Ext. 302		Fecha de emisión: 10/08/2021			
Contacto: Ana Elena Quesada		Correo: jacob.monge@elvatron.com		Fecha de vencimiento: 18/08/2021			
C/T: anaelena1997@gmail.com/60766739							
LIN.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANT.	T.ENTREGA	PRECIO UNI.	TOTAL LÍNEA	
1	2080OW4I	MODULO PLUG IN, 4 SALIDAS A RELAY, MICRO800	1	06-07 SEMANAS	\$ 81.89	\$ 81.89	
2	2080REMLCD	LCD Display and Keypad	1	06-07 SEMANAS	\$ 176.87	\$ 176.87	
3	2080LC2020QWB	Controller, 12 24V DC Inputs, 4 configurable analog input with thermistor voltage reference out, 7 Relay Output, 1 Analog Output, Embedded Ethernet Port and RS-232/485 non-isolated Serial port, Embedded RTC, MicroSD Card support, 2 Plug-in slots	1	06-07 SEMANAS	\$ 302.43	\$ 302.43	
4	2080LC2020QBB	MICRO 820, 12 ENTRADAS 24VDC, 4 ENTRADAS ANALOGICAS 0 A 10V CONFIGURABLES (COMPARTIDAS CON LAS ENTRADAS DIGITALES), 7 SALIDAS A 24VDC (SOURCE), 1 SALIDA ANALOGA, PUERTO ETHERNET, RTC.	1	06-07 SEMANAS	\$ 302.43	\$ 302.43	
Notas:							
						SUB - TOTAL	\$ 863.62
						IVA	\$ 112.28
						TOTAL	\$ 975.90

Figura 36. Cotización equipos del sistema de control automático, empresa Elvatron.

COSELECTRICA S.A.	
Compañía de Servicios y Venta de Materiales Eléctricos Cedula Jurídica: 3-101-275858 200 metros al Sur y 50 metros al Este del Salón Comunal de Sucre, Ciudad Quesada, San Carlos	
COSELECTRICA COTI 0042-2021	
18 de agosto del 2021	
Sra. Ana Elena Quesada	
Estimada señora:	
Reciba un cordial saludo de nuestra empresa. Atendiendo su amable solicitud tenemos el agrado de cotizarle la construcción de la infraestructura necesaria para la electrificación del invernadero ubicado en Santiago de San Ramón.	
Consta de lo siguiente:	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Zanjero de 50 metros. ✓ Instalación de tuberías y línea eléctrica. ✓ Instalación de previstas para el invernadero. ✓ Instalación de breaker en caja de breaker ya establecida en propiedad adjunta. 	
Forma de pago: Contra obra terminada.	
Rubro de cobro	Valor
Materiales	€155 000,00
Mano de obra	€25 000,00
Subtotal	€180 000,00
Imprevistos	€9 000,00
Utilidad	€45 000,00
Total sin IVA	€234 000,00
Costo Total: €234 000,00 más I.V.A. (Doscientos treinta y cuatro mil colones más Impuesto de Valor Agregado).	
Tel 85503905	
Email: coselectricacr@gmail.com	

Figura 37. Cotización de los costos de la instalación eléctrica para el escenario 2, dada por la empresa Coselectrica.

 Taller Conejo Oscar Abanca Arroyo 2-0441-0122 800 metros sur de la bodega de la Coca Cola, Calle del Amor, C.Q. 24809012 taller-conejo@hotmail.com																													
PROFORMA No. 108																													
Cliente: ANA ELENA QUESADA SOLIS 2-0765-0208 (Físico) N/A	Fecha: 07/09/2021 2:29 p.m. Moneda: CRC Tipo Cambio: 1,00 Vigencia: 0 días																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Descripción</th> <th>Unidad</th> <th>Cantidad</th> <th>Precio</th> <th>Total</th> <th>Descuento</th> <th>% Exo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>00gen. Cocina en acero inoxidable</td> <td>Unid</td> <td>1,00</td> <td>400.000,00</td> <td>400.000,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00% 13% G</td> </tr> </tbody> </table> Adelanto de 250.000 al finalizar el trabajo su cancelación	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Total	Descuento	% Exo	00gen. Cocina en acero inoxidable	Unid	1,00	400.000,00	400.000,00	0,00	0,00% 13% G	<table border="1"> <tbody> <tr><td>Subtotal</td><td>Q400.000,00</td></tr> <tr><td>Descuento</td><td>Q0,00</td></tr> <tr><td>Exento</td><td>Q0,00</td></tr> <tr><td>Exonerado</td><td>Q0,00</td></tr> <tr><td>IVA</td><td>Q52.000,00</td></tr> <tr><td>Otros Cargos</td><td>Q0,00</td></tr> <tr><td>Total</td><td>Q452.000,00</td></tr> </tbody> </table>	Subtotal	Q400.000,00	Descuento	Q0,00	Exento	Q0,00	Exonerado	Q0,00	IVA	Q52.000,00	Otros Cargos	Q0,00	Total	Q452.000,00
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Total	Descuento	% Exo																							
00gen. Cocina en acero inoxidable	Unid	1,00	400.000,00	400.000,00	0,00	0,00% 13% G																							
Subtotal	Q400.000,00																												
Descuento	Q0,00																												
Exento	Q0,00																												
Exonerado	Q0,00																												
IVA	Q52.000,00																												
Otros Cargos	Q0,00																												
Total	Q452.000,00																												
	IVA 1% Q0,00 IVA 2% Q0,00 IVA 4% Q0,00 IVA 8% Q0,00 IVA 13% Q52.000,00 OTRO Q0,00																												

Figura 38. Cotización del carbonizador a un taller de soldadura.

C Fichas técnicas algunos equipos

Número de catálogo	Entradas			Salidas		
	120 VCA	24 VCC/VCA	Analógica de 0-10 V (compartida con 24 VCC)	Relé	24 VCC SRC	Analógica 0-10 V
2080-LC20-20QWB(R)	-	12	4	7	-	1
2080-LC20-20Q8B(R)	-	12	4	-	7	1
2080-LC20-20AWB(R)	8	4	4	7	-	1

Los bloques de terminales extraibles están disponibles en los módulos con números de catálogo que terminan en R. Los números de catálogo que no terminan en R tienen bloques de terminales fijos.

Micro820	20-pt QWB(R)	20-pt Q8B(R)	20-pt AWB(R)
Base			
Fuente de alimentación eléctrica	La base incorpora una fuente de alimentación eléctrica de 24 VCC. Externa opcional de 120/240 VCA a través de N° de cat. 2080-PS120-240VAC		
Puerto de programación base	Puerto Ethernet incorporado		
Puerto EtherNet/IP™ base	EtherNet/IP clase 3, Modbus TCP		
Puerto serial base	RS232/485 no aislado, CIP serial, Modbus RTU, ASCII		
Ranuras enchufables	2		
Salida de 10 V para termostatos	1 referencia de salida (admite hasta cuatro termostatos de 10 k)		
Salida de PWM	5 kHz		
Ranura para tarjetas microSD	1		
Formatos de tarjetas microSD compatibles	FAT32/16		
Tamaño de la tarjeta microSD, máx.	32 GB		
Velocidad de clase de la tarjeta microSD	SDSC y SDHC de clases 6 y 10		
E/S			
E/S (entrada/salida) digitales	12/7 (4 entradas compartidas con entradas analógicas)		
Canales de E/S analógicos	4/1		
Programación			
Software	Connected Components Workbench		
Pasos del programa (o instrucciones)	10 Ksteps		
Datos (bytes)	20 Kbytes (hasta 400 bytes no volátiles)		
Lenguajes IEC 61131-3	Diagrama de lógica de escalera, bloques de funciones, texto estructurado		
Bloques de funciones definidos por el usuario	Sí		
Instrucciones de control de movimiento	No se admite el movimiento PTO		
Matemática de punto flotante	32 bits y 64 bits		
Control en lazo PID	Sí		
Ambientes			
Certificaciones	c-UL-us CL1DIV2, CE, C-Tick, KC		
Rango de temperaturas (controlador)	-20 °C...65 °C		
Dimensiones (alto x ancho x profundidad, mm)	90 x 100 x 80		
Pantalla de cristal líquido			
Comunicaciones			
Puerto serial incorporado	RS232 (se conecta al puerto RS232 incorporado del controlador)		
Puerto USB incorporado	Puerto de programación del controlador (paso de USB a serial)		
Ambientales			
Rango de temperaturas (pantalla LCD)	0 °C...50 °C		
Dimensiones (alto x ancho x profundidad, mm)	97 x 130 x 36		
Módulos enchufables			
2080-IQ4	Entrada digital de 4 puntos, 12/24 VCC, drenador/surtidor, tipo 3		
2080-OB4	Salida digital de 4 puntos, 12/24 VCC, surtidor		
2080-OV4	Salida digital de 4 puntos, 12/24 VCC, drenador		
2080-OW4I	Salida de relé de 4 puntos, aislada individualmente, 2 A		
2080-IQ4OB4	Combinación de 8 puntos: Entrada digital de 4 puntos, 12/24 VCC, drenador/surtidor, tipo 3 y salida digital de 4 puntos, 12/24 VCC, surtidor		
2080-IQ4OV4	Combinación de 8 puntos: Entrada digital de 4 puntos, 12/24 VCC, drenador/surtidor, tipo 3 y salida digital de 4 puntos, 12/24 VCC, drenador		
2080-IF2, 2080-IF4	Entrada analógica de 24 canales, 0-20 mA, 0-10 V, 12 bits no aislados		
2080-OF2	Salida analógica de 2 canales, 0-20 mA, 0-10 V, 12 bits no aislados		
2080-SERIALISOL	Puerto serial aislado RS232/485		
2080-TRIMPOT6	Entrada analógica de potenciómetro de ajuste de 6 canales		
2080-RTD2	RTD de 2 canales, no aislado, ±1.0 °C		
2080-TC2	TC de 2 canales, no aislado, ±1.0 °C		
2080-MOT-HSC	Contador de alta velocidad, 250 kHz, receptor de línea diferencial, 1 salida digital		
2080-DNET20	Escáner DeviceNet, 20 nodos		
Accesorios			
2080-PS120-240VAC	Fuente de alimentación eléctrica de 120/240 VCA externa		
2080-REMLCD	Pantalla LCD remota de 3.5 pulg., alimentación de 24 VCC, 4 u 8 líneas de texto ASCII		

Figura 39. Ficha técnica del controlador marca Allen Bradley para el sistema de control automático.

Article Number	Description	Net weight	Electrical data under STC ¹⁾					
			Nom. Power		Max. Power		Open-Circuit	
			Volts	Watts	Volts	Watts	Voltage	Current
SPP040201200	20W-12V Poly 440 x 350 x 25mm series 4a	1.9	20	18.4	1.09	21.96	1.18	
SPP040301200	30W-12V Poly 555 x 350 x 25mm series 4a	2.8	30	18.2	1.66	21.80	1.80	
SPP040601200	45W-12V Poly 625 x 668 x 25mm series 4a	3.1	45	19.1	2.36	22.90	2.55	
SPP040901200	60W-12V Poly 545 x 668 x 25mm series 4a	4	60	18.3	3.12	23.10	3.37	
SPP041151200	90W-12V Poly 780 x 668 x 30mm series 4a	6.1	90	19.5	4.61	23.44	4.98	
SPP041751200	115W-12V Poly 1015 x 668 x 30mm series 4a	8	115	18.94	6.08	22.73	6.56	
SPP042602000	260W-20V Poly 1640 x 992 x 40mm series 3a	12	175	18.3	9.56	21.9	10.24	
SPP042702000	270W-20V Poly 1640 x 992 x 35mm series 4a	17	260	30	8.66	36.75	9.30	
SPP043302400	330W-24V Poly 1956 x 992 x 40mm series 4a	18.4	270	31.7	8.52	38.04	9.21	
SPP043302400	330W-24V Poly 1956 x 992 x 40mm series 4a	22.5	330	37.3	8.86	44.72	9.57	

Module	SPP 040201200	SPP 040301200	SPP 040601200	SPP 040901200	SPP 041151200	SPP 041751200	SPP 042602000	SPP 042702000	SPP 043302400
Nominal Power (± 3% tolerance)	20W	30W	45W	60W	90W	115W	175W	260W	330W
Cell type	Polycrystalline								
Number of cells in series	36			60			72		
Maximum system voltage (V)	1000V								
Temperature coefficient of PMP (°C)	-0.45°C	-0.45°C	-0.45°C	-0.45°C	-0.45°C	-0.45°C	-0.45°C	-0.45°C	-0.45°C
Temperature coefficient of Isc (°C)	-0.35°C	-0.35°C	-0.35°C	-0.35°C	-0.35°C	-0.35°C	-0.35°C	-0.34°C	-0.35°C
Temperature coefficient of Voc (°C)	+0.04°C	+0.04°C	+0.04°C	+0.04°C	+0.04°C	+0.04°C	+0.04°C	+0.04°C	+0.04°C
Temperature Range	-40°C to +85°C								
Surface Maximum Load Capacity	200 kg/m ²								
Allowable Hail Load	23 m/s, 7.53 g								
Junction Box Type	PV-L1000S	PV-L1000S			PV-L10001	PV-L1000S		PV-B002	
Length of Cable / connector	No cable				900 mm / MC4				
Output tolerance	± 3%								
Frame	Aluminium								
Product warranty	5 years								
Warranty on electrical performance	10 years 90% + 25 years 80% of power output								
Smallest packaging unit	1 panel								
Quantity per pallet	380	240	180	140	90	80	36	20	32

1) STC (Standard Test Conditions): 1000 W/m², 25°C, AM (Air Mass) 1.5

Figura 40. Ficha técnica del panel solar utilizado para el sistema fotovoltaico.

SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO WATERMARK® - MODELO 200SS

IRROMETER®

Sensor WATERMARK® Modelo 200SS
mostrado aquí en tamaño real

Patente de EE.UU. No. 7.705.616

Especificaciones -
MATERIALES: Tapas de plástico ABS con cuerpo de acero inoxidable sobre una matriz granular cubierta con tela hidrófoba.
DIMENSIONES - DIÁMETRO: 22 mm (0.875 in.)
LONGITUD: 83 mm (3.25 in.)
PESO: .067 kg (.147 lb.)
- con cable de 5 pies
CABLES CONDUCTORES: AWG 20, 2 terminales
GARANTÍA: Un año
INFORMACIÓN PARA PEDIDOS: Catálogo #200SS
CABLES DE LONGITUD ESTÁNDAR: -5 = 1.5 m (5 ft),
-15 = 4.5 m (15 ft) -> - , - , = longitud a medida.
Catálogo #200SS-X - sin cables.
Sensores WATERMARK se envían en granel al menos que se especifique de estar en envases al por menor (por agragar -PKG).

En uso desde 1978, el patentado sensor WATERMARK® es un dispositivo de detección de resistencia eléctrica en estado sólido que se utiliza para medir la tensión de agua del suelo. A medida que cambia la tensión con el contenido de agua la resistencia también cambia. Esta resistencia puede medirse con el sensor WATERMARK®.

El sensor consiste en un par de electrodos de alta resistencia a la corrosión que están incrustados en una matriz granular. Una corriente es aplicada al WATERMARK para obtener un valor de resistencia. El medidor o monitor WATERMARK® correlaciona la resistencia a centibares (cb) o kilopascalas (kPa) de tensión de agua del suelo.

El WATERMARK® está diseñado para ser un sensor permanente, colocado en el suelo para ser monitoreado y "leído" tantas veces como sea necesario con un dispositivo portátil o fijo. El yeso instalado internamente proporciona alguna compensación para el efecto de los niveles de salinidad encontrados normalmente en los cultivos agrícolas y de jardinería.

Características:

- Calibración estable comprobada
- Rango de medición de 0 a 239 cb (kPa)
- Totalmente estado sólido
- No se disuelve en el suelo
- No es afectado por bajas temperaturas
- Compensado internamente para los niveles de salinidad encontrados comúnmente
- Económico, fácil de instalar y usar
- Compatible con dispositivos de lectura de AC o DC (requiere circuito especializado)
- No requiere mantenimiento

APLICACIONES INCLUYEN -

- Programación de Riego • Monitoreo del Nivel del Suelo
- Investigación Agronómica • Monitoreo Ambiental • Detección de fugas
- En cualquier lugar donde usted necesite saber cuándo o si el estado de humedad del suelo está cambiando



Figura 41. Ficha técnica del sensor de humedad Watermark que se utilizará en el sistema.

BlueSolar Charge Controllers
MPPT 75/10, 75/15, 100/15, 100/20 & 100/20-48V




Solar Charge Controller
MPPT 75/15

Ultra-fast Maximum Power Point Tracking (MPPT)
Especially in case of a clouded sky, when light intensity is changing continuously, an ultra-fast MPPT controller will improve energy harvest by up to 30% compared to PWM charge controllers and by up to 10% compared to slower MPPT controllers.

Load output
Over-discharge of the battery can be prevented by connecting all loads to the load output. The load output will disconnect the load when the battery has been discharged to a pre-set voltage. Alternatively, an intelligent battery management algorithm can be chosen: see Battery Life. The load output is short circuit proof. Some loads (especially inverters) can best be connected directly to the battery, and the inverter remote control connected to the load output. A special interface cable may be needed, please see the manual.

Battery Life: Intelligent battery management
When a solar charge controller is not able to recharge the battery to its full capacity within one day, the result is often that the battery will continually be cycled between a 'partially charged' state and the 'end of discharge' state. This mode of operation (no regular full recharge) will destroy a lead-acid battery within weeks or months. The Battery Life algorithm will monitor the state of charge of the battery and, if needed, day by day slightly increase the load disconnect level (i.e. disconnect the load earlier) until the harvested solar energy is sufficient to recharge the battery to nearly the full 100%. From that point onwards the load disconnect level will be modulated so that a nearly 100% recharge is achieved about once every week.

Programmable battery charge algorithm
See the software section on our website for details.

Day/night timing and light dimming option
See the software section on our website for details.

Programming, real-time data and history display options

- Color Control GX or other GX devices: see the **Venus** documents on our website.
- A smartphone or other Bluetooth-enabled device: VE.Direct Bluetooth Smart dongle needed.

BlueSolar Charge Controller	MPPT 75/10	MPPT 75/15	MPPT 100/15	MPPT 100/20	MPPT 100/20-48V
Battery voltage (auto select)	12/24V				
Rated charge current	10A	15A	15A	20A	20A
Nominal PV power, 12V 1a.b.i	145W	220W	220W	290W	290W
Nominal PV power, 24V 1a.b.i	290W	440W	440W	580W	580W
Nominal PV power, 48V 1a.b.i	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1160W
Max. PV short circuit current 3)	13A	15A	15A	20A	20A
Automatic load disconnect	Yes				
Max. PV open circuit voltage	75V		100V		
Peak efficiency	98%				
Self-consumption	12V: 25 mA 24V: 15 mA		25 / 15 / 10 mA		
Charge voltage 'absorption'	14.4V / 28.8V (adjustable)				
Charge voltage 'float'	13.8V / 27.6V (adjustable)				
Charge algorithm	multi-stage adaptive				
Temperature compensation	-16 mV / °C resp. -32 mV / °C				
Max. continuous load current	15A				
Low voltage load disconnect	11.1V / 22.2V / 44.4V or 11.8V / 23.6V / 47.2V or Battery Life algorithm				
Low voltage load reconnect	13.1V / 26.2V / 52.4V or 14V / 28V / 56V or Battery Life algorithm				
Protection	Output short circuit / Over temperature				
Operating temperature	-35 to +60°C (full rated output up to 40°C)				
Humidity	95% non-condensing				
Data communication port	VE.Direct (see the data communication white paper on our website)				

Figura 42. Ficha técnica del regulador de carga marca Victron utilizado para el sistema fotovoltaico.