



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
IRRIGACIÓN INTELIGENTE EN LA HACIENDA COCHICARANQUI
UBICADA EN EL CANTÓN IBARRA”**

AUTOR:

FIERRO CHACÓN, ANDRÉS JULIAN

DIRECTOR:

ING. TORRES TELLO, JULIO WLADIMIR

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE IRRIGACIÓN INTELIGENTE EN LA HACIENDA COCHICARANQUI UBICADA EN EL CANTÓN IBARRA**” fue realizado por el señor **FIERRO CHACÓN ANDRÉS JULIAN** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, febrero del 2018

Ing. Julio Wladimir Torres Tello

C.C: 1716840390



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **FIERRO CHACÓN ANDRÉS JULIAN**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE IRRIGACIÓN INTELIGENTE EN LA HACIENDA COCHICARANQUI UBICADA EN EL CANTÓN IBARRA**” es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, febrero del 2018

Andrés Julian Fierro Chacón

C.I: 1003486824



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Yo, **FIERRO CHACÓN, ANDRÉS JULIAN**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE IRRIGACIÓN INTELIGENTE EN LA HACIENDA COCHICARANQUI UBICADA EN EL CANTÓN IBARRA**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, febrero del 2018

Andrés Julian Fierro Chacón

C.I: 1003486824

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, que es el pilar fundamental en mi vida, por permitirme cumplir esta meta de ser un profesional, que confiando en él todo es posible.

A mis padres Sandra y Víctor por haberme guiado a lo largo de mi carrera como estudiante, brindándome su confianza, consejos y amor. Por todo su esfuerzo para que llegue a ser un profesional, por sentir su compañía a pesar de la distancia y sobre todo por su apoyo incondicional.

A mis hermanos por brindarme su compañía y darme ánimos para continuar y por su cariño sincero.

A toda mi familia, abuelitas, tíos y primos por estar siempre unidos y poder contar siempre con ellos, por sus mejores deseos y preocupaciones.

A Gaby, por ser la mejor persona que he conocido, por confiar en mí, por su gran sentido del humor que en momentos difíciles me hacía ver la vida de otro modo y por hacerme una mejor persona.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la vida y la salud, por tantas bendiciones a lo largo de mi carrera en la universidad, por darme la fuerza y sabiduría para continuar cada día y por haberme dado a la mejor familia del mundo.

A toda mi familia, abuelitas, tíos, tías, primos y primas por siempre apoyarme, darme aliento y confiar en mí.

A mis padres Sandra y Víctor por todas sus enseñanzas de la vida, por sus consejos, apoyo y confianza total para ser cada día una mejor persona, por su gran responsabilidad conmigo y mis hermanos, por ser los mejores padres del mundo.

A mis hermanos por siempre estar ahí, por su cariño, por compartir alegrías conmigo y por su gran apoyo.

A Gaby, por apoyarme siempre, por darme fuerzas en los momentos más difíciles, por confiar en mí, por tantas risas y alegrías, por estar siempre cuando la necesitaba, por sus consejos, por su cariño y amor verdadero.

A todos mis amigos dentro y fuera de la universidad por su apoyo y su amistad.

A todos mis profesores por compartir sus conocimientos conmigo y por corregirme para ayudarme a ser un mejor estudiante y profesional.

Al ingeniero Julio Torres por todo su apoyo, guía, enseñanzas, por darle tiempo y dedicación para que este proyecto se desarrolle de la mejor manera.

Al señor Pablo Escudero por abrirme las puertas y facilitarme realizar el trabajo en su hacienda.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia	4
1.3 Resumen general del proyecto	5
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo General.....	9
1.4.2 Objetivos Específicos	9
1.5 Descripción general del proyecto.....	10
1.5.1 Capítulo I – Introducción.....	10

1.5.2	Capítulo II – Marco teórico	10
1.5.3	Capítulo III – Diseño del sistema agronómico	11
1.5.4	Capítulo IV – Desarrollo del sistema de irrigación inteligente	11
1.5.5	Capítulo V – Implementación del sistema.....	12
1.5.6	Capítulo VI – Pruebas y resultados	12
1.5.7	Capítulo VII – Conclusiones y recomendaciones.....	12
CAPITULO II.....		13
MARCO TEÓRICO		13
2.1	Introducción	13
2.2	Revisión de la normativa legal sobre recursos hídricos, uso del agua y riego	13
2.3	Sistemas de Riego	17
2.3.1	Riego por Aspersión	20
2.3.2	Riego por Gravedad.....	21
2.3.3	Riego Localizado	23
2.4	Componentes típicos de un sistema de riego	25
2.5	Estaciones Meteorológicas aplicadas en sistemas de riego automáticos	29
2.6	Tecnologías y automatización en sistemas de riego	31
2.7	Lógica difusa en la Agricultura.....	34
2.8	Irrigación inteligente	35
CAPITULO III.....		39
DISEÑO DEL SISTEMA AGRONÓMICO		39

3.1	Introducción	39
3.2	Datos climáticos	39
3.3	Cálculo de las necesidades netas de riego máximas	41
3.3.1	Cálculo de la precipitación confiable	41
3.3.2	Cálculo de la precipitación efectiva.....	43
3.3.3	Obtención de los datos de cultivo necesarios para dibujar las curvas del factor del coeficiente del cultivo (Kc).....	44
3.3.4	Cálculo de la Evapotranspiración del cultivo (ETC)y de las necesidades netas de riego máximas (N_m).....	45
3.4	Cálculo de los parámetros de riego	48
3.4.1	Datos del suelo.....	48
3.4.2	Profundidad efectiva de las raíces (Pr)	48
3.4.3	Cálculo del agua utilizable.....	48
3.4.4	Dosis neta de riego (Dn).....	49
3.4.5	Máximo intervalo entre riegos.....	49
3.4.6	Dosis neta ajustada (Dn_{aj})	50
3.4.7	Dosis bruta de riego (Db)	50
3.5	Elección del sistema hidroneumático y elementos de riego.....	51
	CAPITULO IV	58
	DESARROLLO DEL SISTEMA DE IRRIGACIÓN INTELIGENTE.....	58
5.1	Introducción	58

5.2	Diagrama de bloques del controlador	58
5.3	Diseño y creación de la Estación Meteorológica	59
5.4	Estudio de los sensores utilizados	62
5.4.1	Sensor de Temperatura	62
5.4.2	Sensor Humedad Relativa	64
5.4.3	Sensor de Radiación Solar	66
5.4.4	Sensor de Lluvia	68
5.4.5	Sensor de Humedad	70
5.5	Estudio de las variables de la Estación Meteorológica	71
5.6	Desarrollo de la lógica de Control	74
5.6.1	Diseño de la lógica difusa para rededir el cielo predominante	74
5.6.2	Diseño del Controlador de riego.....	85
5.7	Diseño de la Interfaz Gráfica	89
CAPITULO V		92
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA		92
6.1	Introducción	92
6.2	Elementos de riego.....	92
6.3	Instalación del sistema de irrigación inteligente	94
6.3.1	Montaje cabezal de riego	94
6.3.2	Montaje de la red de conducción y distribución.....	96
6.3.3	Montaje de los emisores	100

6.3.4	Montaje de los sensores de campo.....	102
6.3.5	Montaje de la estación meteorológica	102
CAPITULO VI		105
PRUEBAS Y RESULTADOS		105
7.1	Introducción	105
7.2	Pruebas de funcionamiento del sistema de predicción basado en lógica difusa	105
7.3	Pruebas de funcionamiento de la Interfaz gráfica	114
7.4	Pruebas y resultados del funcionamiento total del sistema de irrigación inteligente....	116
7.5	Resultados del sistema de irrigación inteligente	116
CAPITULO VII.....		120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		120
7.6	Conclusiones	120
7.7	Recomendaciones.....	122
BIBLIOGRAFÍA		124
ANEXOS		129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Precipitación mensual en el 2017</i>	41
Tabla 2 <i>Estimación de valores del índice de precipitación (I_p)</i>	42
Tabla 3 <i>Datos de precipitaciones</i>	43
Tabla 4 <i>Precipitaciones en un año</i>	44
Tabla 5 <i>Datos del cultivo de Fréjol</i>	45
Tabla 6 <i>Cálculo de las necesidades netas de riego máximas</i>	47
Tabla 7 <i>Temperatura vs Valor sensor</i>	73
Tabla 8 <i>Humedad relativa vs valor del sensor</i>	73
Tabla 9 <i>Velocidad del viento vs valor del sensor</i>	73
Tabla 10 <i>Radiación solar vs valor del sensor</i>	74
Tabla 11 <i>Ejemplo determinación rango de valores lingüísticos</i>	77
Tabla 12 <i>Valores lingüísticos para las variables de entrada</i>	78
Tabla 13 <i>Valores lingüísticos para la variable de salida</i>	79
Tabla 14 <i>Rango de Valores lingüísticos en valor digital</i>	79
Tabla 15 <i>Condiciones de riego</i>	83
Tabla 16 <i>Reglas del sistema de predicción de cielo predominante</i>	84
Tabla 17 <i>Objetos de la Interfaz Gráfica</i>	90
Tabla 18 <i>Elementos del sistema de riego por goteo</i>	92
Tabla 19 <i>Parámetros de simulación del controlador difuso</i>	106
Tabla 20 <i>Comparación de variables climáticas</i>	110
Tabla 21 <i>Comparación de cielo predominante</i>	112

Tabla 22 <i>Pruebas de funcionamiento de la Interfaz gráfica</i>	115
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Propuesta inicial del sistema de irrigación inteligente.	8
<i>Figura 2</i> Propuesta final del sistema de irrigación inteligente.	9
<i>Figura 3</i> Uniformidad de aplicación de agua de riego.	18
<i>Figura 4</i> Aspersor de impacto.	20
<i>Figura 5</i> Riego por gravedad.	21
<i>Figura 6</i> Riego Localizado (Goteo)	24
<i>Figura 7</i> Ejemplo de Cabezal de Riego.	26
<i>Figura 8</i> Conexión de tubería secundaria a tubería terciaria.	27
<i>Figura 9</i> Emisores de riego (goteros).	28
<i>Figura 10</i> Medición de microclimas del proyecto Life HAGAR.	32
<i>Figura 11</i> Estimación de ET_0 mediante el Software CROPWAT.	40
<i>Figura 12</i> Curva del K_C	46
<i>Figura 13</i> Niveles de presión en el tanque hidroneumático.	52
<i>Figura 14</i> Bomba Barnes de 1HP.	53
<i>Figura 15</i> Tanque marca PTK de 24 litros.	53
<i>Figura 16</i> Interruptor de presión.	54
<i>Figura 17</i> Válvula antirretorno para sistemas de riego.	54
<i>Figura 18</i> Tubería y codos de PVC.	55
<i>Figura 19</i> Manguera de polietileno.	56
<i>Figura 20</i> Manguera con gotero autocompensado.	57
<i>Figura 21</i> Ilustración del Campo experimental.	57

<i>Figura 22</i> Sistema de control para el sistema de irrigación inteligente	59
<i>Figura 23</i> Modelo garita de Stevenson	61
<i>Figura 24</i> Dimensiones garita de Stevenson	62
<i>Figura 25</i> Sensor de temperatura LM35	63
<i>Figura 26</i> Sensor de humedad HIH-4030	64
<i>Figura 27</i> Salida típica de voltaje vs humedad relativa	65
<i>Figura 28</i> Sensor de radiación solar ML8511	66
<i>Figura 29</i> Salida Voltaje vs Intensidad UV	67
<i>Figura 30</i> Sensor de lluvia FC-37	69
<i>Figura 31</i> Sensor de humedad FC-28.....	70
<i>Figura 32</i> Definición de variables de entrada y salida	76
<i>Figura 33</i> Funciones de Membresía para Humedad	81
<i>Figura 34</i> Funciones de membresía para Temperatura	81
<i>Figura 35</i> Función de membresía para Radiación Solar	81
<i>Figura 36</i> Funciones de membresía para Velocidad del viento	82
<i>Figura 37</i> Funciones de membresía Cielo Predominante	82
<i>Figura 38</i> Diagrama flujo del funcionamiento del sistema.....	87
<i>Figura 39</i> Controlador de riego.....	88
<i>Figura 40</i> Interfaz gráfica del sistema de irrigación inteligente	91
<i>Figura 41</i> Sistema hidroneumático	94
<i>Figura 42</i> Conexión sistema hidroneumático con fuente de agua y válvula anti-retorno.....	95
<i>Figura 43</i> Electroválvula y filtro.....	96
<i>Figura 44</i> Cabezal de riego	96

<i>Figura 45</i> Conexión tubos PVC hacia manguera de polietileno	97
<i>Figura 46</i> Iniciales manguera de polietileno	98
<i>Figura 47</i> Manguera de polietileno, perpendicular a las camas	98
<i>Figura 48</i> Enterramiento de manguera de polietileno	99
<i>Figura 49</i> Final de manguera	99
<i>Figura 50</i> Conector dentado Manguera de goteo	100
<i>Figura 51</i> Emisores o goteros autocompensados	100
<i>Figura 52</i> Finales de manguera	101
<i>Figura 53</i> Montaje manguera de goteo	101
<i>Figura 54</i> Colocación del sensor de humedad	102
<i>Figura 55</i> Estación meteorológica con abrigo tipo Stevenson	103
<i>Figura 56</i> Controlador y sensores	104
<i>Figura 57</i> Relé y transformador para activación de electroválvula	104
<i>Figura 58</i> Simulación 1	106
<i>Figura 59</i> Simulación 2	107
<i>Figura 60</i> Simulación 3	108
<i>Figura 61</i> Simulación 4	109
<i>Figura 62</i> Evaluación de la textura del suelo por el tacto según Ilaco	129
<i>Figura 63</i> Resumen de las propiedades físicas del suelo	131
<i>Figura 64</i> Profundidad efectiva de los cultivos más comunes	132
<i>Figura 65</i> Déficit permitido de manejo del riego (DPM, %) para algunos cultivos	134

RESUMEN

La correcta utilización de agua para riego ha llevado al desarrollo de diferentes sistemas tecnológicos. Uno de estos sistemas es el automático que determina el riego según tiempos programados. El problema de estos sistemas es que no consideran las cantidades reales de agua que necesita el cultivo y las variables meteorológicas que influyen en el desarrollo de los cultivos. Una alternativa al uso de sistemas automáticos es el uso de sistemas de irrigación inteligente los cuales se enfocan en la dosificación real de agua necesaria para los cultivos y no en la que se cree que necesita. En el desarrollo del presente proyecto se realiza el diseño y la implementación de un sistema de irrigación inteligente para la hacienda Cochicaranqui, mediante el sensado de la humedad del suelo y de variables meteorológicas. La información de las variables meteorológicas formará parte de un control inteligente el cual junto con la humedad medida en el suelo controlan el paso de agua para riego en el cultivo determinado por el controlador de riego, la información más relevante se muestra en una interfaz gráfica. La cantidad de agua necesaria para cada cultivo se la determinará mediante un diseño agronómico. Con la implementación del sistema de irrigación inteligente se estima un ahorro aproximado de agua del 68% frente a un sistema de riego por gravedad. Además, será utilizado como aporte para el proyecto de vinculación EE-GPN-0001-2017.

Palabras clave. -

- **IRRIGACIÓN INTELIGENTE**
- **CONTROLADOR DE RIEGO**
- **AHORRO DE AGUA**

ABSTRACT

The correct use of water for irrigation has led to the development of different technological systems. One of these systems is the automatic that determines the irrigation according to programmed times. The problem with these systems is that they do not consider the actual amounts of water needed by the crop and the meteorological variables that influence the development of crops. An alternative to the use of automatic systems is the use of intelligent irrigation systems which focus on the actual dosage of water necessary for the crops and not the one that is believed to be needed. In the development of this project, the design and implementation of an intelligent irrigation system for the Cochicaranqui farm is carried out, by sensing soil moisture and meteorological variables. The information of the meteorological variables will be part of an intelligent control which together with the humidity measured in the soil control the passage of water for irrigation in the crop determined by the irrigation controller, the most relevant information is shown in a graphical interface. The amount of water needed for each crop will be determined by an agronomic design. With the implementation of the intelligent irrigation system, an estimated water saving of 68% is estimated in relation to a gravity irrigation system. It will also be used as a contribution for the EE-GPN-0001-2017 community based project.

Keywords. -

- **INTELLIGENT IRRIGATION**
- **IRRIGATION CONTROLLER**
- **SAVING WATER**

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La gestión del riego es un complejo proceso de toma de múltiples decisiones de los agricultores los cuales determinan cuándo y qué cantidad de agua es necesaria para un cultivo. (Tummala & Nallapati, 2014).

El riego es la actividad con mayor consumo de agua a nivel mundial, bordeando el 80% del agua destinada a todos los usos. En general, a pesar de que el Ecuador aún gozamos con un buen nivel de recursos hídricos, es necesario el enfoque técnico a este tema, ya que cada vez se hace más notorio el cambio en las fuentes de captación, producto del calentamiento global (Maldonado Pineda, 2015). El riego agrícola aún se lo realiza de una forma manual/ mecánica, donde no se toma en cuenta variables reales que permitan conocer la cantidad necesaria en un cultivo. Con el avance de la tecnología se ha podido crear sistemas de riego inteligentes que reemplacen a los sistemas convencionales.

Un Sistema de Riego Inteligente (S.R.I.) es un sistema que se enfoca en el ahorro de agua y energía, surtiendo a la planta del agua que necesita y no de la que el hombre cree necesaria (Muñoz Arcentales, Calero Bravo, & Marín García, 2014). El uso de sistemas inteligentes en la agricultura hace posible el ahorro de agua de hasta un 60% del consumo total, de igual forma se limita el consumo de energía eléctrica y al tener un control de las diferentes variables medioambientales se obtiene una mayor calidad en el producto final (Morales Machado, 2016).

Las variables de humedad y temperatura tanto del suelo como de factores climáticos influyen directamente en la cantidad de agua necesaria para el crecimiento y desarrollo de la planta ya que se evitará el estrés hídrico el cual contribuye a la pérdida de potencial de rendimiento del cultivo. Cuando un cultivo joven tiene poca agua su primera reacción es cerrar sus poros en las superficies verdes los cuales son los encargados de permitir la entrada de dióxido de carbono, al estar cerrados no se produce la fotosíntesis afectando directamente al crecimiento, en caso de granos se obtienen granos arrugados y pequeños y en caso de hortalizas las hojas serán más pequeñas (Gómez Macpherson, s.f.).

Un sistema de riego inteligente debe ser capaz de interpretar diferentes factores edáficos tales como humedad y temperatura, variables meteorológicas y además el tipo de cultivo, las cuales permiten gestionar eficientemente la cantidad y el momento indicado o períodos para el riego de agua en el cultivo, manejado en tiempo real. El uso de una estación meteorológica en el diseño de un sistema de irrigación inteligente es de gran ayuda ya que un cambio brusco de temperatura no anticipada puede significar la diferencia entre una buena y una mala cosecha, determinando cuando regar o no el cultivo (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2017).

Actualmente existe tecnología disponible para programar el riego usando un análisis real de factores tales como tiempo, etapa de crecimiento del cultivo, estrés de agua deseado en la planta, aireación del suelo, potencial de agua y salinidad del suelo (Goyal, 2006). La automatización de los sistemas de riego en viveros facilita un buen manejo del agua, reduce el empleo de mano de obra, evita el error humano y garantiza una mayor eficiencia (Mendoza, Gruber , & Lugo, 2010). Otra tecnología disponible para el diseño de un sistema de riego inteligente es SmartDust, la cual consiste en una red inalámbrica de minúsculos sensores (WSN), los cuales detectan señales de temperatura, humedad, etc. que aplicados a la agricultura resultan ideales para los procesos de riego

inteligente en un cultivo, resaltando que este sistema tiene como una de sus características principales el bajo consumo de energía (O'Connor , Baeumner, & Laban, 2005).

La irrigación inteligente basada en un control difuso es otra técnica que ayuda a resolver problemas que incluyen la pérdida de fertilidad del suelo y pérdida de recursos hídricos en la producción del suelo, tomando en cuenta el contenido de humedad en el suelo (Gao, 2013). El control difuso puede ayudar a determinar mejor la optimización de agua para riego, ya que las condiciones determinantes del tiempo no tienen valores nítidos o fijos, por ejemplo, según la nubosidad, la planta tendrá más o menos percepción solar lo que se traduce en necesidad de agua. La nubosidad no se puede medir como un número, es más natural medirla de forma difusa: muy nublado, poco nublado, etc (Guijarro, Sistema de Riego Inteligente Borroso, 2007).

En este proyecto de titulación se plantea el diseño e implementación de un sistema de irrigación inteligente con el fin de realizar un riego eficiente de agua en cultivos, considerando el consumo de energía que demanda esta actividad. Para lograr este propósito se desarrolló un control basado en lógica difusa para determinar el cielo predominante en la zona mediante el estudio de parámetros meteorológicos, y además se tomó en cuenta las variables de humedad del suelo y lluvia con el fin de determinar las necesidades reales de agua de cada cultivo y así generar el riego en los momentos justos. El proyecto fue realizado para la hacienda Cochicaranqui, la cual es una hacienda agrícola dedicada al cultivo de hortalizas, legumbres y pasto, además se realiza la producción de leche cruda destinada a diferentes proveedores. La implementación del sistema de irrigación inteligente ayudaría a la hacienda a observar una optimización en cuanto al uso de agua y mano de obra necesaria para la acción de riego, además se buscó que los cultivos tengan mayor calidad o desarrollo en el tiempo adecuado.

1.2 Justificación e Importancia

El riego es el uso que más agua demanda a nivel mundial, cerca del 80% del agua es usada para este propósito. En Ecuador la mayor parte de agua proviene de recursos superficiales, su distribución es de 82% para riego, 12% para uso doméstico y 6% para uso industrial (Pazmiño, 2013). Al ser Ecuador un país en el cual la mayor demanda de agua es en el campo agrícola (MAGAP, 2016), es necesario obtener una mayor eficiencia en cuanto al consumo de agua en este sector productivo. Esta mayor eficiencia se puede conseguir aplicando diferentes técnicas y métodos que aporten al cumplimiento de este objetivo. Una de ellas es la irrigación inteligente, que aporta sustancialmente al ahorro de agua, ahorro de energía y además aporta a una mejor calidad de los diferentes productos cultivados.

El desarrollo del sistema de irrigación inteligente para la hacienda Cochicaranqui inicialmente fue pensado para la aplicación en cultivos de rábano y lechuga, pero debido a que estos cultivos necesitan de muy poca cantidad de agua para su desarrollo, un tiempo de cosecha menor que sumado al inicio de la época de invierno, hacen que prácticamente no necesiten riego para su desarrollo durante la época de invierno. Es por esto que se optó por cambiar la implementación del sistema al cultivo de fréjol, ya que este cultivo demanda más cantidad de agua que los cultivos mencionados anteriormente y además el tiempo de cultivo es mayor con lo cual se puede realizar de mejor manera pruebas de funcionamiento del sistema de irrigación inteligente, tomando en cuenta que una excesiva cantidad de agua de riego en los cultivos hacen que estos disminuyan su crecimiento y pierdan su calidad o rendimiento (Gómez Macpherson, s.f.). Además, existirá menos mano de obra encargada de realizar acequias para el riego por parcelas, ya que actualmente para realizar el proceso del riego se necesita de 5 personas las cuales son encargadas de realizar las

parcelas para la conducción del agua y abrir o cerrar el paso de agua desde la acequia hacia los cultivos sin tomar en cuenta un tiempo determinado y peor aún la necesidad real de agua que necesitan los cultivos y si las variables meteorológicas son las adecuadas para el riego. También este ahorro de agua en la hacienda ayudará a que más productores agrícolas dentro de esta área rural puedan acceder a este recurso hídrico proveniente del río Tahuando.

La realización de este proyecto permite promover en el país la implementación de sistemas de irrigación inteligente con el objetivo de garantizar un correcto uso del agua obteniendo un mayor aprovechamiento agrícola, mejor calidad de productos, mayor desarrollo productivo de pequeños y medianos agricultores y ahorro de energía, impulsando la gestión ambiental en cuanto al uso de agua para la producción agrícola.

Además, este proyecto apunta a uno de los objetivos del proyecto de vinculación EE-GPN-0001-2017 “Mejora de las condiciones de producción agrícola en cultivos de mora, propensos a ser afectados por heladas, en la comunidad de Misquillí”, ubicado en la provincia de Tungurahua, ya que aportará al diseño de tipo riego más adecuado y como determinar la cantidad necesaria de agua para la mejora de la producción agrícola utilizando un sistema de irrigación inteligente previniendo las heladas y generando ahorro de agua.

1.3 Resumen general del proyecto

El proyecto fue orientado a la implementación de un sistema de irrigación inteligente que permita controlar mediante sensores y actuadores, el riego de agua a diferentes sectores o tipos de cultivo en la Hacienda Cochicaranqui.

El uso de hardware y software montados en campo permite un mayor control y monitoreo del sistema de irrigación, contando con una interfaz gráfica para la visualización y supervisión de este, que sea amigable con el usuario.

Para el desarrollo del proyecto el controlador elegido fue una tarjeta STM32F4 con microcontrolador basado en ARM Cortex M4. Se optó por el uso únicamente de sensores de humedad en el suelo ya que la temperatura está relacionada con la humedad. En cuanto a los sensores de la estación meteorológica se utilizó el sensor de humedad relativa, sensor de temperatura, radiación solar y un anemómetro, esto debido a que las variables medidas de estos sensores son las más importantes las cuales forman parte de la Lógica Difusa determinando el cielo predominante de la zona.

Las variables medidas fueron la humedad del suelo, temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. La variable de control es el caudal de agua, controlado por la electroválvula las cuales se abren para dejar pasar agua, cantidad determinada por la lógica de control cumpliendo con el diseño agronómico el cual determina la cantidad de agua que necesitan los diferentes tipos de plantas. Además, los datos y funcionamiento del sistema se pudieron visualizar en una interfaz gráfica la cual permite al agricultor conocer el funcionamiento del sistema de riego en tiempo real.

Es importante considerar que un sistema de riego al determinar la cantidad de agua necesaria en los momentos justos, considerando diferentes parámetros tanto del suelo como del ambiente, se convierte en un sistema de riego Inteligente, a diferencia de un control de riego automático donde sólo se toma en cuenta la variable de tiempo para dosificar de agua al cultivo durante períodos definidos de tiempo sin considerar si en verdad el cultivo necesita de agua.

El acceso al agua se tiene garantizado gracias a un sistema de canales de agua proveniente de del río Tahuando, ubicado a 15 metros del campo experimental, además se cuenta con un pozo para

almacenamiento del agua en caso de sequías. La precipitación en verano es aproximadamente de 48mm con temperaturas entre 10 °C y 25 °C (<http://freemeteo.com.ec>). Para evitar la sobre-humectación del suelo debido a las precipitaciones el sistema determina el tipo de cielo predominante con el fin evitar un riego innecesario, todo esto mediante la recolección de datos tomados de las diferentes variables de la estación meteorológica.

En el proyecto presente se desarrolló los siguientes puntos:

- Creación una estación meteorológica que sea capaz de medir diferentes variables ambientales tales como la velocidad del viento, humedad relativa, temperatura ambiente, y radiación solar.
- Elaboración una lógica de control del proceso y diseño del sistema agronómico con el fin de identificar la cantidad justa de agua para cada cultivo.
- Diseño una interfaz gráfica para la visualización de los parámetros y el proceso de irrigación inteligente
- Implementación del sistema de irrigación inteligente en un campo experimental de 200 m² para el cultivo de fréjol.
- Pruebas de funcionamiento y resultados.

De forma general como se indica en la Figura 1, los sensores de humedad y temperatura se ubican en el terreno, cuidando que, a la hora de realizar la limpieza o cosecha del cultivo, estos no sean dañados al ser pisados por el personal. Los cables de conexión de los sensores desde el cultivo hacia el controlador son conducidos mediante tuberías para prevenir daños por el sol, lluvia, humedad, etc. La estación meteorológica está ubicada junto a los cultivos, de igual manera los cables se instalan por una tubería hacia el controlador, donde juntamente con los datos obtenidos

de las variables del suelo y el desarrollo de una lógica de control difusa determinan la apertura de las electroválvulas dando así la cantidad justa de agua que cada cultivo necesita.

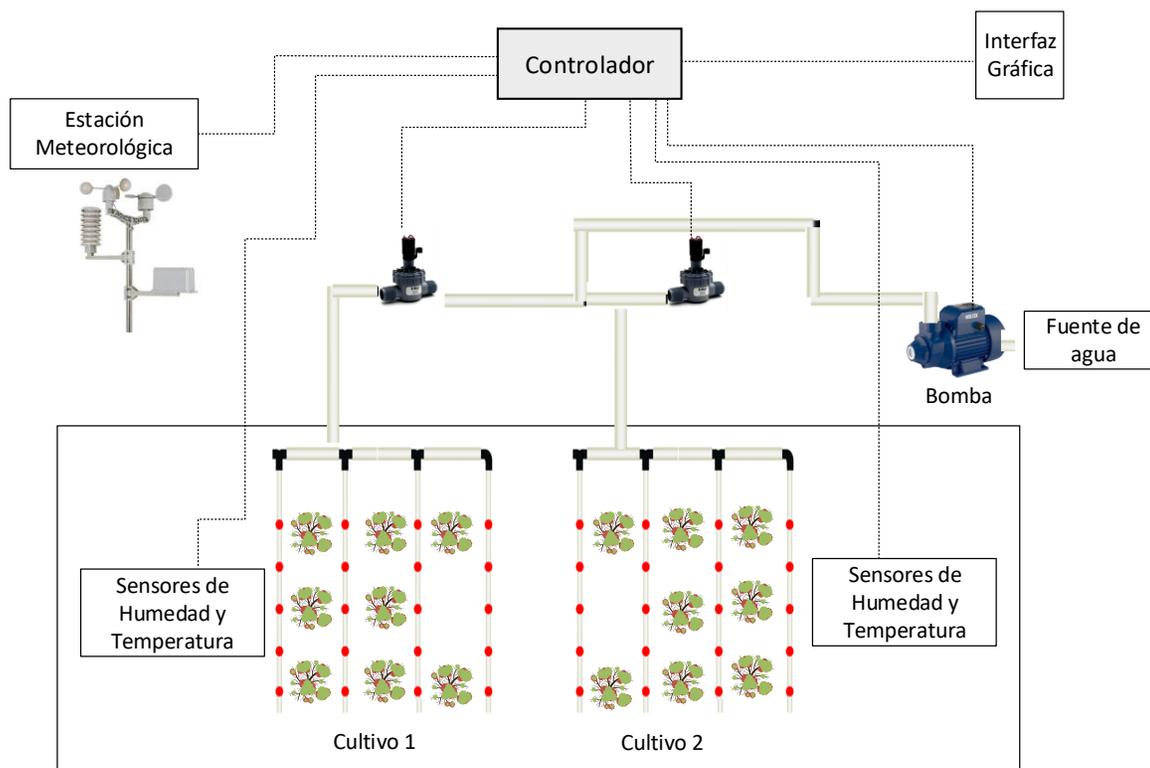


Figura 1 Propuesta inicial del sistema de irrigación inteligente.

Tomando en cuenta los cambios que se realizó en el sistema y el cambio de cultivo, en la Figura 2 se muestra la propuesta final para la implementación del sistema de irrigación inteligente para el cultivo de fréjol.

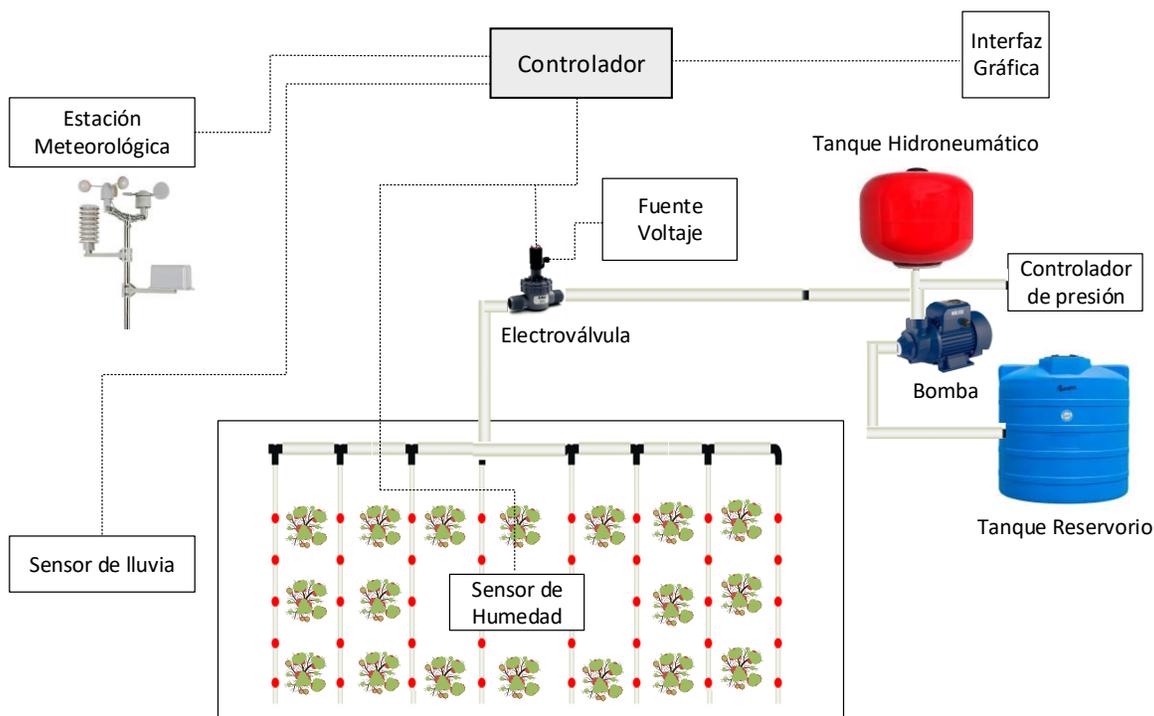


Figura 2 Propuesta final del sistema de irrigación inteligente.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Diseñar e implementar un sistema de irrigación inteligente capaz de realizar una dosificación justa de agua en cultivos en la hacienda Cochicaranqui ubicada en el cantón Ibarra.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar una lógica de control inteligente que permita generar el riego en los cultivos en los momentos justos.
- Diseñar el sistema agronómico que trabaje juntamente con la lógica de control propuesta, que permita determinar la cantidad de agua necesaria para cada cultivo.

- Crear una estación meteorológica para la obtención de datos de diferentes variables ambientales.
- Elaborar una interfaz gráfica para la visualización de datos y funcionamiento del sistema.
- Estimar el ahorro de agua, mediante la evaluación del desempeño general del sistema mediante diferentes pruebas de funcionamiento en comparación a un sistema de riego por parcelas.

1.5 Descripción general del proyecto

El proyecto consiste en desarrollar un sistema de irrigación inteligente en la hacienda Cochicarqui, capaz de controlar la cantidad de agua justa que necesita el cultivo, los contenidos del proyecto se muestran en los siguientes puntos.

1.5.1 Capítulo I – Introducción

En este capítulo se aborda la descripción del problema en cuanto a los sistemas de riego convencionales frente a sistemas de irrigación inteligente. Además, se presenta la descripción general del proyecto de investigación, la justificación e importancia y el alcance de este.

1.5.2 Capítulo II – Marco teórico

En esta etapa se realizó una búsqueda de información sobre los conceptos para la generación de conocimientos necesarios para el diseño de un sistema de irrigación, además se hizo una revisión de los trabajos realizados previamente con respecto al estudio sobre irrigación inteligente enfocados principalmente a los trabajos realizados en el Ecuador, tomando en cuenta las diferentes

variables y tecnologías que se han utilizado para el desarrollo de este tipo de riego, incluyendo las lógicas de control utilizadas y el uso de estaciones meteorológicas. Además, se tomó en cuenta la Ley de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua, así como también el Plan Nacional de Riego y Drenaje en el Ecuador.

Mediante esta información obtenida se pudo determinar la importancia de la electrónica en la agricultura, donde se observó diferentes métodos y técnicas aplicados para el diseño de un sistema de irrigación inteligente, el cual tiene el objetivo principal de obtener un ahorro significativo de la cantidad de agua a utilizar y la estimación de energía para llevar a cabo el proceso de riego.

1.5.3 Capítulo III – Diseño del sistema agronómico

Esta etapa tuvo la finalidad de realizar el diseño previo de riego para determinar la cantidad estimada de agua para el cultivo de fréjol tomando en cuenta los meses en el que se desarrollará el cultivo. Además, mediante este diseño se pudo determinar el tipo de riego correcto para el cultivo con sus respectivos elementos del sistema de riego.

1.5.4 Capítulo IV – Desarrollo del sistema de irrigación inteligente

Como primer punto de esta etapa se realizó el diseño y creación de una estación meteorológica, luego se realizó un estudio de las diferentes variables censadas con el fin de desarrollar la lógica de control del sistema tomando en cuenta el diseño del sistema agronómico. Además, se desarrolló la interfaz gráfica donde se pudo visualizar y supervisar la información en tiempo real de las diferentes variables del sistema.

1.5.5 Capítulo V – Implementación del sistema

Una vez realizado el diseño del sistema de irrigación inteligente, se procedió al montaje de los diferentes elementos y dispositivos del sistema en el campo, donde se los colocó en el sitio adecuado, consiguiendo así una correcta comunicación entre los sensores y la estación meteorológica con el sistema de control principal.

1.5.6 Capítulo VI – Pruebas y resultados

Esta etapa se realizó con el objetivo de verificar el funcionamiento del sistema implementado para obtener los resultados del sistema de irrigación inteligente.

1.5.7 Capítulo VII – Conclusiones y recomendaciones

Finalmente se redactaron las conclusiones y recomendaciones que se lograron y evidenciaron en el desarrollo del proyecto, tomando en cuenta que éstas últimas servirán para mejoras en futuros trabajos que estén asociados al estudio de la irrigación inteligente.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

En este capítulo se realiza una descripción de los conceptos necesarios para el desarrollo de un sistema de irrigación inteligente, comenzando con una breve descripción sobre la normativa legal sobre el uso de agua para riego en el Ecuador. Luego se aborda temas sobre: sistemas de riego y sus tecnologías, los componentes típicos de un sistema de riego, el uso de estaciones meteorológicas en el riego, la aplicación de control inteligente en la agricultura y finalmente la revisión de trabajos realizados sobre el tema de irrigación inteligente.

2.2 Revisión de la normativa legal sobre recursos hídricos, uso del agua y riego

En la Constitución del Ecuador se considera al agua como un elemento vital para la naturaleza y la existencia de los seres humanos la cual no debe ser privatizada de ninguna manera para su consumo o uso en diferentes sectores estratégicos, es así que el artículo 318 de la Constitución textualmente menciona que se *“prohíbe toda forma de privatización del agua y determina que la gestión del agua será exclusivamente pública o comunitaria y que el servicio de saneamiento, el abastecimiento de agua potable y el riego serán prestados únicamente por personas jurídicas estatales o comunitarias”*.

La prestación o responsabilidad de la provisión de los servicios públicos de agua potable y riego serán competencia del Estado, según el artículo 314 de la Constitución, donde se menciona que el Estado dispondrá que las tarifas de los servicios públicos y de riego sean equivalentes, existiendo un control y regulación permanente. La comunidad podrá formar parte en la gestión del agua junto

con el Estado, considerando artículo 411 donde se dispone que el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, regulando toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua. El principal objetivo es garantizar la sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano.

A la par con los artículos mencionados anteriormente de la Constitución del Ecuador, en el artículo 1 de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua, se menciona que el agua es patrimonio nacional estratégico de uso público, esencial para la vida, elemento vital de la naturaleza y fundamental para garantizar la soberanía alimentaria. El objetivo de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua es garantizar el derecho humano al agua y controlar todas las actividades que demanda el uso y aprovechamiento del agua, garantizando el *sumak kawsay* o buen vivir y los derechos de la naturaleza establecidos en la Constitución.

En esta Ley se menciona sobre la correcta utilización o conservación del agua. El inciso b) del Artículo 4 se describe que el agua, al ser un recurso natural deberá ser conservada y protegida mediante una gestión sostenible y sustentable, que garantice su permanencia y calidad. El proyecto de irrigación inteligente busca cumplir con este objetivo, ya que, al realizar una dosificación eficiente, se promueve una correcta utilización del agua para riego contribuyendo a la conservación de este recurso natural.

Por otro lado, cuando se procede a realizar una obra o infraestructura hidráulica con el fin de realizar una extracción de agua, la Ley menciona en el Artículo 11 que estas obras serán consideradas como titularidad pública, privada o comunitaria, según quien las haya construido. Es decir que no se prohíbe realizar infraestructuras hidráulicas siempre y cuando se rijan por los artículos descritos en la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua, tomando

en cuenta principalmente la protección, recuperación y conservación de la fuente, mencionado en el Artículo 12 de la Ley y las formas de conservación y de protección de fuentes de agua mencionado en el Artículo 13.

El abastecimiento constante de agua para consumo humano y riego se considera de gran importancia en la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua, es por esto que en el Artículo 14 se menciona que el Estado será el encargado de regular las actividades que puedan afectar a la cantidad y calidad del agua.

En el inciso s) del Artículo 18 se menciona que la Autoridad Única del Agua será la encargada de implementar un registro para identificar y cuantificar los caudales y las autorizaciones de uso o aprovechamiento productivo cuando se trata de caudales que fluyen por un mismo canal o sistema de riego. La Autoridad Única del Agua es la entidad encargada de dirigir el sistema nacional estratégico del agua, es persona jurídica de derecho público (Ley Orgánica de Recursos Hídricos, 2014).

En cuanto al Servicio público de riego y drenaje en el Artículo 39 se menciona que: Las disposiciones de la presente Ley relativas a los servicios públicos se aplicarán a los servicios de riego y drenaje, cualquiera sea la modalidad bajo la cual se los preste. El riego parcelario es responsabilidad de los productores dentro de su predio, bajo los principios y objetivos establecidos por la autoridad rectora del sector agropecuario.

El servicio público de riego y drenaje responderá a la planificación nacional que establezca la autoridad rectora del mismo y su planificación y ejecución en el territorio corresponde a los gobiernos autónomos descentralizados provinciales, de conformidad con sus respectivas competencias. La Autoridad Única del Agua y la Autoridad Ambiental Nacional en coordinación con la autoridad rectora de la política nacional agropecuaria, expedirán las normas y reglamentos para asegurar la calidad e inocuidad del agua de riego y vigilará su abastecimiento.

El riego y drenaje forman parte del buen vivir o *sumak kawsay*, tomando en cuenta la responsabilidad ambiental que conlleva estas actividades. Para lograr esto en el Artículo 40 se mencionan los Principios y objetivos para la gestión del riego y drenaje, estos son:

- Ampliar la cobertura y mejorar la eficiencia de los sistemas de riego en función del cambio de la matriz productiva;
- Posibilitar el incremento de la productividad y la diversificación productiva;
- Fortalecer la gestión pública y comunitaria de riego;
- Impulsar la modernización y tecnificación del riego;
- Promover el manejo, conservación y recuperación de suelos;
- Favorecer la generación de empleo rural; y,
- Garantizar la calidad y cantidad de agua para riego.

Las juntas de riego son organizaciones comunitarias sin fines de lucro, que tienen por finalidad la prestación del servicio de riego y drenaje, bajo criterios de eficiencia económica, calidad en la prestación del servicio y equidad en la distribución del agua. (Ley Orgánica de Recursos Hídricos, 2014). En los incisos de este artículo 47 se mencionan las atribuciones que tienen las juntas de riego, en coordinación con los Gobiernos Autónomos Descentralizados Provinciales, los cuales se encargan de gestionar, tramitar, realizar el reparto de agua, resolver conflictos, establecer, recaudar y administrar tarifas, imponer sanciones, entregar información, colaborar con la Autoridad Única del Agua y participar en todo lo relacionado con el servicio del riego.

El uso de tecnologías de riego también se menciona en la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, el inciso f) del Artículo 83 dice que se debe Fomentar e incentivar el uso y aprovechamiento del agua, mediante la aplicación de tecnologías adecuadas en los sistemas de riego; y además

promover alianzas público-comunitarias para el mejoramiento de los servicios y la optimización de los sistemas de agua.

La alternativa del diseño y desarrollo del sistema de irrigación inteligente contribuye a gran parte de objetivo de la Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua: gestión, preservación y conservación del agua. La implementación de sistemas Inteligentes de Riego mediante un diseño sostenible y sustentable, podrá garantizar la permanencia y calidad de agua para los cultivos en el país, ya que, al contribuir al correcto uso de este recurso natural, existirá mayor ahorro que permita el acceso al agua de más agricultores en el Ecuador.

Al ser un proyecto de investigación que contribuye a la conservación del agua, no existirá impedimentos por parte el estado o de la Autoridad Única del Agua, para su realización, ya que con este proyecto de irrigación inteligente se mejora la eficiencia y tecnificación de los sistemas de riego, contribuyendo al cambio de la matriz productiva y cumpliendo con los objetivos en cuanto a la gestión del riego y drenaje, mencionados en el Artículo 40 de la Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.

2.3 Sistemas de Riego

El riego forma parte esencial de la agricultura, ya que sin el agua o humedad del suelo la planta no puede absorber los elementos del suelo como sus nutrientes, que son imprescindibles para su desarrollo. El uso de un correcto sistema de riego colabora en gran parte al correcto crecimiento de los cultivos. Cada cultivo tiene su propia exigencia de agua; a la hora de implementar un sistema de riego se debe tomar en cuenta esta característica para un correcto desarrollo.

La uniformidad de aplicación es uno de los puntos principales a la hora de realizar la acción de riego, este término hace referencia a que el agua debe llegar a todos los puntos del terreno por igual.

Al obtener una buena uniformidad el crecimiento de las plantas será homogéneo, ya que todo el cultivo recibirá la misma cantidad de agua sin que exista exceso o carencia de este recurso, contribuyendo a un mayor rendimiento del cultivo. La tecnología o método de riego por goteo, es la que más consigue uniformidad de aplicación, seguido de la aspersion y finalmente el riego por gravedad (Templo, 2012).

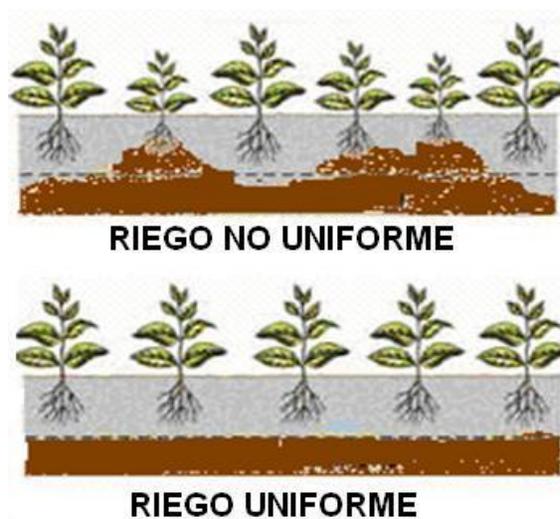


Figura 3 Uniformidad de aplicación de agua de riego
Fuente: (Cun, 2010)

Otro punto importante es la eficiencia de aplicación, está determinada por la relación entre la percolación profunda y escorrentía. Al hablar de percolación profunda se hace referencia a la infiltración del agua por las capas más profundas del suelo; en cuanto a la escorrentía, esta representa la cantidad de agua de lluvia o de riego que es aplicada a la superficie de suelo, que no puede infiltrarse en el suelo, es decir el agua que escurre o chorrea sobre la superficie sin ser aprovechada

por el cultivo. Una eficiencia del 80% indica que del total del agua aplicada al cultivo el 90% la tomarían las plantas y el 10% restante se pierde por percolación profunda y escorrentía.

En el proceso de riego, las pérdidas ocurren en diferentes momentos, pudiendo clasificarse en los siguientes grupos (WWF, 2005):

- **Pérdidas de transporte.** Son las pérdidas en las tuberías que van desde el cabezal de riego hasta el cultivo a regar.
- **Pérdidas de aplicación.** Hace referencia a las pérdidas de agua que existe al utilizar diferentes emisores, ya sea por la velocidad del viento, temperaturas altas o presión baja para el funcionamiento de los emisores de riego
- **Pérdidas en el suelo.** Cuando el suelo se encuentra saturado de agua, este comienza a escurrir o a su vez el agua percola hacia capas muy profundas donde las raíces no la aprovechan.

Clasificación de los Sistemas de Riego

Los sistemas de riego pueden clasificarse en tres categorías esenciales:

- **Riego por aspersión:** El agua se distribuye a través de presión mediante aspersores que originan gotas mojando el terreno, similar a la lluvia.
- **Riego por gravedad:** el agua se distribuye por las parcelas gracias a su propio peso aplicada a favor de una pendiente en la cual se suele mojar la totalidad del terreno mediante surcos, eras, tablares, canteros, etc.
- **Riego localizado:** Se humedece el suelo sólo en la parte cercana a la planta mediante tuberías distribuidas a lo largo del terreno.

El riego por gravedad, al diseñarlo de una manera adecuada, puede conseguir una buena eficiencia de aplicación, sin embargo, por sus altos requerimientos en mano de obra, se recurre a la implementación de sistemas de riego por aspersión y riego localizado.

2.3.1 Riego por Aspersión

El aspersor es el principal mecanismo responsable de la producción de gotas. Existe una gran variedad de aspersores; los más empleados son los denominados de impacto, doble boquilla y media presión.

El principio de funcionamiento de los aspersores es que éstos van girando por acción de la presión de agua, mojando un área circular de forma progresiva. Una buena uniformidad de riego en estos sistemas se consigue al sobreponer adecuadamente los aspersores de manera que cubran la totalidad del terreno a regar. El tipo de apertura y la presión aplicada al aspersor, determina el tamaño de las gotas las cuales no debería ser ni demasiado grandes, debido a que pueden producir daños en las hojas de las plantas, ni demasiado pequeñas ya que, en condiciones ambientales con alta temperatura y alta velocidad del viento, las gotas tienden a vaporizarse (WWF, 2005).



Figura 4 Aspersor de impacto

Fuente: (Gómez, 2010)

Ventajas

- Con menos elementos se puede llegar a una mayor área de terreno.
- No es necesario que el terreno esté nivelado.
- Necesita menor mano de obra en comparación al riego por gravedad.
- Disminuye el efecto de las heladas.
- Se puede utilizar para fertirrigación.

Inconvenientes

- Alto costo inicial de instalación.
- El agua debe ser filtrada y sin sales para prevenir taponamientos.
- El viento y la temperatura pueden evaporizar o afectar la calidad del riego.
- El agua aplicada en las hojas de las plantas puede contribuir a la presencia de plagas.

2.3.2 Riego por Gravedad

El riego por gravedad se caracteriza por la forma de distribuir el agua en el suelo, mediante la gravedad, es decir, al avanzar el agua sobre la superficie del terreno se produce la distribución del agua en la parcela.



Figura 5 Riego por gravedad

Fuente: (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2010)

En estos sistemas de riego se evita la utilización de diferentes elementos y estructuras para el proceso de riego, únicamente se hace uso de canales que permitan que el agua fluya a través del terreno, presentando ventajas económicas ya que el agricultor no necesitará equipos como bombas, filtros, reguladores de presión, etc., ni mayores conocimientos para montar el sistema de riego por gravedad consiguiendo además un ahorro energético por el no uso de elementos eléctricos (Arteaga, 2015). Pero al no utilizar ningún elemento para impulsar el agua por las parcelas, requiere de un trabajo importante de movimiento de tierra para nivelar las parcelas, por ende, se necesita de mayor mano de obra.

Los principales sistemas de riego por gravedad son los sistemas de surcos, canchales, fajas, surcos a nivel y riego por esparcimiento.

Los sistemas de surcos y fajas son llamados de infiltración porque se aplican caudales suficientemente grandes, para que el agua fluya sobre el terreno, pero suficientemente pequeños para que se el agua se vaya infiltrando hacia el suelo mientras fluye a través de este, consiguiendo así que el agua no se estanque a la hora de cortar el paso de paso. (Santos, 2010)

Ventajas

- Fácil instalación
- Fácil mantenimiento
- Los factores ambientales como viento y temperatura no influyen directamente en la eficiencia de distribución del agua.
- La necesidad de energía eléctrica es escasa o nula ya que la energía gravitatoria es el principal fundamento para el funcionamiento de este sistema.

Inconvenientes

- Mayor consumo de agua, debido a que no se considera la cantidad real de agua que necesita cada cultivo.
- Menor eficiencia de aplicación en comparación a los sistemas de riego por aspersión y goteo.
- Si no existe un adecuado drenaje puede provocarse una inundación del terreno, afectando directamente al desarrollo del cultivo, incluso al marchitamiento de la planta.
- El suelo al estar sometido a gran cantidad de agua puede erosionarse.
- Las parcelas deben estar niveladas, por ende, existe una mayor demanda de mano de obra.
- Dificultad para automatizar el sistema

2.3.3 Riego Localizado

El objetivo principal de este sistema de riego es aplicar agua al cultivo en pequeñas cantidades, con menor presión, de manera continua mojando solamente el suelo, más no a la planta. Existen varios tipos de sistemas de riego localizado, tales como microaspersión, cintas de exudación, riego subterráneo, etc. El más utilizado se lo conoce como riego por goteo, el cual consiste en hacer llegar agua a baja presión hacia el cultivo mediante tuberías con incrustaciones de goteros, los cuales se encargan de la producción de gotas de agua para humedecer el suelo. Existen diferentes tipos de goteros diferenciados por el sistema que usan para poder disipar la presión de agua produciendo gotas; los más conocidos son los tipo vortex, helicoidales, de laberinto y autocompensantes (WWF, 2005).

Cada gotero está caracterizado por su caudal nominal, expresado en litros por hora y su rango de presiones de trabajo. En el caso de goteros autocompensados la presión de trabajo no influye en el caudal dando así un riego con el mismo caudal en toda la extensión de la tubería.



Figura 6 Riego Localizado (Goteo)

Fuente: (Mendoza, 2013)

Ventajas

- Ahorro de agua en comparación al riego por aspersión y riego por gravedad
- Mayor eficiencia de aplicación
- Hace posible la fertirrigación
- Accesible a la automatización y control total de cantidad de agua
- Reducción de mano de obra
- Gasto energético menor debido a que funciona con bajas presiones y cuando es necesario.
- No contribuye a la aparición de plagas, ya que únicamente se moja el suelo.

Inconvenientes

- Alto costo de instalación inicial, inviable para cultivos de gran extensión.
- Sensibilidad de los emisores a obstrucciones, por ende, se necesita un buen equipo de filtrado.

2.4 Componentes típicos de un sistema de riego

En el presente proyecto se utiliza un sistema de riego por goteo, por lo cual a continuación se mencionan los componentes principales de este sistema de riego.

Este sistema consta de tres unidades fundamentales:

- Cabezal de riego
- Red de conducción y distribución
- Emisores

Cabezal de riego

El cabezal de riego está constituido por la bomba o cualquier otra fuente de agua a presión; por ejemplo, un estanque o cisterna, o un sistema de agua presurizada (Ministerio de Agricultura de Argentina, s.f.). También se debe colocar elementos de medición y control como manómetros y llaves de paso para revisión y control del sistema presurizado.

Luego se debe colocar un sistema de filtrado donde el principal objetivo es evitar el paso de elementos o materia que obstruyan los emisores. En algunos sistemas de riego por goteo se utiliza la unidad de fertilización, la cual es la encargada de suministrar fertilizantes necesarios para evitar aparición de plagas y contribuir al correcto desarrollo del cultivo.

Finalmente, y en forma opcional, aparece el equipo de automatización, el cual suele incluir un programador, sensores y su instalación eléctrica. Este se encarga de ejecutar automáticamente las

instrucciones de tiempo y frecuencias de riego, con lo cual se simplifica el manejo del equipo (Ministerio de Agricultura de Argentina, s.f.).

Todos los componentes mencionados anteriormente se visualizan en la figura 7 donde se muestra un cabezal de riego típico de un sistema de riego.

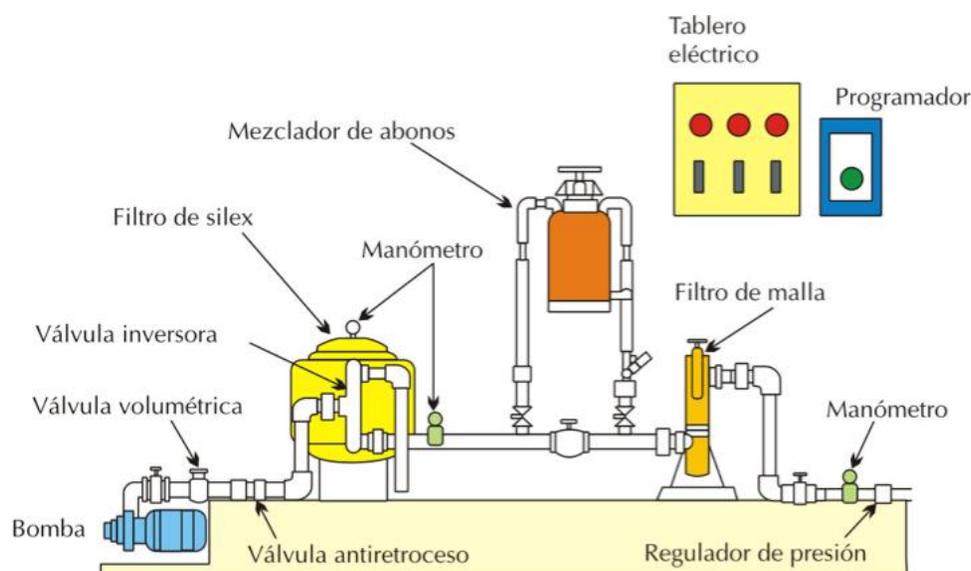


Figura 7 Ejemplo de Cabezal de Riego

Fuente: (Alexis & Abelardo, 2010)

Red de Conducción y distribución

La red de distribución conduce el agua desde el cabezal hasta el cultivo. La tubería principal es la que parte del cabezal hasta la siguiente tubería. La tubería secundaria es la que da origen a los subsectores de riego y la tubería lateral o terciaria está compuesta por los emisores de riego encargado de proveer de agua al suelo del cultivo, como se muestra en la figura 8.

El plástico es uno de los principales elementos para la elaboración de tuberías o mangueras, siendo el PVC (policloruro de vinilo) y el PE (polietileno) los más utilizados para el sistema de riego por goteo (Universidad de Sevilla, 2007). A la hora de la instalación de la tubería el diseño

hidráulico es muy importante, ya que en base a este se calculan los diámetros y presiones que tendrá la línea de conducción.

Los elementos que complementan a la red de conducción y distribución suelen ser juntas, tees, cruces, codos, reducciones, acoples, tapones y tapas, además es necesario la utilización de válvulas tales como válvulas expulsoras de aire, válvulas antiretorno o check y de seccionamiento para una mayor seguridad y control de la red de conducción y distribución (Martinez, 2012).



Figura 8 Conexión de tubería secundaria a tubería terciaria

Fuente: (Liotta, 2015)

Emisores

Los emisores son los elementos encargados de suministrar el agua hacia el suelo o el ambiente (Pastor & Narro, 2014). Las características principales de un emisor son:

- Fácil instalación
- Bajo costo
- Poco sensible a la variación de presión
- De gran durabilidad

Los emisores tipo goteo se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes tipos de gomas de gotero (Agrícolas SA, 2016):

- **Tubería portaemisores simple:** para goteros pinchados e insertados (mostrado en la figura 9).
- **Tubería portaemisores con goteros integrados** (mostrado en la figura 9).
- **Microtubo:** para microirrigación en sistemas hidropónicos.
- **Cintas de riego:** son tuberías con pequeñas perforaciones para la producción de gotas (mostrado en la figura 9).
- **Tuberías de exudación o porosas:** son tuberías que al aplicar agua a una cierta presión comienzan a suministrar agua por los microporos que poseen.



Figura 9 Emisores de riego (goteros)

Fuente: (Suárez, 2005)

Algunas características que hay que tener presente a la hora de elegir un emisor son (Pizarro, Curso de riego localizado, 2014):

- Caudal uniforme y constante sin importar la medida de presión.

- Bajo costo
- Poco sensible a obstrucciones y cambios de temperatura.
- Resistente a cambios bruscos del clima y químicos agresivos.
- Resistencia al ataque de insectos y/o roedores.
- De alta durabilidad y disponibilidad en el mercado.

2.5 Estaciones Meteorológicas aplicadas en sistemas de riego automáticos

Una estación meteorológica es un equipo encargado de medir y registrar diferentes variables meteorológicas con el fin de realizar predicciones del tiempo o clima en una determinada zona, mediante modelos numéricos, mapas climáticos, o meteoramas. (Orts, s.f.)

El propósito de una estación meteorológica en sistemas de riego es monitorizar las condiciones ambientales o variables meteorológicas, junto con las condiciones del suelo para realizar un riego óptimo.

El conocimiento de la información de los datos meteorológicos les sirve a los agricultores para (S.A., 2014):

- Realizar diseños del sistema agronómico o de las necesidades netas de riego máximas.
- Control de unidades de almacenamiento de frío y calentadores para cultivos.
- Predicción de aparición de plagas y enfermedades.
- Control de tiempo para el sistema de riego
- Correcta elección de fechas de siembra y cosecha
- Control de tiempo para sistema de fertirrigación

En países desarrollados se ha implementado redes de estaciones meteorológicas, que, junto con tecnologías de información y comunicación, permiten conocer información de variables climáticas en tiempo real, para así determinar la aplicación o dosificación de agua de riego en momentos justos y necesarios. Esto ha llevado a que varios países del mundo comiencen a utilizar estaciones meteorológicas automáticas que contribuyan a realizar programaciones o controladores de riego para optimizar el uso de agua (Ortega & Carrasco). (Puican, 2012) menciona que las predicciones en tiempo real entregadas por las estaciones meteorológicas ayudan a realizar mejores planificaciones a corto plazo de diferentes operaciones agrícolas, como el riego.

Una de las principales contribuciones de las estaciones meteorológicas es en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo ET_C , la cual hace referencia a la cantidad de agua que consume un cultivo en base a determinados parámetros como la evaporación del suelo y transpiración de la planta, determinados por el estudio de variables ambientales como humedad, radiación solar, temperatura, etc. (Fernandez & Romero, 2015).

Un ejemplo real de la utilización de Estaciones Meteorológicas en la agricultura se dio en España donde se montaron redes de estaciones agroclimáticas que permiten conocer de manera precisa y en tiempo real su valor diario, calculado a partir de datos meteorológicos medidos en la zona (Calera & Campos, 2016), esto con el fin de calcular la evapotranspiración del cultivo ET_C mediante el modelo del artículo N° 56, correspondiente a la evapotranspiración del cultivo, proporcionado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y así realizar una óptima programación de riego.

Los pronósticos del tiempo asociados a los sistemas de riego han conseguido reducir la cantidad de agua utilizada para riego, aumentar el correcto desarrollo del cultivo y además reducir la erosión del suelo debido a un mejor control del caudal del agua (Ojeda).

2.6 Tecnologías y automatización en sistemas de riego

Actualmente existen diferentes tecnologías basadas en mediciones de variables químicas y meteorológicas, observables en tiempo real, que permiten conocer las verdaderas necesidades hídricas de los cultivos. Esta tecnología de lectura en tiempo real se aplicó en un proyecto en la ciudad de Huelva, España donde se utilizó información en tiempo real para controlar el estado hídrico y mejorar la gestión del riego en una plantación de cítricos controlando las decisiones de riego en función del árbol y de las condiciones del entorno.

Otra tecnología de riego es la utilización de imágenes satélite, donde mediante la toma de imágenes de una misma zona, permite seguir adecuadamente todo el ciclo de un cultivo (WWF, 2005)

El proyecto Life HAGAR fue aprobado en el 2002 con el objetivo de fomentar el uso de nuevas tecnologías de control de riego con el objetivo de obtener un uso eficiente del agua en la agricultura.

Este proyecto se basa en un “sistema de asesoramiento de riego en tiempo real”, capaz de integrar variables ambientales, microclimáticas y del suelo, medidas en campo, que son transmitidas vía radio para así conocer de manera más precisa los consumos de agua en diferentes cultivos de una zona determinada. (Ambientum, 2006).



Figura 10 Medición de microclimas del proyecto Life HAGAR

Fuente: (HAGAR, 2006)

Una de las tecnologías más utilizadas en la agricultura es el riego por goteo. Este sistema funciona mediante presión para hacer circular agua por la tubería principal, hacia la tubería con goteros ubicadas sobre el suelo. Aunque se trata de una tecnología relativamente sencilla, exige una alta inversión inicial y mantenimiento, ya que los emisores o perforaciones por donde sale el agua pueden obstruirse fácilmente. Sin embargo, en comparación a los sistemas de riego por aspersión, el sistema de riego por goteo ha reducido el consumo de agua de los resultados obtenidos en muchos países demuestran que los agricultores que pasaron del riego por aspersión a sistemas de goteo han reducido su consumo de agua del 30% al 60%. Además, es ideal para realizar el proceso de fertirrigación, aumentando así el correcto desarrollo del cultivo para una mejor cosecha (FAO, Enfoques: Mejorar la tecnología de riego, 2003).

La automatización del riego consiste básicamente en sustituir control manual por un control automático el cual pretende obtener (Universidad de Castilla, s.f.):

- Menor utilización de mano de obra.
- Ahorro de agua.
- Ahorro de energía.
- Incremento de la eficiencia del riego.
- Control de costes.
- Incremento de productividad de los cultivos.

Generalmente los sistemas de riego automáticos están conformados principalmente por temporizadores que en determinado tiempo darán paso a la activación de las válvulas para el flujo de agua hacia el cultivo.

Otros componentes típicos de un sistema de control automático del riego son: (Novedades Agrícolas SA, 2016):

- **Sensores y/o transductores:** Tensiómetros, manómetros, presostatos, medidores de caudal, detectores de nivel, etc.
- **Actuadores:** interruptores, electroválvulas, válvulas motorizadas, bombas, variadores de velocidad, arrancadores electrónicos, etc.
- **Unidades de control:** programadores, ordenadores, etc.
- **Sistemas de protección eléctrica:** relés, interruptor magnetotérmico, interruptor diferencial, fusibles, etc.
- **Sistema de comunicación:** protocolos de comunicación hacia computadores, internet, etc.

2.7 Lógica difusa en la Agricultura

La denominada lógica difusa forma parte de controladores inteligentes, esta permite a los sistemas trabajar con información que no es exacta, es decir, que dicha información es imprecisa, a diferencia de la lógica tradicional, la cual trabaja con una información definida y precisa. El control difuso puede aplicarse en innumerables sistemas, tanto sencillos, como en complejos (Revelo, 2006). El uso de la lógica difusa en la agricultura tiene la finalidad de facilitar la evaluación de diferentes parámetros climáticos con el fin de apoyar a los agricultores en el desarrollo de sus cultivos.

En la agricultura la lógica difusa se utiliza para recoger los datos necesarios con el fin de tomar una decisión del tiempo óptimo de riego.

Utilizando un sistema de riego inteligente con control borroso se consiguen las siguientes ventajas (Mata & Tortajada, 2007):

- **Eficiencia:** Las salidas del controlador son más precisas y en tiempo real.
- **Simplicidad:** Las reglas para diseñar el controlador suelen ser sencillas, dependiendo el conocimiento del experto.
- **Estabilidad de los resultados:** Predicción de acontecimientos, lo cual estabiliza el entorno físico que controla.

Burgos & Ribeiro (2007) desarrollaron un controlador difuso multivariable para el ajuste de tratamientos en agricultura de precisión, montado sobre una barra multisección de aplicación de tratamientos, incorporada a un tractor, que controla la apertura y cierre de cada una de las secciones de la barra y la dosis de herbicida a aplicar.

Una aplicación práctica de la lógica borrosa al campo de regadío fue presentado por Mata & Tortajada (2007), donde mediante el entorno de desarrollo en Java lograron obtener una visualización gráfica del comportamiento de la evolución de un entorno de regadío simple en el tiempo, con la variación de diferentes parámetros de entrada.

En el trabajo de Escobar & Galindo (2014), lograron realizar la aplicación del control difuso en Agricultura Industrial, con el fin de conseguir una simulación de un microclima idóneo para el desarrollo óptimo del cultivo.

Otro trabajo relacionado con la lógica difusa en la agricultura es: Aplicación de la lógica difusa en la toma de decisiones para la sostenibilidad del suelo (Veita & Martínez, 2014), donde exponen la aplicación de la lógica difusa para la identificación de los tipos de suelo más afectados en un agrosistema por el Mecanismo Central del Síndrome de Sobre-Utilización del Suelo.

2.8 Irrigación inteligente

Un sistema de irrigación inteligente es un conjunto de elementos y dispositivos capaces de hacer llegar el agua a los cultivos en el momento que estos la necesiten.

La ineficiencia en el desarrollo de métodos y sistemas de riego hace que alrededor del 50% de agua se desperdicie debido al exceso de agua utilizada para riego en cultivos. Diferentes tecnologías en el control de riego pueden reducir significativamente el exceso de agua mediante la dosificación correcta, es decir cuando las plantas de verdad la necesiten (CI, n.d.).

Un Sistema de Riego Inteligente Borroso fue desarrollado por Guijarro, Torajada, & González (2007), utilizando la lógica borrosa con el objetivo de controlar el tiempo de apertura de válvulas, basados en parámetros meteorológicos como el grado de nubosidad ambiental. Este sistema fue

simulado variando las condiciones ambientales o cargando datos reales para evaluar la respuesta de este.

Castro, Aguila, & Quevedo (2008) desarrollaron un sistema de riego automatizado en tiempo real, con el fin de entregar agua al cultivo en la cantidad y momento oportunos, utilizando tres estrategias de riego: lisímetro de pesada, contenido volumétrico de agua y balance hídrico climático con base en la evapotranspiración de referencia (ET_o).

El trabajo de investigación de Cruz (2009) propone utilizar un sensor de presión y sensor de humedad para conocer la cantidad de agua contenida en el suelo, con el fin de reducir la cantidad de agua utilizada para riego de una chacra. El procesamiento y control de riego fue desarrollado en un microcontrolador y además se utilizó un software para el monitoreo del sistema.

En Ecuador Narváez (2009), diseñó un sistema de riego automatizado dedicado a la producción florícola basado en las tecnologías de agricultura y precisión y en telemetría, utilizando la plataforma de comunicaciones de telefonía móvil GPRS.

En el 2014 el Ayuntamiento de Barcelona lanzó un sistema Inteligente de telegestión de riego para los espacios verdes de esta ciudad, logrando reducir en un 25% el volumen de agua consumida en la ciudad (Pérez, 2014). El sistema recoge datos de sensores, estaciones meteorológicas y pluviómetros, logrando así obtener una comparación que permitir aportar de agua a las zonas verdes que la necesiten.

Otro trabajo de investigación sobre irrigación inteligente desarrollado e implementado en Ecuador fue desarrollado por Vásconez & Chamba (2013) donde mediante la utilización de sensores de humedad del suelo, sensores de nivel y un controlador se puede automatizar el riego en una finca, todo mediante conexión inalámbrica entre los elementos electrónicos. En el 2014, en la Escuela Politécnica del Litoral se realizó un trabajo de titulación de Bravo & Muñoz (2014), de diseño e

implementación de un sistema de riego inteligente basado en sensores y módulos de radiofrecuencia para transmisión, enfocado al ahorro de agua y energía, dosificando de manera justa el agua a los cultivos, utilizando sensores para la medición de la humedad relativa del suelo y la temperatura ambiental.

La necesidad de controlar de forma eficiente diferentes automatismos y la optimización de recursos hídricos, materiales y humanos, llevó al Ayuntamiento de Valencia, (2015) a desarrollar un proyecto de Riego Inteligente para un jardín y un parque basado en una plataforma PC y una aplicación SCADA, con una programación inteligente de riego por caudal acumulado y tiempo de riego permitiendo la incorporación de parámetros climáticos.

En la conferencia mundial de radiocomunicaciones del 2015, se dio a conocer una tecnología de irrigación inteligente para una agricultura sostenible en Abu Dhabi, la cual consiste en sonda inteligentes instaladas a diversas profundidades las cuales están conectadas a una estación de control y a un transmisión de radiofrecuencia (itunews, 2015), el objetivo es lograr un equilibrio entre el suelo y el agua, y entre el cultivo y el agua, para así lograr un riego eficiente.

Maqueda, Requena, & Meneses (2016) diseñaron un Sistema de Control de Riego Inteligente, utilizando dispositivos electrónicos y de comunicación con el fin de controlar el encendido y apagado de válvulas que controlan el paso de agua hacia los cultivos.

El Internet de las cosas también forma parte de los sistemas de riego Inteligentes. Castro J. (2016) desarrolló un Sistema de Riego autónomo basado en la Internet de las Cosas, utilizando redes de sensores inalámbricos (WSN) y un sistema de Aprendizaje Máquina para la predicción del calendario de riego empleando servicios de Computación en la Nube, determinando mediante esto las necesidades reales de agua para la producción de alimentos.

En este proyecto se realizó un sistema de irrigación inteligente el cual mediante un sistema de predicción utilizado lógica difusa se determinó el cielo predominante en la zona, que juntamente con las mediciones de humedad del suelo y presencia de lluvia, se diseñó un controlador inteligente de riego el cual sea capaz de activar una electroválvula para dosificar la cantidad necesaria de agua para un cultivo de fréjol.

CAPITULO III.

DISEÑO DEL SISTEMA AGRONÓMICO

3.1 Introducción

En este capítulo se detalla el diseño del sistema agronómico, es decir estimar la cantidad de agua que necesita el cultivo, en periodos de máximas necesidades dependiendo de los meses en que se desarrollará el cultivo, con el objetivo de conocer la cantidad máxima y mínima de agua necesaria para que el cultivo se desarrolle correctamente. Además, se realiza un estudio de los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema hidroneumático, el cual será el encargado de llevar la cantidad de agua a transportar a través de las tuberías, y otros elementos de riego como mangueras y tuberías.

3.2 Datos climáticos

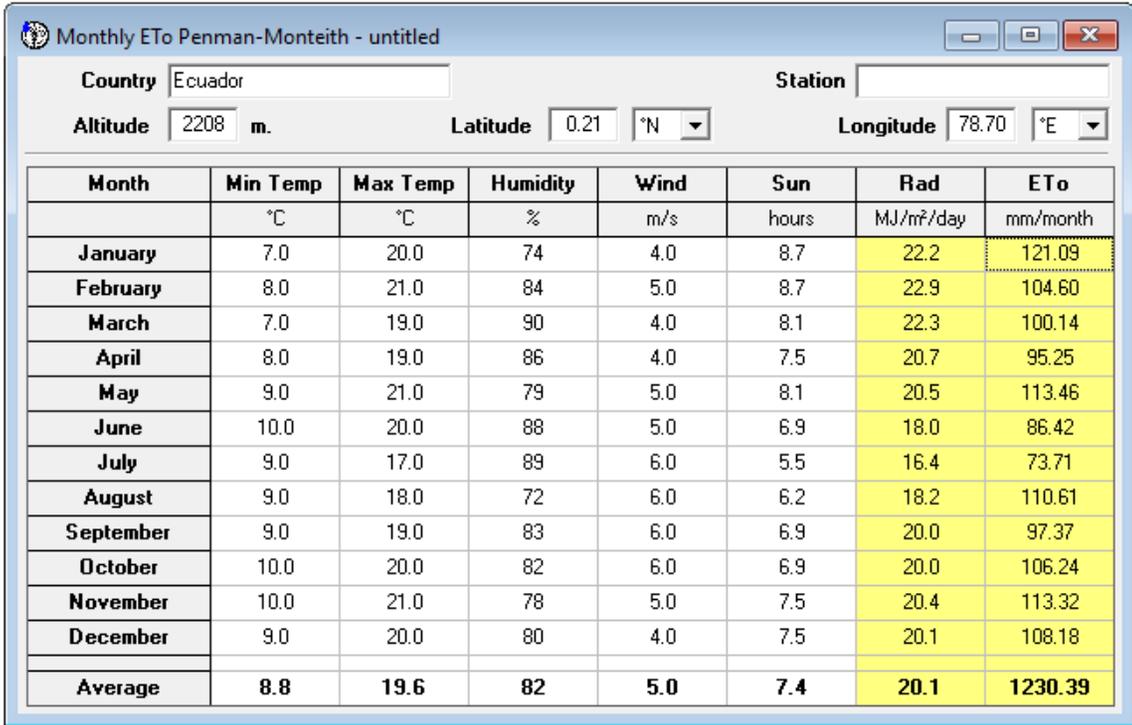
Para el diseño del sistema agronómico se debe considerar datos climáticos que permitan realizar el cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ET_0), la cual permite conocer la pérdida de agua por evaporación y transpiración de las plantas.

Los datos climáticos se obtuvieron de Freemeteo, un portal de internet el cual proporciona datos de las condiciones meteorológicas a nivel mundial, basado en la información que proporcionan las estaciones meteorológicas de cada país. Los datos obtenidos detallan los rangos de temperatura, humedad y viento desde enero hasta diciembre del 2017, haciendo referencia al clima predominante en la ciudad de Ibarra durante el año.

No se tomó en cuenta la información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, debido a que los boletines emitidos por esta institución no estaban completos para el año 2017, ya

que en el portal web no se podía visualizar de todos los meses. Además, los boletines que se podían visualizar solo contaban con información referente a las precipitaciones y a temperatura, faltando así datos de humedad y viento necesarios para realizar el diseño del sistema agronómico.

Para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ET_0), se utilizó el software *CROPWAT*, el cual es una herramienta de apoyo para cálculos de necesidades hídricas de los cultivos, desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Este software mediante el ingreso de datos climatológicos como temperatura, humedad y viento, permite estimar la evapotranspiración de referencia y la radiación presente para cada mes del año.



Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind m/s	Sun hours	Rad MJ/m ² /day	ETo mm/month
January	7.0	20.0	74	4.0	8.7	22.2	121.09
February	8.0	21.0	84	5.0	8.7	22.9	104.60
March	7.0	19.0	90	4.0	8.1	22.3	100.14
April	8.0	19.0	86	4.0	7.5	20.7	95.25
May	9.0	21.0	79	5.0	8.1	20.5	113.46
June	10.0	20.0	88	5.0	6.9	18.0	86.42
July	9.0	17.0	89	6.0	5.5	16.4	73.71
August	9.0	18.0	72	6.0	6.2	18.2	110.61
September	9.0	19.0	83	6.0	6.9	20.0	97.37
October	10.0	20.0	82	6.0	6.9	20.0	106.24
November	10.0	21.0	78	5.0	7.5	20.4	113.32
December	9.0	20.0	80	4.0	7.5	20.1	108.18
Average	8.8	19.6	82	5.0	7.4	20.1	1230.39

Figura 11 Estimación de ET_0 mediante el Software CROPWAT

Una vez realizado el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) se procede a realizar el cálculo de las necesidades netas de riego máximas.

3.3 Cálculo de las necesidades netas de riego máximas

Para el cálculo de las necesidades netas de riego máximas se realizan los siguientes pasos:

3.3.1 Cálculo de la precipitación confiable

La precipitación en milímetros para cada mes del año 2017 se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Precipitación mensual en el 2017

MES	Ppt. (mm/mes)
Enero	84.4
Febrero	65.8
Marzo	116.6
Abril	42.1
Mayo	88.4
Junio	36.7
Julio	3.4
Agosto	28.9
Septiembre	12.8
Octubre	6.5
Noviembre	55.3
Diciembre	44
TOTAL	584.9

Fuente: Freemeteo

Debido a que las precipitaciones presentes en el año anterior no siempre son las mismas para los años siguientes, y tomando en cuenta que el cultivo de fréjol es sensible a la sequía pero no posee condiciones especiales para su desarrollo, se determinó para este trabajo una probabilidad de ocurrencia de precipitaciones del 75%. Para el cálculo de la precipitación confiable al 75% (*Ppt.* 75%) se busca en la primera columna de la Tabla 2, correspondiente a la estimación de valores del índice de precipitaciones I_p de acuerdo con el porcentaje de ocurrencia (75%); el valor más cercano al de la precipitación anual (584.9 mm), en este caso sería 600 mm. Luego en la

columna del 75% que es la precipitación que se desea calcular, se busca el índice I_p correspondiente a 600 mm.

Tabla 2

Estimación de valores del índice de precipitación (I_p)

Ppt. anual	%					
	50	60	70	75	80	90
300	0.93	0.85	0.78	0.74	0.69	0.58
350	0.94	0.86	0.79	0.75	0.71	0.61
400	0.95	0.88	0.81	0.77	0.73	0.63
450	0.95	0.89	0.82	0.78	0.74	0.65
500	0.96	0.90	0.83	0.79	0.75	0.67
550	0.96	0.90	0.84	0.81	0.77	0.69
600	0.97	0.91	0.84	0.81	0.78	0.70
650	0.97	0.92	0.85	0.82	0.79	0.71
700	0.97	0.92	0.86	0.83	0.80	0.72
750	0.97	0.93	0.87	0.84	0.81	0.73
900	0.98	0.93	0.88	0.8	0.82	0.75
1000	0.98	0.94	0.89	0.86	0.83	0.77
1150	0.98	0.94	0.90	0.87	0.84	0.78
1250	0.98	0.95	0.91	0.88	0.85	0.79
1400	0.98	0.95	0.91	0.89	0.86	0.80
1500	0.99	0.95	0.1	0.89	0.87	0.81
1800	0.99	0.95	0.92	0.90	0.88	0.83
2000	0.99	0.95	0.92	0.91	0.89	0.85

Fuente: (USDA, 1997)

Una vez obtenido el valor del índice de precipitación al 75%, se realiza la multiplicación de la precipitación promedio de cada mes por el índice de precipitación, $I_p = 0.81$. Los resultados de la precipitación confiable al 75% se muestran en la columna (c) de la Tabla 3.

Tabla 3*Datos de precipitaciones*

(a)	(b)	(c)
Mes	Ppt. (mm/mes)	Ppt. 75% (mm/mes)
Enero	84.4	68.4
Febrero	65.8	53.3
Marzo	116.6	94.4
Abril	42.1	34.1
Mayo	88.4	71.6
Junio	36.7	29.7
Julio	3.4	2.8
Agosto	28.9	23.4
Septiembre	12.8	10.4
Octubre	6.5	5.3
Noviembre	55.3	44.8
Diciembre	44	35.6

3.3.2 Cálculo de la precipitación efectiva

No toda el agua que cae al suelo penetra de manera efectiva en este y es aprovechable por los cultivos. Al caer el agua de lluvia, sólo un porcentaje se aprovecha (precipitación efectiva), el resto serán pérdidas, ya sea por escorrentía, evaporación o por percolación profunda. Para realizar el cálculo de la precipitación efectiva se utilizan las ecuaciones proporcionadas por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS). Estas ecuaciones se calculan a partir de la precipitación mensual (la probable, no la promedio) y son las siguientes (Carrazón, 2007):

- Para una precipitación mensual (P_m) menor de 250 mm:

$$P_e = (125 - 0.2 \times P_m) \times P_m / 125 \quad (1)$$

- Para una precipitación mensual (P_m) mayor o igual de 250 mm:

$$P_e = 0.1 \times P_m + 125 \quad (2)$$

El resultado del cálculo mediante las ecuaciones proporcionadas por la USSGS, de la precipitación efectiva se muestra en la columna (d) de la Tabla 4.

Tabla 4

Precipitaciones en un año

(a)	(b)	(c)	(d)
Mes	Ppt. (mm/mes)	Ppt. 75% (mm/mes)	P_e
Enero	84.4	68.4	60.9
Febrero	65.8	53.3	48.8
Marzo	116.6	94.4	80.1
Abril	42.1	34.1	32.2
Mayo	88.4	71.6	63.4
Junio	36.7	29.7	28.3
Julio	3.4	2.8	2.8
Agosto	28.9	23.4	22.5
Septiembre	12.8	10.4	10.2
Octubre	6.5	5.3	5.3
Noviembre	55.3	44.8	41.6
Diciembre	44	35.6	33.6

3.3.3 Obtención de los datos de cultivo necesarios para dibujar las curvas del factor del coeficiente del cultivo (K_c).

El factor K_c hace referencia al valor de evapotranspiración que presenta el cultivo durante sus fases de desarrollo.

La información necesaria del cultivo es:

- Fecha de siembra.
- Ciclo total del cultivo.
- Días para cada estado vegetativo.
- Factores K_c para cada estado vegetativo.

A medida que la planta se va desarrollando las fases del cultivo y los coeficientes del cultivo K_c varían, ya que existen cuatro fases del cultivo: fase inicial (siembra), fase de desarrollo (floración), fase media (inicio de madurez) y fase final (maduración y recolección).

Tabla 5

Datos del cultivo de Fréjol

Tipo de información	Cultivo de fréjol
Fecha de siembra	20 de diciembre
Ciclo total del cultivo	100
Fases del cultivo	
- inicial	25
- desarrollo	25
- media	30
- final	20
Valores de K_c :	
- $K_{c\ ini}$	0.40
- $K_{c\ med}$	1.15
- $K_{c\ final}$	0.35

Fuente: (Allen, 1989)

3.3.4 Cálculo de la Evapotranspiración del cultivo (ET_C) y de las necesidades netas de riego máximas (N_m)

La Evapotranspiración del cultivo (ET_C) hace referencia al producto entre el coeficiente del cultivo (K_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_0), es decir, es la evaporación y transpiración que sufre un determinado cultivo durante todo su desarrollo, tomando en cuenta las condiciones climáticas presentes en la zona.

El primer paso para el cálculo de la ET_C y de las necesidades netas de riego máximas, es dibujar la curva de K_c , para ello se recurre a la tabla 5, donde los valores de $K_{c\ ini}$, $K_{c\ med}$ y $K_{c\ fin}$ dibujan las líneas horizontales durante las fases inicial y media. Luego se dibuja la línea diagonal

ascendente desde $K_{c\text{ ini}}$ hasta $K_{c\text{ med}}$ y finalmente se dibuja una diagonal descendente desde $K_{c\text{ med}}$ hasta $K_{c\text{ final}}$.

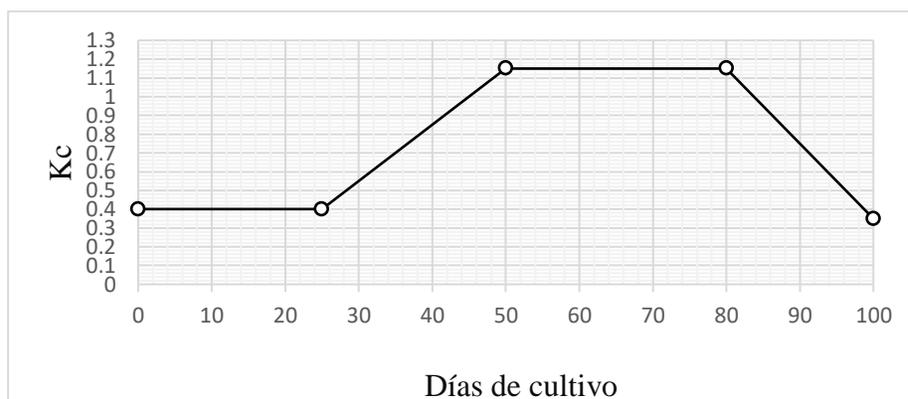


Figura 12 Curva del K_C

Una vez dibujada la curva de K_C se procede a crear la tabla 6 donde las columnas indican los días de cada mes durante los cuales transcurre el cultivo, desde el 20 de diciembre hasta el 29 de marzo, dividiéndolos en períodos de entre 8 y 11 días.

Para el cálculo de N_n (mm/d) realizamos lo siguiente:

- En la fila a) se coloca los datos de ET_0 de cada mes mostrados en la Figura 12.
- En la fila b) se coloca el valor de ET_0 en mm/día, resultado de la división de la ET_0 mm/mes para el número de días de cada mes.
- En la fila c) se coloca el valor de K_C , este valor lo obtenemos a partir del gráfico, determinándolo en el punto medio de cada década.
- En la fila d) se coloca el valor de la Evapotranspiración del Cultivo ET_C , se lo calcula mediante $ET_C = K_C \times ET_0$
- En la fila e) se coloca los valores de la Precipitación Efectiva (P_e) en mm/mes mostrados en la columna (d) de la Tabla 4.

- En la fila f) se coloca la P_e en mm/día, dividiendo la P_e mm/mes para el número de días del mes.
- Finalmente se calcula las necesidades netas diarias de riego mediante $N_n = ET_C \times P_e$ y los valores se colocan en la fila g)

Tabla 6*Cálculo de las necesidades netas de riego máximas*

		Diciembre		Enero		Febrero			Marzo		
Días del mes		20/31	1/10	11/20	21/31	1/10	11/20	21/28	1/10	11/20	21/31
a) ET_0 (mm/mes)		108.18	121.1	-	-	104.6	-	-	100.1	-	-
b) ET_0 (mm/d)		3.5	3.9	3.9	3.9	3.7	3.7	3.7	3.2	3.2	3.2
c) K_C		0.4	0.4	0.4	0.7	1.0	1.14	1.14	1.14	0.94	0.34
d) ET_C		1.4	1.4	1.4	2.7	3.7	4.2	4.2	4.2	3.0	1.1
e) P_e (mm/mes)		33.6	60.9	-	-	48.8	-	-	80.1	-	-
f) P_e (mm/d)		1.1	1.9	1.9	1.9	1.7	1.7	1.7	2.6	2.6	2.6
g) N_n (mm/d)		0.3	0	0	0.8	2.0	2.5	2.5	1.6	0.4	0

Las necesidades netas de riego máximas será el valor máximo de la fila g), en este caso de 2.5 mm/día.

3.4 Cálculo de los parámetros de riego

Una vez obtenidos el dato de las necesidades netas diarias de riego máximas se procede a calcular los parámetros de riego siguiendo los siguientes puntos.

3.4.1 Datos del suelo

Mediante el procedimiento para la determinación de la textura al tacto según Ilaco, (ver Anexo A) se determinó que la textura del suelo del cultivo es arcillosa. De la tabla de propiedades físicas de los suelos mostrada en el Anexo B se obtienen los siguientes datos:

- Densidad aparente (d_a): 1.25 g/cm³
- Capacidad de campo CC: 35% (θ_g)
- Punto de marchitez permanente (PMP): 17% (θ_g)
- Infiltración básica (I_b): 5 mm/h

3.4.2 Profundidad efectiva de las raíces (P_r)

En la tabla mostrada en el Anexo C se puede estimar que la profundidad efectiva de las raíces para el fréjol es de 0.7 m.

3.4.3 Cálculo del agua utilizable

Para el cálculo del agua utilizable, utilizamos los valores mostrados en los puntos 3.4.1 y 3.4.2 correspondientes a valores de la densidad aparente (d_a), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y profundidad efectiva de las raíces (P_r).

El cálculo del agua utilizable se lo realiza mediante la ecuación:

$$AU = 10 \times (CC - PMP) \times d_a \times P_r \quad (3)$$

$$AU = 10 \times (35 - 17) \times 1.25 \times 0.7$$

$$AU = 157 \text{ mm}$$

3.4.4 Dosis neta de riego (D_n)

El fréjol al no ser un cultivo altamente delicado y al no ser una zona de clima muy cambiante, se puede considerar un déficit permisible de manejo (DMP) del 45% (ANEXO D). La fórmula para calcular la dosis neta de riego es:

$$D_n = DPM \times AU/100 \quad (4)$$

$$D_n = 45 \times 157/100$$

$$D_n = 70.65 \text{ mm}$$

3.4.5 Máximo intervalo entre riegos

El máximo intervalo hace referencia al tiempo máximo que se puede dejar entre dos riegos consecutivos sin que el déficit de humedad sea inferior al déficit permisible de manejo (DMP). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I_M(\text{días}) = D_n(\text{mm})/N_n(\text{mm/día}) \quad (5)$$

$$I_M(\text{días}) = 70.65/2.5$$

$$I_M(\text{días}) = 28.26$$

Se debe considerar que este intervalo es el máximo, por lo cual en este trabajo se ha optado por ajustarlo a un menor valor, del 10%, para tener la seguridad de no llegar al punto de marchitez permanente.

$$I(\text{días}) = 25$$

3.4.6 Dosis neta ajustada ($D_{n\text{aj}}$)

Para calcular la dosis neta de riego ajustada se aplica la siguiente fórmula:

$$D_{n\text{aj}} = I \times N_n \quad (6)$$

$$D_{n\text{aj}} = 25 \text{ días} \times 2.5 \text{ mm/días} = 62.5 \text{ mm}$$

Esta medida hace referencia a la aplicación aproximada de 62 mm de agua por cada metro cuadrado del suelo cada 25 días. Es importante mencionar que la dosis neta de riego ajustada determina una estimación de los períodos o tiempos de riego considerando las condiciones climáticas, más no las condiciones del suelo. Es decir que no se tomará en cuenta el período de cada 25 días para riego, ya que el tiempo o momento justo de riego será determinado por las condiciones climáticas en tiempo real y de la humedad del suelo.

3.4.7 Dosis bruta de riego (D_b)

Generalmente los sistemas de riego poseen varias pérdidas, tales como pérdidas en la conducción de agua como fugas y en temas de aplicación y suelo como percolación, viento, escorrentía, etc. Por lo que se realiza el cálculo de la dosis bruta de riego que es una cantidad mayor a la ya calculada para asegurar que la cantidad de agua aplicada al cultivo sea más confiable. Se lo realiza mediante la siguiente ecuación:

$$D_b(\text{mm}) = 100 \times D_{n\text{aj}}(\text{mm})/E_a(\%) \quad (7)$$

Donde E_a hace referencia a la eficiencia de aplicación del sistema de riego. Para un sistema de riego por aspersión la eficiencia es del 75%, para goteo del 90% y superficie del 50%. (FAO, Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego, 2007) En el proyecto se ha considerado

la implementación de un sistema de riego por goteo, por lo cual la eficiencia de aplicación de este sistema es del 90%. Por lo tanto, la dosis bruta de riego será:

$$D_b(\text{mm}) = 100 \times \frac{70}{90} = 68,8 \approx 69 \text{ mm}$$

Como un litro es un volumen de 1 dm^3 , se tiene:

$$\frac{1 \text{ litro}}{1 \text{ m}^2} = \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ m}^2} = 10^{-3} \text{ m} = 1 \text{ mm}$$

Es decir que 69 mm hace referencia a que se deben aplicar 69 litros de agua por cada metro cuadrado de superficie. Este resultado es utilizado para diseñar el controlador de riego, el cual, al detectar la cantidad de 69 litros de agua, mediante el sensor de humedad del suelo, se cerrará el paso de agua hacia el cultivo. Como el déficit permisible de manejo (DMP) hace referencia al contenido de agua en el suelo, el cual no debe bajar del 45% para el caso del fréjol, tomando en cuenta los 69 litros que necesita el cultivo como cantidad máxima de agua, se puede determinar que el DPM en litros es de 31.05 litros, es decir que la cantidad de agua contenida en el suelo no debe ser menor a 31 litros para evitar la marchitez de la planta. Este resultado junto con el tipo de nubosidad sirve para abrir el paso de agua hacia el cultivo.

3.5 Elección del sistema hidroneumático y elementos de riego

Un sistema hidroneumático se encarga de activar o desactivar de manera automática la bomba de agua, para lo cual el switch de presión controla la presión de agua en el tanque hidroneumático, cuando detecta que el agua se encuentre a una baja presión la bomba se activará. Cuando la presión en el tanque es alta la bomba se produce la señal de parada de la bomba. En la figura 13 se puede observar los niveles de presión en un tanque hidroneumático, los cuales serán detectados por el switch de presión, encargado de enviar la señal de encendido y apagado a la bomba de agua.

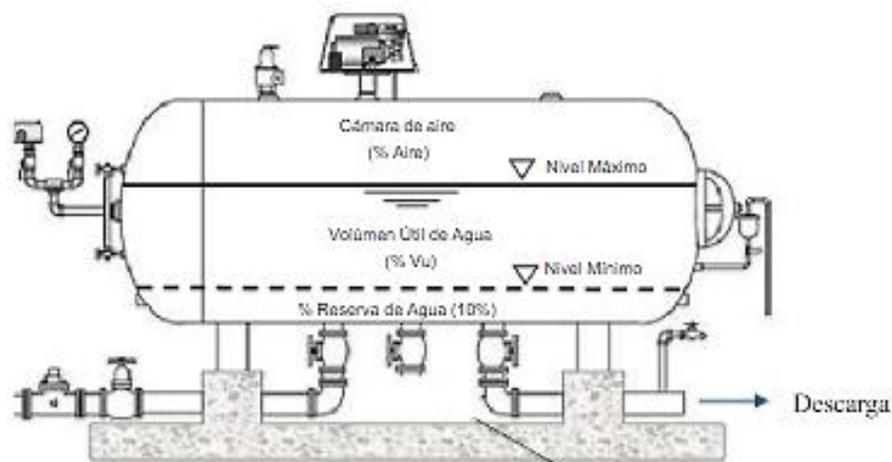


Figura 13 Niveles de presión en el tanque hidroneumático

Para determinar la bomba a utilizar en el sistema de irrigación, como primer paso se debe conocer que tipo de agua se va a bombear, para este proyecto se considera agua limpia ya que no contiene partículas grandes en suspensión, la bomba de superficie con aspiración debido a que el agua se tomará, mediante manguera de conducción, de un reservorio. Se debe tomar en cuenta que la aspiración máxima de una bomba de superficie es de 9 metros, para este proyecto la bomba se encuentra al mismo nivel que el reservorio.

Tomando en cuenta que en el terreno se tienen por cada metro cuadrado de cultivo, 24 goteros y que cada gotero da un caudal de 2 litros/hora, para un suelo de cultivo de 144 m², se tendrá en total 3456 goteros, es decir que tendremos un caudal de 6912 litros/hora o 115.2 litros/minuto.

Una bomba de 1HP de marca Barnes, mostrada en la figura, proporciona un flujo máximo de 125 litros/min, suficiente para abastecer de agua al terreno de 200 m² con un suelo de cultivo de 144 m². Considerando que no existe pérdidas de presión por desnivel entre la bomba de agua y el reservorio.



Figura 14 Bomba Barnes de 1HP

Para la elección del tanque hidroneumático se tomó en cuenta la potencia de la bomba. Un tanque de 24 litros es capaz de abastecer a una bomba de 1/2 HP y de 1HP sin forzarle a la bomba. Para evitar daños y prolongar la vida útil de la bomba se debe garantizar que no exista mas de 12 arranques en una hora. Si se toma en cuenta que la bomba se encenderá por un tiempo menor a una hora cada 25 días aproximadamente, un tanque de 24 litros (figura 15) será suficiente para abastecer a la bomba de 1HP.



Figura 15 Tanque marca PTK de 24 litros

Para el encendido/apagado automático fue necesario usar un interruptor de presión (figura 16) el cual detecta la presión alta del tanque hidroneumático, luego activa un pistón interno haciendo que se mueva hasta que se unan dos contactos. La unión de estos contactos será la señal de activación para la bomba de agua. Cuando la presión baja, un resorte empuja el pistón en sentido contrario y los separa desactivando así la bomba.



Figura 16 Interruptor de presión

Para evitar el paso de agua desde la bomba al reservorio se utilizó una válvula antirretorno (figura 17) para evitar daños en esta.



Figura 17 Válvula antirretorno para sistemas de riego

Estos elementos, bomba de agua, tanque hidroneumático, interruptor de presión y válvula anti-rretorno, mas otros elementos adicionales como neplos, manómetro y conectores, forman parte del sistema hidroneumático del sistema de irrigación.

Una vez determinados los elementos del sistema hidroneumático se procede a determinar la cantidad y longitud de mangueras y emisores necesarias para llevar el agua desde el cabezal de riego hasta el cultivo.

Inicialmente se realiza el cálculo de la longitud de la tubería primaria encargada de llevar el agua hacia la tubería secundaria. Se determinó que la mejor tubería para este propósito es una tubería rígida de PVC de 3/4'' ya que esta al no ir enterrada gracias a su rigidez y composición soportará cambios bruscos de temperatura y aplastamiento sin que esta sufra daños. La longitud de esta tubería es de 5 metros. Adicionalmente se necesitan codos para realizar la conexión de la tubería cuando el terreno por donde circulará esta no es recto o plano (figura 18).



Figura 18 Tubería y codos de PVC
Fuente: (Arquigráfico, 2016)

Una vez determinada la tubería primaria se necesita de una manguera para conectarla con las mangueras de goteo. La manguera elegida es una manguera de polietileno la cual fue enterrada para prevenir daños en esta debido a aplastamientos o roedores. La longitud que se necesita es de 15 m, 12.5 m corresponden a la longitud de un lado del terreno (ver figura 21) y 2.5m es la longitud desde el final del terreno hacia la tubería principal.



Figura 19 Manguera de polietileno
Fuente: (Apec, 2017)

Finalmente se determinó la longitud necesaria de manguera de goteo para cada cama. Al tener una longitud de 16 m para cada cama (ver figura 21), siendo 8 camas en total y considerando que en cada cama se tiene dos líneas de cultivo, se necesitan 256 m de manguera de goteo. Se utilizó una manguera con goteros autocompensados para evitar que al final de cada línea del cultivo exista menor cantidad de agua, es decir que sin importar la variación de presión en la manguera, todos los goteros entregaran el mismo caudal en cualquier sitio del cultivo.



Figura 20 Manguera con gotero autocompensado
Fuente: (todoparaelriego.com)

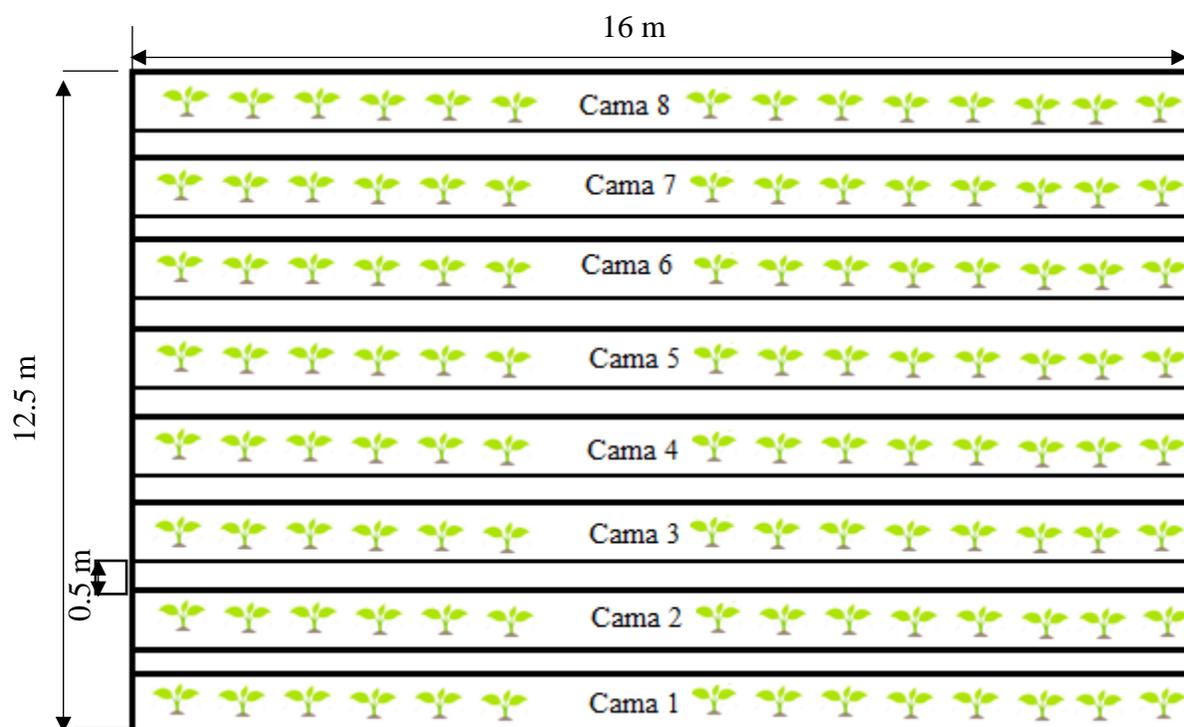


Figura 21 Ilustración del Campo experimental

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL SISTEMA DE IRRIGACIÓN INTELIGENTE

5.1 Introducción

En este capítulo se muestra el tipo de controlador utilizado con su respectivo diagrama de bloques. Posteriormente se muestra el diseño y creación de la estación meteorológica, los sensores que se utilizan para medir las variables climáticas y finalmente el desarrollo de la lógica de control, donde se hace un estudio del sistema de predicción de tipo de cielo mediante lógica difusa con la cual se determinará si es conveniente realizar el riego tomando en cuenta las variables de presencia de lluvia y principalmente la variable de humedad del suelo. El sistema de predicción y las variables de presencia de lluvia y humedad del suelo permiten realizar el diseño del controlador de riego.

5.2 Diagrama de bloques del controlador

El controlador elegido para el desarrollo de la lógica de control es un controlador basado en reglas, con lo cual mediante el estudio de diferentes variables y tomando en consideración el conocimiento del diseñador se puede interpretar la información de una manera útil. Las reglas son elaboradas o creadas por una persona con el fin de obtener un controlador que sea capaz de deducir y elegir una salida adecuada.

En el controlador de riego diseñado en este proyecto se toma en cuenta un sistema de predicción de cielo basado en lógica difusa el cual contiene diferentes reglas para la interpretación de la información y dos variables externas, una de estas es la humedad del suelo, que se basa en el resultado obtenido en el diseño agronómico en cuanto a la cantidad de agua necesaria para el cultivo, que juntamente con el sistema de predicción y la variable de presencia de lluvia, mediante reglas

creadas por el diseñador darán paso a la activación o desactivación de la electroválvula la cual se encarga de dejar pasar o retener agua al cultivo.

En la figura 22 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al sistema de control mencionado anteriormente.

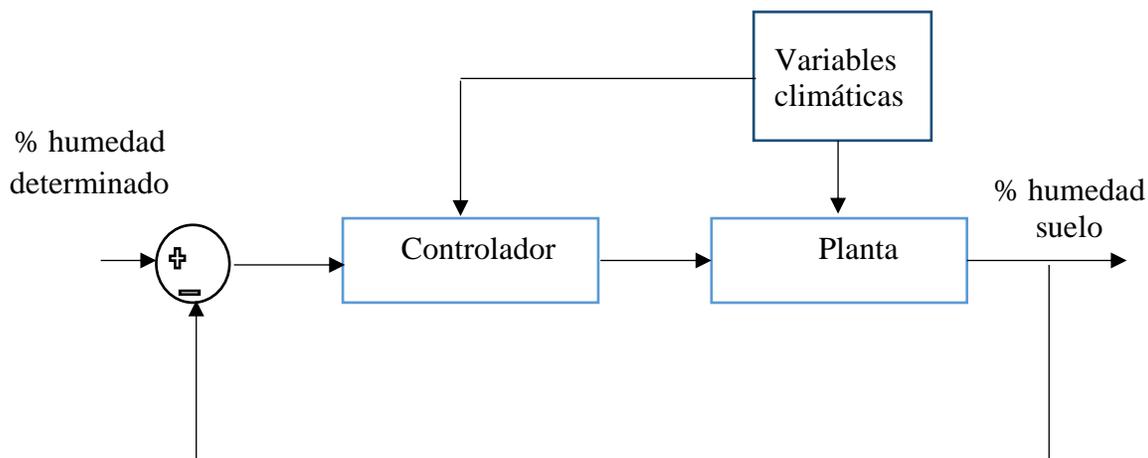


Figura 22 Sistema de control para el sistema de irrigación inteligente

Para la figura 22, el actuador (electroválvula) y el suelo del cultivo forman parte de la planta del controlador de riego. El sistema de control es de lazo cerrado ya que al tener un porcentaje de humedad y dependiendo de las características del cielo que actúan directamente sobre la planta, se compara el valor de humedad del suelo con valores determinados para humedad del suelo máxima y mínima y posteriormente el porcentaje de error se lo utiliza en el diseño del controlador basado en reglas.

5.3 Diseño y creación de la Estación Meteorológica

Una estación meteorológica es una instalación encargada de medir y registrar diferentes parámetros meteorológicos, con el objetivo de valorar la información obtenida para poder realizar estudios climáticos y establecer o predecir comportamientos del clima a lo largo del tiempo.

Para el diseño de la Estación Meteorológica se tomaron dos puntos importantes: la elección de sensores para medición de las variables climática y la protección y medición adecuada de los mismos.

Los instrumentos utilizados en la Estación Meteorológica son:

- Sensor de humedad relativa
- Sensor de radiación solar
- Sensor de temperatura
- Anemómetro

Con el fin de proteger a los instrumentos de las inclemencias del tiempo y que puedan realizar sus lecturas de manera más precisa, se optó por la creación de un abrigo meteorológico capaz de cumplir con este fin. El abrigo o garita meteorológica por su geometría evita que la garita se sobrecaliente dando así una mejor información obtenida de los sensores.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), recomienda que las garitas cumplan con ciertos requisitos para que las lecturas tomadas por los instrumentos contenidos en su interior sean lo más exactas posibles. Algunos de estos requisitos son:

- Pantallas de ventilación natural: para que el aire caliente no se concentre en el interior.
- Pantallas de ventilación artificial: en caso de que la ventilación natural no sea suficiente.
- La exposición correcta: deben estar a una altura entre 1,2 y 2 metros por encima del suelo, sin obstáculos a su alrededor.

El tipo de abrigo meteorológico elegido fue el Abrigo de Stevenson, el cual es una instalación generalmente de forma cuadrada con persianas dobles para permitir el paso de aire a través del interior de la garita y para proteger a los instrumentos contra el sol directo y precipitaciones.

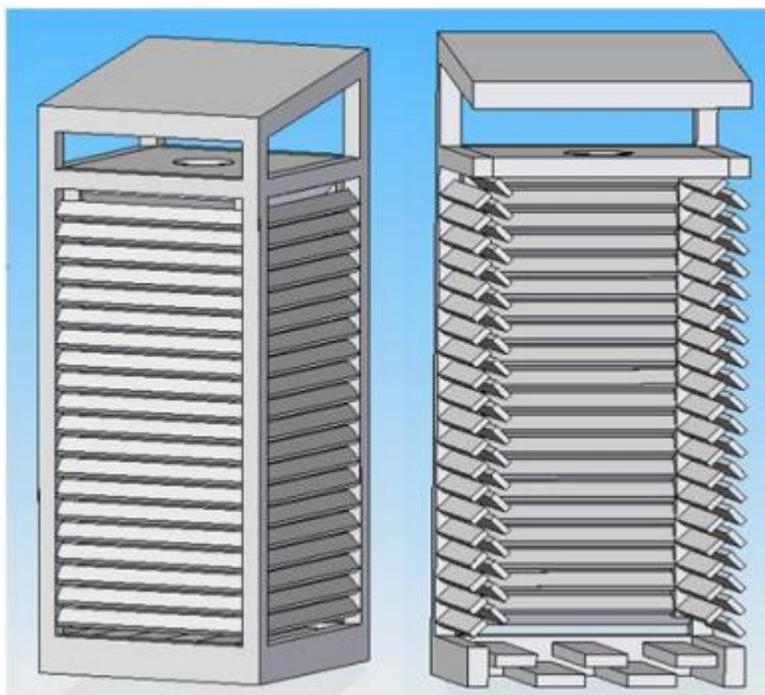


Figura 23 Modelo garita de Stevenson

Fuente: (Díaz, 2012)

En el estudio realizado por (Díaz, 2012) concluye que las garitas de menores dimensiones y pintadas de blanco tienen mejores prestaciones, es decir que reproducen con mayor fidelidad la temperatura exterior en el interior de la garita meteorológica.

La puerta principal debe colocarse dependiendo el hemisferio en el que se encuentre para no recibir los rayos directos del sol al abrirla. Al estar ubicados muy cerca de la mitad del mundo, donde se divide el hemisferio norte y hemisferio sur, la ubicación de la puerta no influye directamente, sin embargo, se la colocó hacia el hemisferio norte ya que la ciudad de Ibarra se encuentra en $0^{\circ}21'06''$ N.

El abrigo meteorológico creado para este proyecto está construido enteramente de madera, pintada de blanco por fuera y por dentro, montada sobre una base de madera. Las dimensiones del abrigo se muestran a continuación:

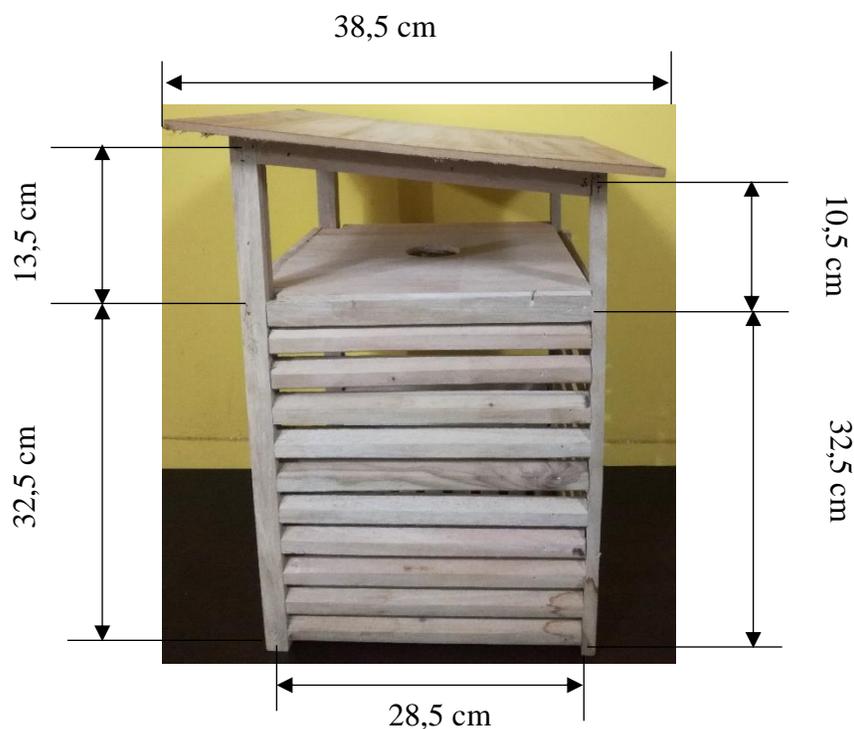


Figura 24 Dimensiones garita de Stevenson

5.4 Estudio de los sensores utilizados

Los sensores utilizados en la estación meteorológica son el sensor de temperatura, sensor de humedad, sensor de radiación solar y un anemómetro de construcción casera. En el terreno se ubicará un sensor de humedad para determinar la cantidad aproximada de agua que existe bajo la superficie. Adicionalmente se utilizará un sensor lluvia para detectar la presencia de precipitaciones en el lugar. Todos estos instrumentos serán utilizados en el diseño del controlador del sistema de irrigación inteligente.

5.4.1 Sensor de Temperatura

Se ha elegido el sensor de temperatura LM35, con las siguientes características:

Así, para una temperatura de 25°C tendremos un V_{salida} igual a 250 mV, convirtiendo a una salida digital tendremos:

$$\text{ADC} = 250 \times 10^{-3} \times \frac{4095}{3}$$

$$\text{ADC} = 341$$

El valor de salida del conversor ADC será una variable de entrada para realizar el controlador difuso.

5.4.2 Sensor Humedad Relativa

El sensor de humedad relativa es el HIH-4030 con las siguientes características:

- Carcasa de plástico termoendurecida
- Salida de voltaje lineal vs % Humedad relativa (RH)
- Consumo bajo de potencia
- Tiempo rápido de respuesta (70ms)
- Rendimiento estable
- Resistencia química



Figura 26 Sensor de humedad HIH-4030
Fuente: SparkFun Electronics

Este sensor nos entrega una salida análoga donde se relaciona el porcentaje de humedad relativa frente al voltaje de salida. En la figura 18 se puede observar la curva de salida típica de voltaje frente a la humedad relativa, donde se puede determinar la ecuación de la curva la cual nos permite calcular el voltaje de salida dado un valor de humedad, como se muestra en la ecuación 9.

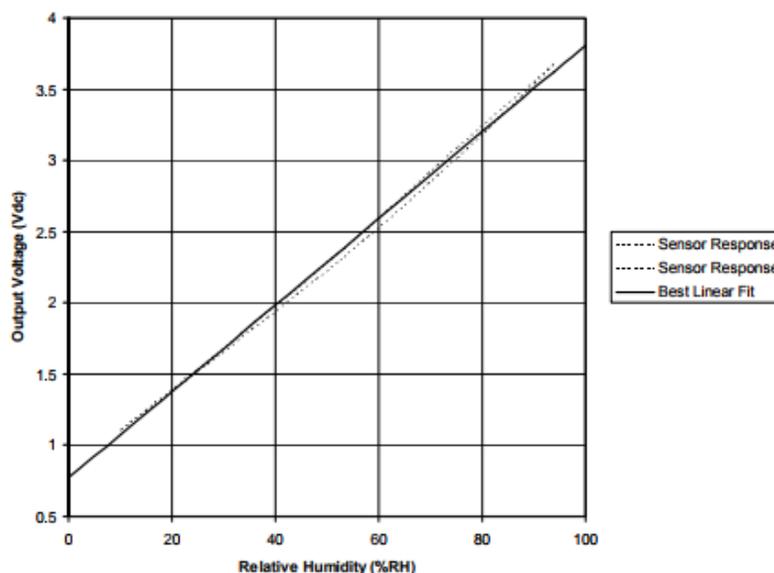


Figura 27 Salida típica de voltaje vs humedad relativa

Fuente: (Honeywell, 2008)

$$V_{\text{salida}} = V_{\text{alimentación}} \times (0.0062 \times \text{sensor RH} + 0.16) \quad (9)$$

Esta señal de salida análoga será necesario convertirla a una señal digital mediante:

$$\text{ADC} = V_{\text{salida}} \times \frac{4095}{V_{\text{ref}}} \quad (10)$$

donde:

ADC: valor entregado por el conversor análogo a digital.

V_{salida} : es el voltaje entregado por el sensor HIH-4030

V_{ref} : voltaje de referencia del conversor Análogo-Digital (ADC) de la tarjeta STM32F4, correspondiente al valor de 3V.

4095: resolución del ADC de la tarjeta STM32F4.

Así, para 60% de humedad relativa tendremos un V_{salida} igual a 2,66 V, convirtiendo a una salida digital tendremos:

$$ADC = 1.5 \times \frac{4095}{3}$$

$$ADC = 2047$$

El valor de salida del conversor ADC será una variable de entrada para realizar el controlador difuso.

5.4.3 Sensor de Radiación Solar

Se trabajo con el sensor ML8511, el cual presenta las siguientes características:

- Fotodiodo sensible a rayos UV-A y UV-B
- Amplificador operacional integrado
- Salida de voltaje analógico
- Baja corriente de alimentación 300 μ A y corriente en espera de 0.1 μ A
- Placa de montaje muy pequeña (1.5 x 1.5 cm)
- Ideal para uso en estaciones meteorológicas

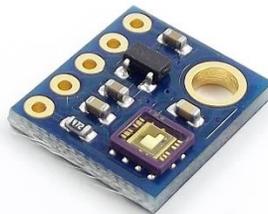


Figura 28 Sensor de radiación solar ML8511

Fuente: Maker Electronico

Este sensor entrega una salida análoga donde se relaciona la intensidad de rayos ultravioletas frente al voltaje de salida con un voltaje de alimentación de 3V, dependiendo la temperatura en la cual funciona el sensor se tiene diferentes curvas como se muestra en la figura 17. En este proyecto se tomó en cuenta la curva correspondiente a 25 °C (violeta). Para determinar el índice de radiación dado el voltaje de salida entregado por este sensor.

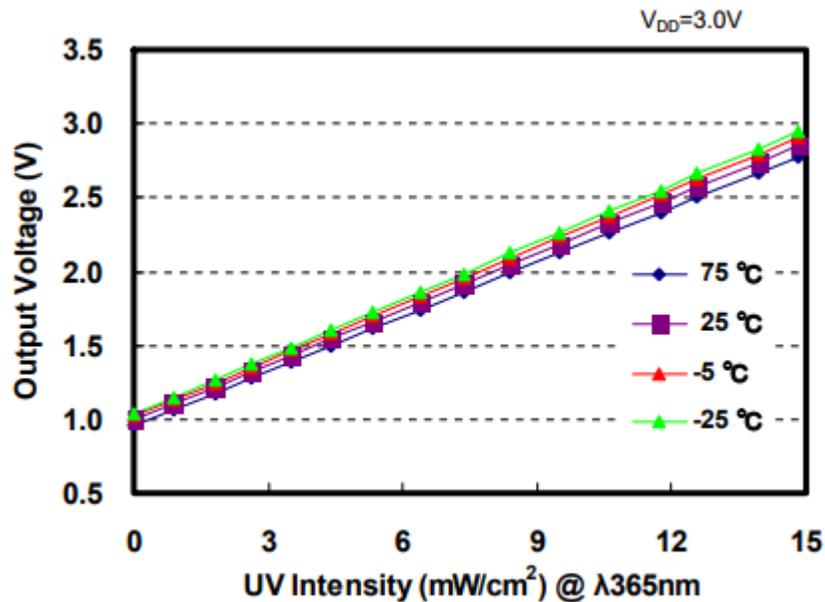


Figura 29 Salida Voltaje vs Intensidad UV

Fuente: (LAPIS Semiconductor, 2013)

Al entregar una salida analógica, será necesario convertirla a una señal digital mediante:

$$ADC = V_{salida} \times \frac{4095}{V_{ref}} \quad (11)$$

donde:

ADC: valor entregado por el conversor análogo a digital.

V_{salida} : es el voltaje entregado por el sensor ML8511

V_{ref} : voltaje de referencia del conversor Análogo-Digital (ADC) de la tarjeta STM32F4, correspondiente al valor de 3V.

4095: resolución del ADC de la tarjeta STM32F4.

Así, para un índice UV igual a 0 un V_{salida} igual a 1 V, convirtiendo a una salida digital tendremos:

$$\text{ADC} = 1 \times \frac{4095}{3.3}$$

$$\text{ADC} = 1365$$

El valor de salida del conversor ADC será una variable de entrada para realizar el controlador difuso.

5.4.4 Sensor de Lluvia

Se eligió el sensor de lluvia FC-37, con las siguientes características:

- Hecho de material de alta calidad
- Placa de PBC de 3.2cm x 1.4xm
- Placa de níquel de 5cm x 4cm
- Anti-oxidación, para largo tiempo de uso
- Capacidad de conducción de 15 mA
- Capacidad de ajuste de sensibilidad determinado por la salida y el voltaje de alimentación.
- Voltaje de alimentación entre 3V y 5V
- Voltaje de salida análoga y digital
- Montaje de fácil instalación
- Utiliza el comparador de voltaje LM393



Figura 30 Sensor de lluvia FC-37
Fuente: Electronilab

Cuando existe presencia de agua la resistencia en la placa aumenta y el voltaje disminuye, si no existe presencia de agua la resistencia es baja y el voltaje de salida es alto.

Se optó por trabajar con la señal de salida análoga para luego transformarla a una señal digital mediante el ADC de la tarjeta STM32F4 mediante:

$$ADC = V_{salida} \times \frac{4095}{V_{ref}}$$

donde:

ADC: valor entregado por el conversor análogo a digital.

V_{salida} : es el voltaje entregado por el sensor FC-37

V_{ref} : voltaje de referencia del conversor Análogo-Digital (ADC) de la tarjeta STM32F4, correspondiente al valor de 3V.

4095: resolución del ADC de la tarjeta STM32F4.

Así, en caso de presencia de lluvia tendremos un V_{salida} igual a 3 V, convirtiendo a una salida digital tendremos:

$$ADC = 2.97 \times \frac{4095}{3}$$

$$ADC = 4054$$

El valor de salida del conversor ADC formará parte del controlador de riego.

5.4.5 Sensor de Humedad

Se eligió el sensor de humedad FC-28, el cual será enterrado a 40cm de la superficie del terreno, este sensor cuenta con las siguientes características:

- Voltaje de alimentación de 3V a 5V
- Salida analógica y digital
- Capacidad de ajuste de sensibilidad determinado por la salida y el voltaje de alimentación
- Placa de 6x20mm y contactos de 45mm

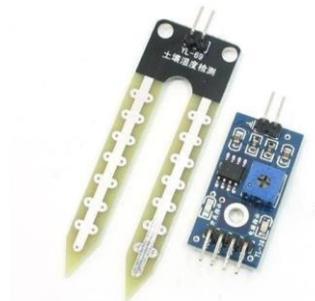


Figura 31 Sensor de humedad FC-28
Fuente: Electrónica SMDSC

Este sensor consiste en dos placas separadas entre sí por una distancia determinada, cubiertas por un material conductor, al existir humedad presente en el suelo, se creará un puente entre las placas detectado por un circuito de control dotado con un amplificador de voltaje LM393, el cual transforma la conductividad presente en el suelo en una señal de voltaje.

Al igual que el sensor de lluvia FC-37 se trabajó con la señal de salida análoga para luego transformarla a una señal digital mediante el ADC de la tarjeta STM32F4 mediante:

$$ADC = V_{salida} \times \frac{4095}{V_{ref}}$$

donde:

ADC: valor entregado por el conversor análogo a digital.

V_{salida} : es el voltaje entregado por el sensor FC-28

V_{ref} : voltaje de referencia del conversor Análogo-Digital (ADC) de la tarjeta STM32F4, correspondiente al valor de 3.3V.

4095: resolución del ADC de la tarjeta STM32F4.

Así, en caso de presencia de humedad tendremos un V_{salida} igual a 2 V, convirtiendo a una salida digital tendremos:

$$ADC = 2 \times \frac{4095}{3}$$

$$ADC = 2730$$

El valor de salida del conversor ADC formará parte del controlador de riego.

5.5 Estudio de las variables de la Estación Meteorológica

Las variables climáticas medidas en la estación meteorológica son:

- **Temperatura:** es una magnitud que describe el estado de la atmósfera, variable durante el día y la noche, medida generalmente en grados Celsius. Para que las medidas sean correctas es importante que el sensor de temperatura se encuentre protegido de precipitaciones y radiación solar directa, con una buena ventilación (OMM, 2004). El rango de temperaturas máximas y mínimas permite a los meteorólogos realizar predicciones

del tiempo junto con otras variables climáticas (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, 2004).

- **Humedad:** es la cantidad de agua presente en el aire la cual depende de varios factores como la temperatura, radiación solar, lluvia, altitud, etc. Generalmente el tipo de humedad más utilizada es la humedad relativa la cual se expresa en %, representando la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener una masa de aire, antes de que esta se sature y se convierta en agua líquida (Sarochar, 2017).
- **Viento:** es el movimiento del aire de un lugar a otro, generalmente se produce al existir un cambio de presión o temperatura en la atmósfera (Inzunza, 2006). Para medir la velocidad del viento se suele utilizar un anemómetro, el cual mediante el giro de las veletas por acción del viento mide la velocidad del viento en m/s o km/h (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, 2004).
- **Radiación solar:** hace referencia a la energía transferida por ondas electromagnéticas a la tierra provenientes del sol, generalmente para su medición se hace referencia al índice de radiación comprendido entre 0 para más bajo y 15 para más alto (Agencia Estatal de Meteorología, 2015). En días muy soleados y con poca humedad el índice de radiación puede llegar hasta 15, siendo este índice considerado como muy alto y peligroso para la salud (Inamhi).

Tomando en cuenta que el desarrollo del cultivo será entre el mes de diciembre y el mes de marzo, se tomará en cuenta los valores de las variables climáticas en estos meses en la ciudad de Ibarra. Cada sensor nos entregará una salida analógica aproximada para cada valor registrado.

En cuanto a temperatura se tiene:

Tabla 7*Temperatura vs Valor sensor*

Mes	Temperatura mínima	Valor sensor	Temperatura máxima	Valor sensor
Diciembre	9 °C	90 mV	20 °C	200 mV
Enero	7 °C	70 mV	20 °C	200 mV
Febrero	8 °C	80 mV	21 °C	210 mV
Marzo	7 °C	70 mV	19 °C	190 mV

Fuente: Temperatura (Freemeteo, s.f.)

Para la humedad relativa se tiene:

Tabla 8*Humedad relativa vs valor del sensor*

Mes	Humedad %	Valor sensor
Diciembre	80 %	1.97 V
Enero	74 %	1.85 V
Febrero	84 %	2.04 V
Marzo	90 %	2.15 V

Fuente: Humedad (Freemeteo, s.f.)

Para la velocidad del viento se tiene:

Tabla 9*Velocidad del viento vs valor del sensor*

Mes	Viento	Valor sensor
Diciembre	15 km/h	30 mV
Enero	23 km/h	46 mV
Febrero	22 km/h	44 mV
Marzo	19 km/h	38 mV

Fuente: Viento (Freemeteo, s.f.)

Para el caso de la radiación solar no existe un registro mensual exacto de los niveles de radiación, tomando en cuenta los informes de alerta de niveles de radiación del Instituto Nacional de

Meteorología e Hidrología (INAMHI), los niveles de radiación solar máximo en estos meses fueron de 14 puntos.

Tabla 10

Radiación solar vs valor del sensor

Mes	Radiación mínima	Valor sensor	Radiación máxima	Valor sensor
Diciembre	0	1 V	14	2.7 V
Enero	0	1 V	14	2.7 V
Febrero	0	1 V	14	2.7 V
Marzo	0	1 V	14	2.7 V

Los valores de voltaje de las variables climáticas obtenidos de cada sensor serán utilizados en el desarrollo de la lógica difusa.

5.6 Desarrollo de la lógica de Control

La lógica de control para el diseño del controlador de riego se basa en que se debe regar el cultivo cuando las condiciones ambientales sean favorables y cuando exista falta de humedad en el suelo para evitar la marchitez en la planta. Para desarrollar el controlador de riego se recurrió al uso de un controlador difuso que determine el cielo predominante o grado de nubosidad en la zona mediante la información entregada por la estación meteorológica; y al uso de sensores de humedad y lluvia para que juntamente con el controlador difuso formen el controlador de riego.

5.6.1 Diseño de la lógica difusa para redcir el cielo predominante

La lógica difusa permite trabajar con información que no es exacta o imprecisa, analizando información difícil de definir para otros controladores convencionales. La información puede contener valores intermedios acotada por los valores de falso y verdadero.

En el diseño de la predicción mediante lógica difusa es importante que el diseñador tenga amplios conocimientos o experiencia para que pueda realizar la base de conocimientos o reglas, apoyado en funciones de pertenencia triangulares, trapezoidales o gaussianas, para poder entregar una salida más precisa frente a sistemas convencionales.

Para el diseño del controlador difuso las variables de entrada fueron los datos enviados por los instrumentos de la estación meteorológica: sensor de temperatura, sensor de humedad, sensor de radiación solar y anemómetro; y la salida de este controlador será el cielo predominante o porcentaje de nubosidad en la zona donde se implementó el proyecto.

Se utilizó la herramienta Fuzzy Logic Designer de Matlab para el diseño del controlador, siguiendo los siguientes puntos.

Definición de variables lingüísticas

Una variable lingüística hace referencia a una unidad de análisis que representa el conocimiento del diseñador con respecto a un tema específico. En referencia a los elementos que conforman la estación meteorológica se ha determinado 4 variables lingüísticas que representan las entradas del controlador:

- Humedad
- Temperatura
- Radiación solar
- Velocidad del viento

Para el caso de la salida se tendrá el Cielo Predominante en la zona, esto debido a que dependiendo del valor de esta variable y de otros parámetros se procederá o no a regar el cultivo de fréjol.

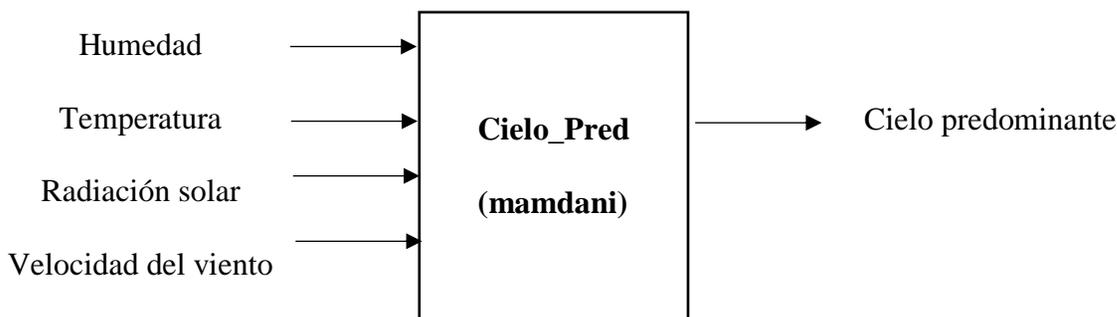


Figura 32 Definición de variables de entrada y salida

Definición de Valores lingüísticos

Una vez definidas las variables lingüísticas de entrada y salida del controlador difuso se procede a la división de las mismas, determinada por valores lingüísticos, los cuales representen la división tanto de los espacios de las variables de entrada como el de salida.

Para determinar los valores lingüísticos se ha tomado en cuenta referencias de datos tomados por estaciones meteorológicas para la ciudad de Ibarra, estos datos nos dan un rango máximo y mínimo diario para cada variable climática. Para mejorar la respuesta del controlador difuso en cuanto al cielo predominante en la zona, se ha determinado utilizar 3 valores lingüísticos para la humedad, temperatura y radiación solar y viento. Debido a que existía una gran variación de velocidad del viento proporcionados por el anemómetro, no se determinó un rango medio ya que, al tener gran variación de este valor, afectaba en el diseño del controlador dando valores imprecisos a la salida, utilizando así únicamente 2 variables lingüísticas en representación de la velocidad del viento.

El uso de más valores lingüísticos significaba un excesivo conjunto de reglas, ya que se tienen 4 variables de entrada, con lo cual el diseño del controlador no era viable.

Para determinar el rango de cada valor lingüístico se tomaron los datos de las variables meteorológicas durante 100 días, correspondientes a los días de los meses en que se desarrolla el cultivo. Se tomó los valores máximos y mínimos de cada variable, luego se calculó el valor medio, para cada día. Una vez determinados los valores mínimos, medios y máximos para cada variable, se tomaron los valores límites de cada valor mínimo, medio y máximo. Un ejemplo de la determinación del rango de cada valor lingüístico se observa en la tabla 11 para 10 días para la temperatura. Los valores para cada variable lingüísticas de las entradas se presentan en la tabla 11.

Tabla 11

Ejemplo determinación rango de valores lingüísticos

Día	Temperatura mínima	Temperatura media	Temperatura máxima
1	12	16.5	21
2	10	16	22
3	6	12	18
4	8	17	26
5	13	15.5	18
6	10	15.5	21
7	13	19	25
8	11	16.5	22
9	8	16	24
10	7	13.5	20

En la tabla 11 se puede observar que los límites de temperatura mínima son de 6-13, para temperatura media se tiene 12-19 y para temperatura máxima de 18-26.

Para cada variable climática se realizó un proceso similar para determinar los rangos de las variables lingüísticas mostrados en la tabla 12.

Tabla 12*Valores lingüísticos para las variables de entrada*

Variable	Valor Lingüístico	Rango	
Humedad	Baja	32 %	61%
	Media	58%	92%
	Alta	90%	100 %
Temperatura	Baja	6 °C	13 °C
	Media	11 °C	19 °C
	Alta	18 °C	26 °C
Velocidad Viento	Baja	0 km/h	15 km/h
	Alta	13 km/h	30 km/h
Radiación solar	Baja	0	5
	Media	4	10
	Alta	8	15

Para el caso de la variable de salida, mediante un estudio previo con el análisis de las variables de entrada se determinó los valores lingüísticos mostrados en la tabla 13. Estos valores hacen referencia al porcentaje de nubosidad y a un estudio previo de interpretación de cielo mediante la nubosidad.

Un cielo despejado no tendrá nubes de gran tamaño, un cielo poco nuboso tendrá gran cantidad de nubes pero sin contenido de agua en estas (tonalidad blanca), un cielo nuboso tendrá gran cantidad de nubes pero con algunas gotas de agua en estas (tonalidad gris claro) y para un cielo muy nuboso se tendrá gran cantidad de nubes con muchas gotas de agua en su interior (tonalidad gris oscuro).

La lógica difusa tiene la única finalidad de determinar una predicción en cuanto al cielo predominante. Es por esto que en este trabajo el rango de salida es entre 0 y 1 representando el porcentaje de nubosidad con relación al cielo predominante en la zona. Es decir que entre 0% y 25% de

nubosidad tendremos un cielo despejado, entre 20% y 50% tendremos un cielo poco nuboso, entre 45% y 75% tendremos un cielo nuboso y entre 70% y 100% tendremos un cielo muy nuboso.

La superposición de valores entre cada tipo de cielo se la realizó con un valor del 5%, esto debido a que el paso entre los tipos de cielo no siempre ocurren inmediatamente, es decir que entre cielo despejado y cielo nuboso, existirá un tiempo prudente para cambiar de un cielo a otro tipo de cielo predominante.

Tabla 13

Valores lingüísticos para la variable de salida

Variable	Valor Lingüístico	Rango	
Cielo predominante	Despejado	0.00	0.25
	Poco Nuboso	0.20	0.50
	Nuboso	0.45	0.75
	Muy Nuboso	0.70	1.00

Luego de determinar los rangos de los valores lingüísticos para cada variable fue necesario realizar una conversión de datos, ya que cada instrumento de la estación meteorológica entrega el valor medido con una salida de voltaje analógica, el cual mediante el conversor ADC de la tarjeta STM32F4 entregará el valor digital, este valor será ingresado al diseño de la lógica difusa. El conversor ADC de la tarjeta STM32F4 tiene una resolución de 12 bits, con lo cual no existe gran pérdida de datos en comparación a conversores de otras tarjetas de desarrollo como Arduino.

Tabla 14

Rango de Valores lingüísticos en valor digital

Variable	Etiqueta Lingüística	Rango Salida ADC	
Humedad	Baja	1467	2203
	Media	2128	2990
	Alta	2940	3194
Temperatura	Baja	82	177

CONTINÚA 

	Media	150	259
	Alta	245	355
Velocidad	Baja	0	37
Viento	Alta	29	74
	Baja	1365	2184
Radiación solar	Media	2047	3071
	Alta	2730	3822

Selección del número y forma de las funciones de membresía

Una función de membresía hace referencia a la representación del grado de membresía de los valores lingüísticos en los conjuntos difusos mediante una función. Existen funciones de membresía trapezoidales, triangulares, sigmoidales, etc.

Para la selección del número y forma de las funciones de membresía no existe un método específico o reglas que determinen la función más adecuada; sin embargo, en varios controladores es común seleccionar un número impar de funciones de membresía ya sea trapezoidales o triangulares.

Cuando no existe cruce entre las funciones de membresía en un sistema difuso, se puede decir que se representa a un sistema basado en lógica convencional. Es por esto que, en la definición del rango de los valores lingüísticos se ha tomado en cuenta esta premisa realizando el estudio de las variables climáticas como se indica en el ejemplo mostrado en la tabla 11, de los meses en que se desarrollará el cultivo para determinar los rangos correctos y así obtener un mejor rendimiento del sistema.

Considerando lo mencionado en el párrafo anterior, a continuación, se muestran las gráficas de las funciones de membresía para cada variable de entrada y de salida.

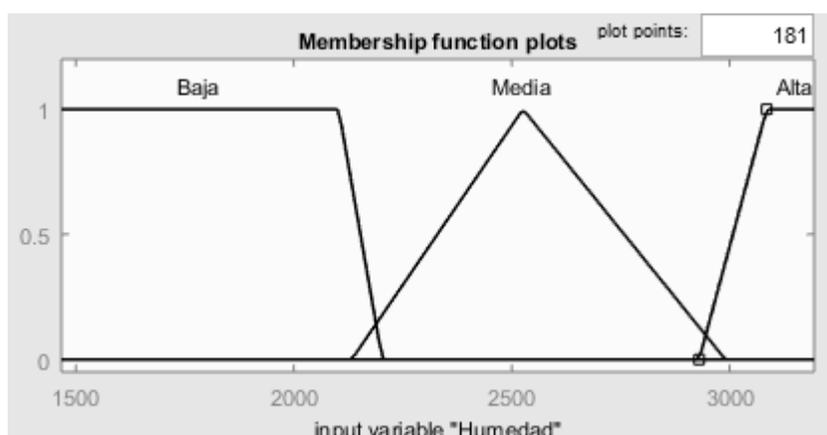


Figura 33 Funciones de Membresía para Humedad

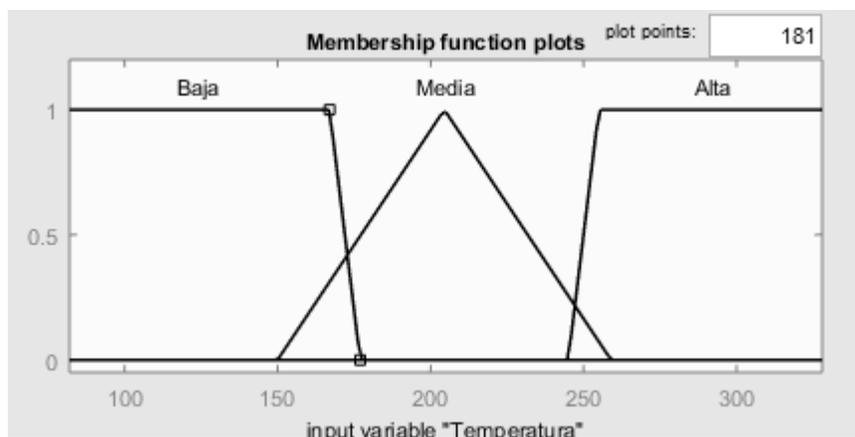


Figura 34 Funciones de membresía para Temperatura

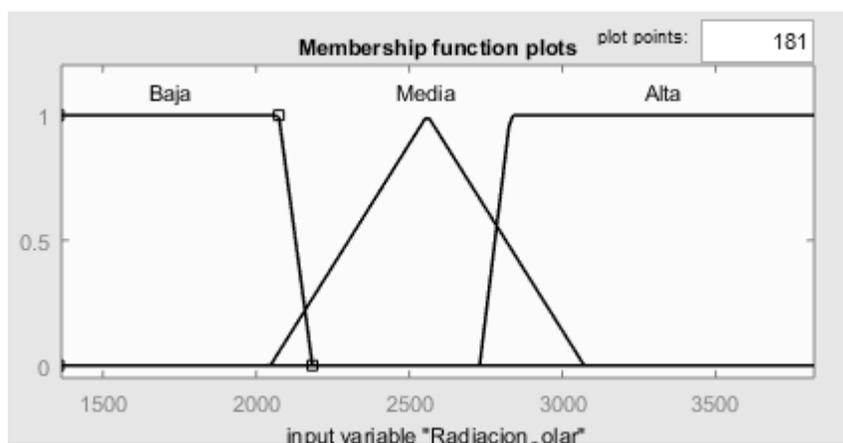


Figura 35 Función de membresía para Radiación Solar

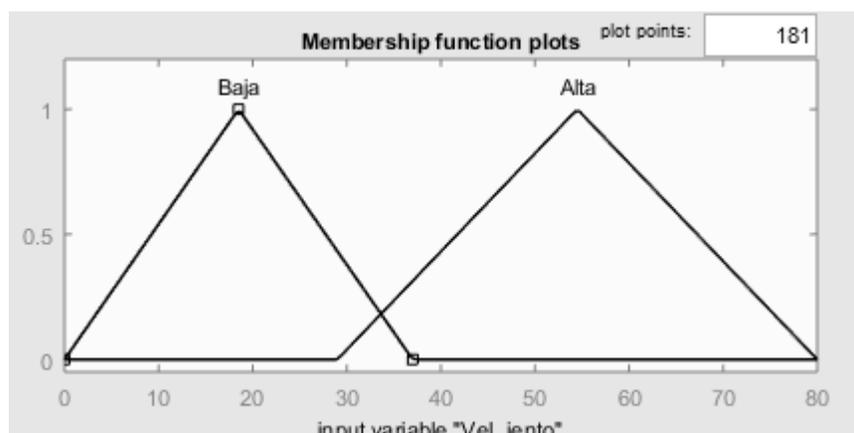


Figura 36 Funciones de membresía para Velocidad del viento

Para la salida, Cielo predominante, el gráfico de las funciones de membresía es el siguiente:

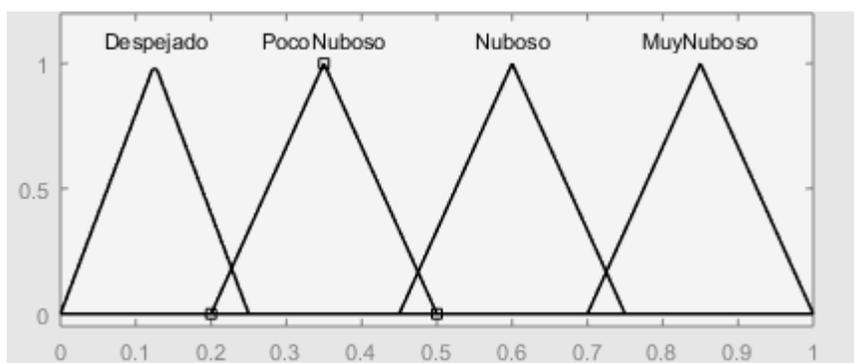


Figura 37 Funciones de membresía Cielo Predominante

El valor del tipo de cielo predominante en la zona es utilizado para determinar si es conveniente o no el riego, es decir si existe un cielo despejado no se procederá a regar ya que al existir una temperatura y radiación alta al aplicar agua al cultivo ésta se evaporará de forma más rápida, además puede provocar formaciones de plagas en el cultivo. Por lo que, el tipo de cielo predominante más ideal será el “poco nuboso” o “nuboso” con poca temperatura y radiación, que permitan regar el cultivo sin la preocupación de una evapotranspiración alta y con menos posibilidades para la formación de plagas. En caso de tener un cielo “muy nuboso” tampoco será conveniente regar ya

que al existir una temperatura baja, humedad alta y la velocidad del viento alta puede existir peligro de helada en el cultivo y además un pronóstico de lluvia en la zona.

Tabla 15

Condiciones de riego

Condición	Regar	Comentarios
Despejado	NO	Evaporación alta, hojas quemadas por efecto lupa, plagas
Poco Nuboso	SI	Mayor absorción de agua, evaporación baja
Nuboso	SI	Mayor absorción de agua, evaporación muy baja
Muy Nuboso	NO	Próximo a lluvia, heladas, hongos

Escritura de reglas

Para realizar la escritura de reglas es importante tener una base de conocimientos la cual es el punto de partida para la generación del conjunto de reglas, con las cuales se podrá determinar el tipo de cielo predominante o porcentaje de nubosidad en la zona de acuerdo con las diferentes variables climáticas. El conocimiento para realizar la escritura de reglas resulta de investigaciones y consultas (Del Brio & Sanz, 2002) con respecto a meteorología en cuanto a predicción del clima y nubosidad en el cielo mediante el estudio y procesamiento de datos de diferentes variables climáticas como la humedad, temperatura, radiación solar y velocidad del viento. Estas consultas se las realizó mediante el estudio de trabajos, revistas e investigaciones sobre meteorología e informes que mencionan el comportamiento clima en Ecuador. Las investigaciones también se dieron mediante consultas a un técnico del INAMHI, al técnico Miguel Carlosama de Tecno-Riegos, a un técnico de riego de E.R.O. Riegos y a 2 agricultores, al Sr. Wilson Quiña y al Sr. Juan Pablo Gómez.

Tomando en cuenta el estudio realizado se determinó aproximadamente que para una temperatura alta no se podrá tener una radiación baja, no se tendrá una humedad alta para una radiación alta, no se podrá tener una humedad alta y temperatura alta y no se podrá tener una temperatura baja y humedad baja. Esto sirvió para reducir reglas innecesarias que afecten al rendimiento del controlador.

Tabla 16

Reglas del sistema de predicción de cielo predominante

Humedad	Temperatura	Radiación	Velocidad viento	Cielo predominante
Baja	Alta	Alta	Baja	Despejado
Baja	Media	Alta	Baja	
Baja	Media	Alta	Alta	
Baja	Media	Media	Alta	
Baja	Media	Media	Baja	
Baja	Alta	Alta	Alta	
Media	Alta	Media	Alta	
Media	Alta	Media	Baja	
Media	Alta	Alta	Baja	
Media	Alta	Alta	Alta	
Media	Media	Baja	Baja	Poco nuboso
Media	Media	Media	Baja	
Media	Media	Baja	Alta	
Media	Media	Media	Alta	
Media	Baja	Alta	Baja	
Media	Baja	Alta	Alta	
Alta	Media	Baja	Baja	Nuboso
Alta	Media	Baja	Alta	
Alta	Media	Media	Baja	
Alta	Media	Media	Alta	
Alta	Baja	Baja	Alta	Muy nuboso
Alta	Baja	Baja	Baja	

Estas reglas serán ingresadas en la herramienta Fuzzy Logic Designer juntamente con las variables de entrada y salida con sus respectivos valores lingüísticos para así obtener el controlador difuso que determina el cielo predominante o porcentaje de nubosidad en la zona donde se implementó el proyecto.

5.6.2 Diseño del Controlador de riego

Una vez realizado el diseño de la lógica difusa para determinación del cielo predominante se procedió a realizar el diseño del controlador de riego, el cual estará compuesto por la lógica difusa, más dos variables externas: humedad del suelo y presencia de lluvia.

El sensor de lluvia entregará un voltaje entre 2.7 V y 3 V cuando no existe presencia de lluvia, y un voltaje entre 0 V y 0.3 V cuando exista presencia de lluvia. Estos valores son convertidos a un valor digital el cual es utilizado para el diseño del controlador de riego.

Para el caso del sensor de humedad del suelo, al no existir una hoja de datos que indique la relación entre la cantidad de humedad frente al voltaje de salida, se realizó pruebas añadiendo 1 litro agua en 1m² de tierra seca, hasta llegar a los 20 litros, para poder obtener datos suficientes y así realizar la curva de voltaje de salida del sensor de acuerdo con la humedad contenida en el suelo (ANEXO F). Esto con el fin de conocer el valor de salida del sensor al tener 69 mm de agua, valor correspondiente a la dosis bruta de riego. Un dato adicional para el diseño del controlador de riego es el Déficit Permisible de Manejo de Riego (DMP) el cual hace referencia al contenido de agua en el suelo el cual no debe bajar del valor de 45% para cultivo de fréjol, con el fin de que la planta no vea afectado su desarrollo por falta de agua.

El controlador de riego se lo realizó en la herramienta Simulink de Matlab. Para el diseño del controlador comprende el uso de:

- Controlador difuso para pronosticar el cielo predominante en la zona
- Sensor de humedad del suelo
- Sensor de lluvia

Con los datos obtenidos de estos elementos se desarrolló el controlador de riego de acuerdo con la siguiente lógica:

- Si la humedad del suelo es igual o menor al Déficit Permisible de Manejo de Riego relacionado a 31,5 mm, si el cielo predominante es “poco nuboso” o “nuboso” y no existe presencia de lluvia, se activará la electroválvula (“abierta”) para permitir el paso de agua hacia el cultivo, hasta que el sensor de humedad determine que la cantidad de agua contenida en el suelo es de 69 mm. Al llegar a este valor la electroválvula pasará al modo “cerrada”.
- En caso de que se esté realizando la acción de riego y repentinamente exista presencia de lluvia, la electroválvula se desactivará (“cerrada”) hasta que nuevamente se cumplan los parámetros del punto anterior.
- Al tener un “cielo despejado” o “muy nuboso”, no se dará paso a regar el cultivo debido a que en estas condiciones la evaporación de agua del suelo y de la planta será mayor, existirá mayor riesgo a presencia de plagas.
- Al tener un cielo muy nuboso, no se dará paso a regar el cultivo, ya que posiblemente exista presencia de lluvia y si se procede al riego puede existir un estrés hídrico en el suelo o además debido a las bajas temperaturas puede existir mayor riesgo a la formación de hongos y heladas.

En la figura 38 se presenta de forma general el funcionamiento del sistema.

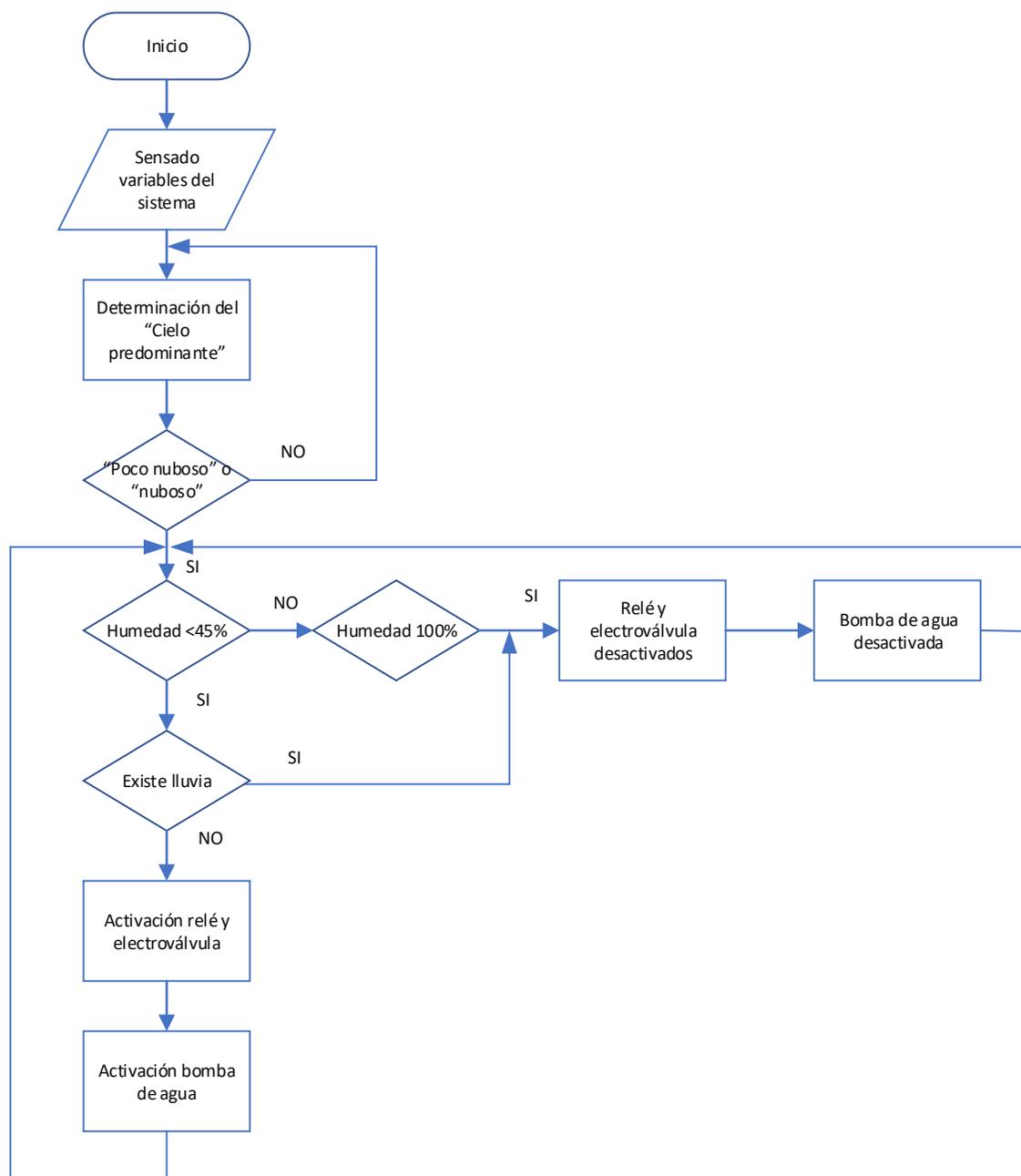


Figura 38 Diagrama flujo del funcionamiento del sistema

En la siguiente figura 39 se puede observar la lógica de control para el controlador de riego realizada en Simulink.

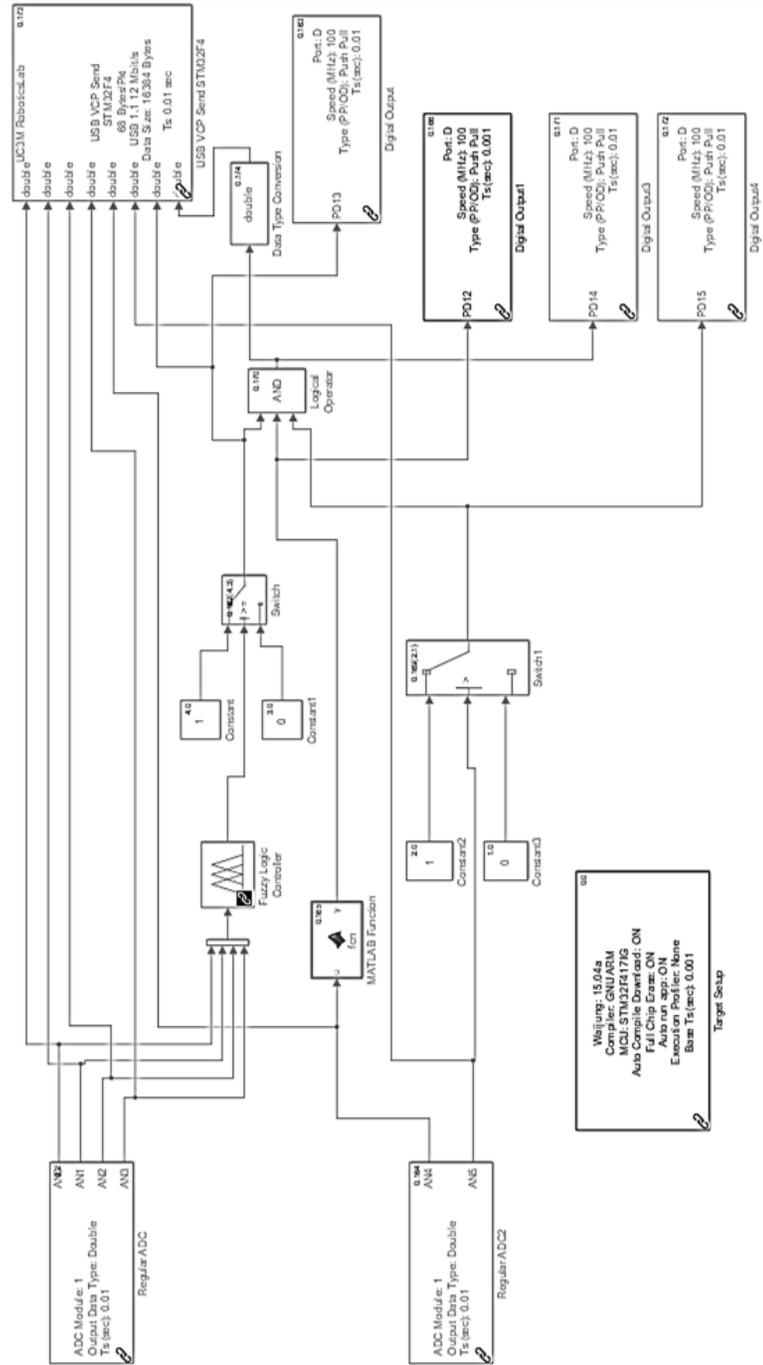


Figura 39 Controlador de riego

5.7 Diseño de la Interfaz Gráfica

El diseño de la interfaz gráfica se la realizó en Matlab, ya que mediante un puerto serial virtual entre la tarjeta STM32F4 y Simulink, es posible la comunicación en tiempo real con el fin de observar las lecturas tomadas por los sensores de humedad relativa, humedad del suelo, temperatura, radiación solar y el anemómetro.

Para el diseño de la interfaz se realizó un estudio la norma ISA-101, la cual menciona que una interfaz gráfica tiene el objeto de:

- Revisar operaciones
- Realizar mantenimientos
- Revisar de procesos
- Dar seguridad ante incidentes

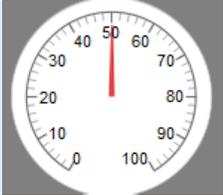
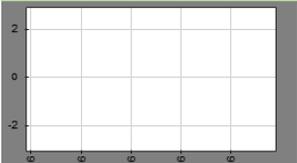
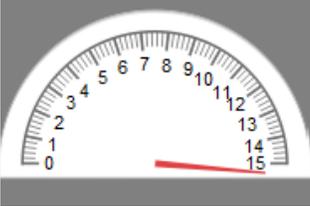
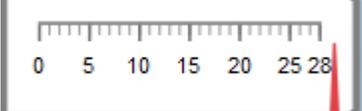
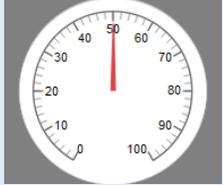
Además, la interfaz debe tener consistencia en los colores, es decir que no cause estrés visual, de fácil navegación y con objetos animados. En cuanto al uso del color como fondo de la interfaz se recomienda utilizar el color gris para minimizar el deslumbramiento y proporcionar un bajo contraste. Los colores brillantes solo deben usarse para resaltar alarmas y situaciones anormales y los colores que se usan para las alarmas no se deben usar en otro lado.

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas de la norma ISA-101 se diseñó la interfaz gráfica la cual cuenta con la visualización de las lecturas de humedad, temperatura, radiación solar y velocidad del viento, esto en referencia a los datos obtenidos por la estación meteorológica. Otra variable que se muestra en la interfaz es la variable de humedad del suelo, la cual es importante para conocer el porcentaje aproximado de humedad de agua contenida en el suelo. Por último, se

consideró la variable de encendido/apagado del sistema, el cual mediante una lámpara indicará si se ha procedido a regar el cultivo.

Tabla 17

Objetos de la Interfaz Gráfica

Indicador	Variable	Rango
	Humedad relativa	0-100 (%)
	Velocidad del viento	0-15 (km/h)
	Radiación solar	1-15
	Temperatura	0-28 (°C)
	Humedad del suelo	0-100 (%)
	Estado del sistema	Encendido/apagado

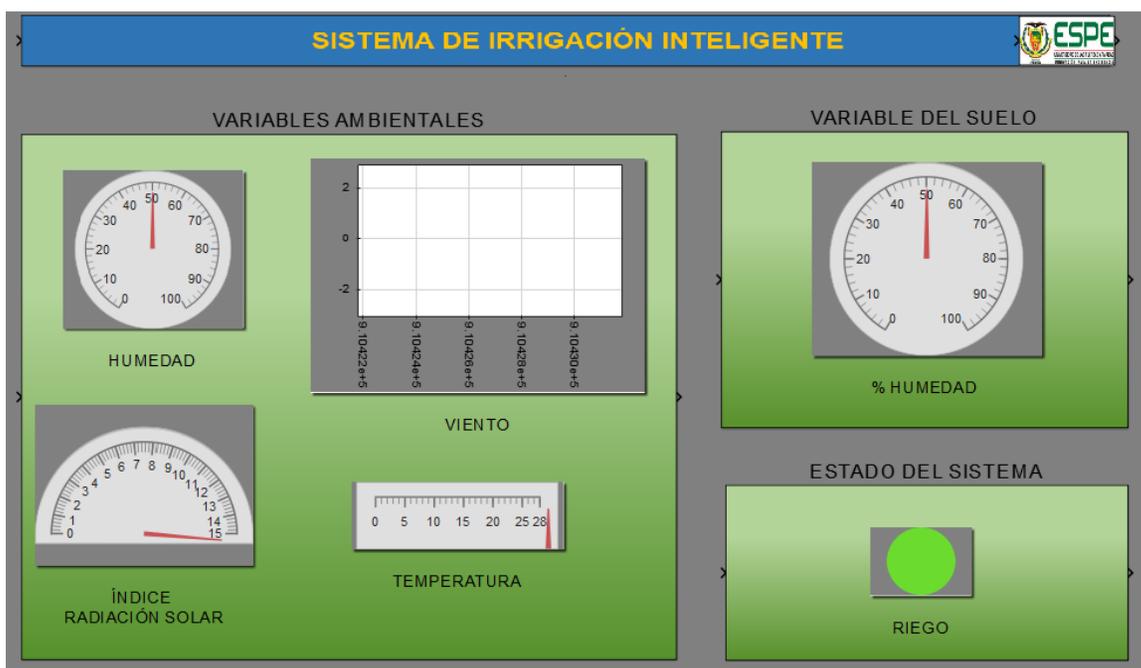


Figura 40 Interfaz gráfica del sistema de irrigación inteligente

La interfaz gráfica mostrada en la figura 40, tiene el objetivo de que el usuario pueda visualizar en tiempo real las variables de humedad, temperatura, viento, índice de radiación solar, temperatura y humedad del suelo, adicionalmente se puede visualizar el estado del sistema, es decir si se está regando o no el cultivo. Los indicadores agrupan una visualización de las variables más importantes del con el fin de conocer el funcionamiento sistema sin sobrecargar la pantalla de la interfaz para evitar confusiones por parte del usuario.

CAPITULO V

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

6.1 Introducción

En este capítulo se detallan los componentes utilizados en la implementación del sistema de irrigación inteligente, el procedimiento para el montaje del sistema hídrico de riego, la estación meteorológica, sensor de humedad y lluvia y el controlador de riego para el cultivo de fréjol.

6.2 Elementos de riego

Para la implementación del sistema de irrigación inteligente se necesitan elementos o dispositivos electrónicos, mencionados en el capítulo anterior, y elementos de riego, los cuales serán encargados de llevar el agua desde la fuente o reservorio de agua, hasta el cultivo. El tipo de sistema de riego elegido fue de goteo, por presentar la mayor eficiencia de aplicación de agua; para la implementación de este sistema de goteo se consideraron 3 unidades fundamentales:

1. Cabezal de riego
2. Red de conducción y distribución
3. Emisores

Para cada unidad mencionada se necesitan los siguientes elementos:

Tabla 18

Elementos del sistema de riego por goteo

Unidad	Elementos
Cabezal de riego	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba de agua de 1 hp • Tanque hidroneumático • Interruptor de presión • Conector de 3 vías • Filtro de anillos de 3/4''

CONTINÚA 

	<ul style="list-style-type: none"> • Acople tipo rosca 1'' macho • Acople tipo rosca 1'' hembra • Buje reductor • Abrazaderas de ¾'' • Neplo liso 1'' de 10 cm • Neplo corrido 1'' • Válvula de bola de ¾'' • Válvula antiretorno • Electroválvula
Red de conducción y distribución	<ul style="list-style-type: none"> • Tubos de PVC de 25 mm • Acoples de PVC de 25 mm • Codos de 25 mm • Manguera de Polietileno de ¾'' • Conector inicial 12 mm • Manguera ciega 12-4 bar
Emisores	<ul style="list-style-type: none"> • Conector dentado doble de 16 mm • Manguera de goteo 12 mm autocompensada 2 agujeros • Final de 12 mm

Para la instalación de las diferentes unidades se necesitan los siguientes elementos:

- Cable eléctrico 12 AWG
- Teflón
- Limpiador de tubería
- Pegante de tubería
- Sierra de metal
- Estilete

- Perforador para manguera

6.3 Instalación del sistema de irrigación inteligente

Para la instalación del sistema de irrigación inteligente se siguieron los siguientes pasos:

6.3.1 Montaje cabezal de riego

El cabezal de riego es el encargado de proveer de agua al sistema de irrigación. Para el montaje del cabezal de riego se comenzó por el armado del sistema hidroneumático, el cual se compone de la bomba de agua, el interruptor de presión y el tanque hidroneumático. La finalidad del sistema hidroneumático es encender la bomba de agua de modo automático cuando se active la electroválvula para el paso de agua hacia la red de conducción y distribución, es decir, cuando la presión de aire dentro del tanque este por debajo del nivel deseado, el interruptor de presión detectará esta presión, activando la bomba de agua para mantener la presión constante dentro del tanque con el objetivo de que la distribución de agua sea constante.



Figura 41 Sistema hidroneumático

Una vez armado el sistema hidroneumático se procedió a conectar la entrada de este sistema hacia el reservorio o fuente de agua, la cual será la encargada de suministrar agua constante hacia el sistema hidroneumático. Es importante disponer de una válvula antirretorno entre el reservorio y el sistema hidroneumático para evitar que el agua contenida en el tanque hidroneumático no se regrese hacia el reservorio.



Figura 42 Conexión sistema hidroneumático con fuente de agua y válvula anti-retorno

A la salida del sistema hidroneumático se realizó la conexión del filtro de agua para evitar obstrucciones en la red de distribución y en los emisores. Finalmente, luego del filtro de agua, se realiza la conexión de la electroválvula, la cual mediante la señal del controlador de riego será la encargada de abrir o cerrar el paso de agua hacia el cultivo.



Figura 43 Electroválvula y filtro



Figura 44 Cabezal de riego

6.3.2 Montaje de la red de conducción y distribución

Una vez montado el cabezal de riego se procedió a la conexión de las tuberías y mangueras de transporte de agua hacia los emisores. A la salida de la electroválvula se realizó la conexión de los

tubos de PVC utilizando codos para llevar la tubería hacia la manguera de polietileno la cual fue enterrada para prevenir daños ya sea por inclemencias del tiempo o por aplastamientos de maquinaria o personas que afecten a la conducción del agua hacia el cultivo.



Figura 45 Conexión tubos PVC hacia manguera de polietileno

La manguera de polietileno fue montada paralelamente final de las camas para posteriormente conectar los iniciales en forma perpendicular a la manguera. Para la conexión de los iniciales fue necesario utilizar un perforador de manguera para emparejar los conectores iniciales incrustados en la manguera de polietileno, con la manguera ciega.



Figura 46 Iniciales manguera de polietileno



Figura 47 Manguera de polietileno, perpendicular a las camas



Figura 48 Enterramiento de manguera de polietileno

Al final de la manguera de polietileno se colocan los finales de manguera para evitar la fuga de agua.



Figura 49 Final de manguera

6.3.3 Montaje de los emisores

Una vez que se montó la red de conducción, se procedió a emparejar los iniciales con la manguera de goteo, mediante el uso de conectores dentados los cuales mediante presión fueron incrustados en la manguera de goteo.



Figura 50 Conector dentado Manguera de goteo

Es importante mencionar que la manguera de goteo elegida es autocompensada, es decir que, sin importar la longitud de la manguera o la presión de la línea de conducción, la cantidad de agua suministrada por cada gotero será siempre la misma.



Figura 51 Emisores o goteros autocompensados

En cada cama fueron colocadas 2 mangueras de goteo ya que existían 2 líneas de plantas de fréjol para cada cama, obteniendo así una mejor eficiencia de aplicación. Finalmente se colocaron finales de manguera para evitar fugas de agua al final de las líneas de manguera de cada cama.



Figura 52 Finales de manguera



Figura 53 Montaje manguera de goteo

6.3.4 Montaje de los sensores de campo

Los sensores de campo utilizados fueron el sensor de humedad y sensor de lluvia. El sensor de lluvia fue colocado cerca de la estación meteorológica, mientras que el sensor de humedad fue colocado en la mitad del terreno del cultivo a una profundidad de 40 cm, la cual hace referencia a la profundidad efectiva de la raíz de un cultivo de fréjol esto con el fin de conocer la humedad real contenida en el suelo la cual es aprovechada por las raíces de la planta.



Figura 54 Colocación del sensor de humedad

Para la conexión del sensor de humedad con el controlador se utilizó manguera para la conducción de los cables con el fin de evitar ruidos en la recepción de datos y para la protección de estos.

6.3.5 Montaje de la estación meteorológica

Una vez montados los sensores de campo y los componentes de riego, se realizó el montaje de la estación meteorológica. Esta estación meteorológica utiliza sensores de humedad relativa, temperatura, radiación solar y velocidad del viento para determinar el cielo predominante en la zona. Para proteger a estos elementos se realizó la construcción de la Garita de Stevenson, la cual

contendrá a los diferentes sensores y además a la tarjeta STM32F4, debido a que los sensores deben estar cerca de la tarjeta para evitar ruidos o pérdida de información por largas distancias. La garita de Stevenson fue colocada a 1,5 metros del suelo y sin obstáculos a su alrededor como recomienda la Organización Meteorológica Mundial.



Figura 55 Estación meteorológica con abrigo tipo Stevenson

La tarjeta STM32F4 es la encargada de realizar todo el procesamiento de datos del controlador de riego. La salida del controlador es la señal para la activación de la electroválvula, encargada de abrir o cerrar el paso de agua desde el cabezal de riego hasta el cultivo.



Figura 56 Controlador y sensores

Debido a que el voltaje entregado por el controlador es de 3VDC y la electroválvula trabaja con un voltaje de 24 VAC, se optó por la utilización de un relé, el cual se cerrará estimulado por el voltaje entregado por la tarjeta STM32F4, para poder dar paso a funcionamiento del transformador y así activar la electroválvula.

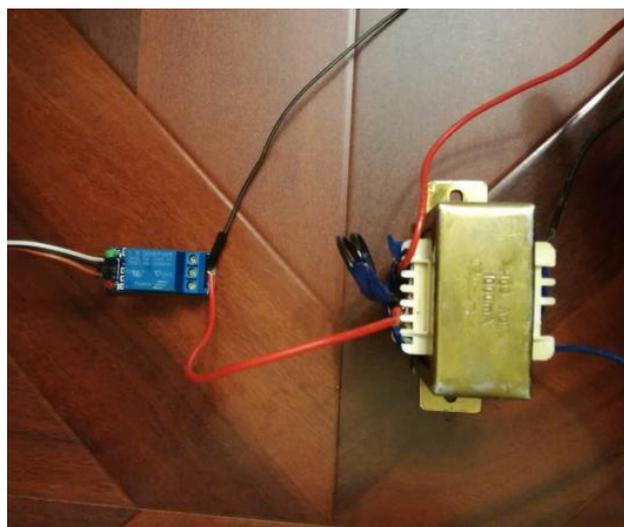


Figura 57 Relé y transformador para activación de electroválvula

CAPITULO VI

PRUEBAS Y RESULTADOS

7.1 Introducción

En este capítulo se detallan las pruebas de funcionamiento del sistema de irrigación, comenzando con pruebas de funcionamiento del sistema de predicción de cielo predominante mediante simulación y posteriormente con variables reales. También se realiza las pruebas del controlador de riego mediante simulación y con variables reales con el fin de determinar si el controlador de riego funciona de acuerdo a la lógica de control propuesta. Finalmente se realiza las pruebas del funcionamiento total del sistema donde se logró realizar el proceso de riego o irrigación para dotar de agua al cultivo de fréjol.

7.2 Pruebas de funcionamiento del sistema de predicción basado en lógica difusa

Para realizar las pruebas del funcionamiento del sistema de predicción se comenzó por la comprobación mediante simulación del correcto funcionamiento del controlador difuso, encargado de determinar el porcentaje de nubosidad o cielo predominante en la zona. Para verificar el funcionamiento de este controlador, recurrimos a la herramienta de Matlab, Fuzzy Logic Designer, donde una vez ingresados todos los parámetros del controlador, podremos observar el comportamiento de este frente a variaciones de las variables de entrada: humedad, temperatura, radiación solar y velocidad del viento.

Se realizó 18 simulaciones con valores aleatorios para comprobar que se obtenga cada tipo de cielo predominante en la zona, 4 de estas se muestran a continuación

Tabla 19

Parámetros de simulación del controlador difuso

	Humedad	Temperatura	Radiación Solar	Velocidad del viento
Simulación 1	Media= 66.3 %	Alta= 21.9 °C	Alta= 12.1	Baja= 2.1 km/h
Simulación 2	Media= 70.9 %	Media= 16.1 °C	Media= 4.6	Baja= 3.6 km/h
Simulación 3	Alta= 95.1 %	Media= 14.9 °C	Media= 5.3	Alta= 18.3 km/h
Simulación 4	Alta= 96.2 %	Baja= 8.9 °C	Baja= 1.2	Alta= 18.1 km/h

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones realizadas en la herramienta de Matlab, Fuzzy Logic Designer.

Para la simulación 1 mostrada en la figura 58, se observa que al ingresar los parámetros de la tabla 18, al tener a la salida un valor de 0.125 se puede determinar que es un cielo despejado ya que este valor se encuentra en el rango de 0 a 0.25 correspondiente al tipo de cielo mencionado anteriormente.

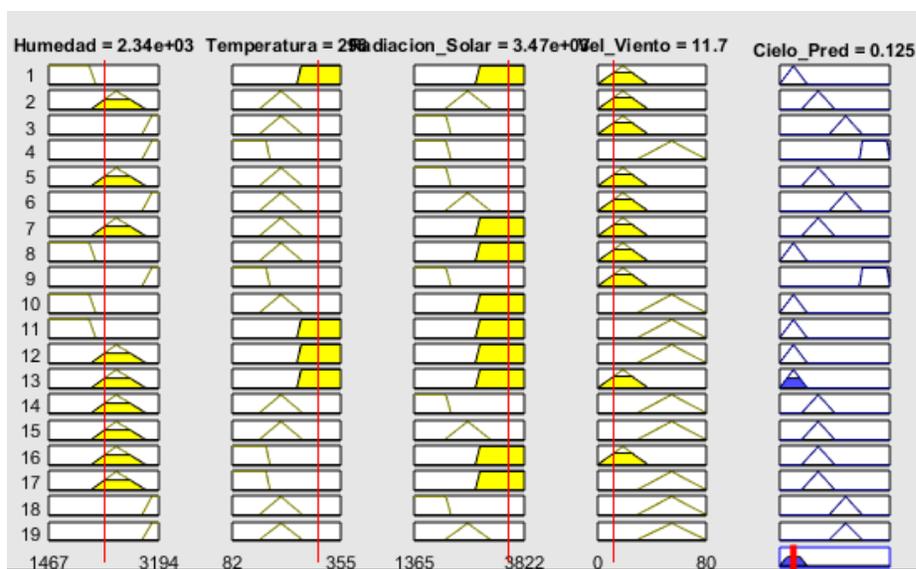


Figura 58 Simulación 1

Para la simulación 2 mostrada en la figura 59, se observa que al ingresar los parámetros de la tabla 18, al tener a la salida un valor de 0.035 se puede determinar que es un cielo poco nuboso ya que este valor se encuentra en el rango de 0.20 a 0.50 correspondiente al tipo de cielo mencionado anteriormente.

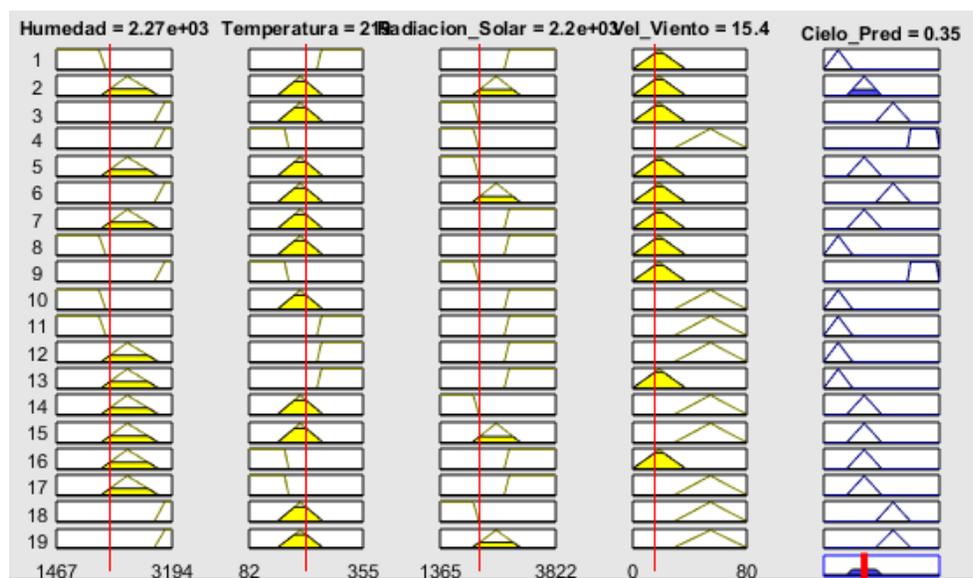


Figura 59 Simulación 2

Para la simulación 3 mostrada en la figura 60, se observa que al ingresar los parámetros de la tabla 18, al tener a la salida un valor de 0.6 se puede determinar que es un cielo nuboso ya que este valor se encuentra en el rango de 0.45 a 0.75 correspondiente al tipo de cielo mencionado anteriormente.

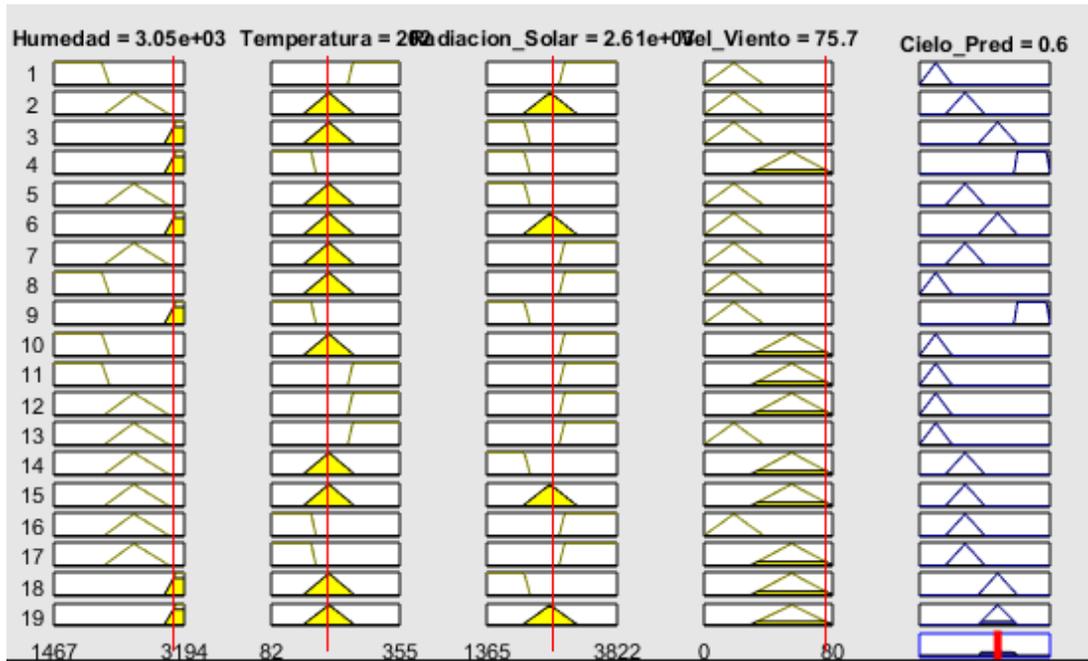


Figura 60 Simulación 3

Para la simulación 4 mostrada en la figura 61, se observa que al ingresar los parámetros de la tabla 18, al tener a la salida un valor de 0.86 se puede determinar que es un cielo muy nuboso ya que este valor se encuentra en el rango de 0.70 a 1.00 correspondiente al tipo de cielo mencionado anteriormente.

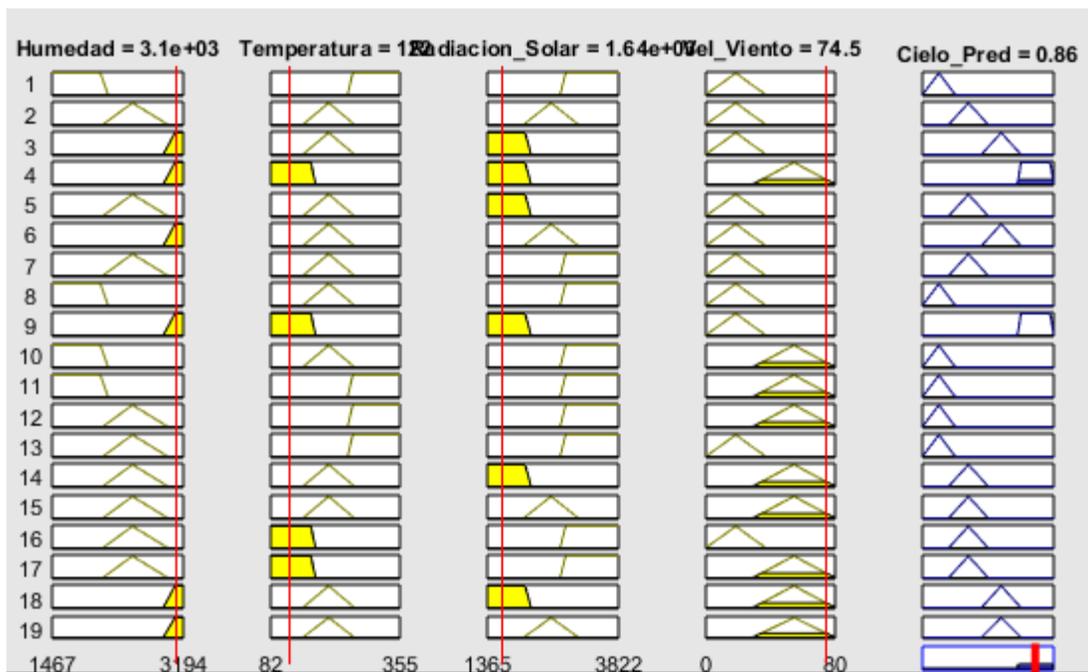


Figura 61 Simulación 4

Una vez comprobado el funcionamiento del controlador difuso mediante simulación, se procedió a comprobar este controlador mediante el uso de entradas reales, es decir tomando medidas de humedad, temperatura, radiación solar y viento, pertenecientes a la estación meteorológica para determinar el cielo predominante.

Para ello se realizó una lectura en el día, a la misma hora (15h00), durante 13 días ya que debido a la duración del proyecto no se disponía de mayor tiempo para realizar más pruebas de funcionamiento. Se realizó la comparación de los valores de los sensores con la aplicación para dispositivos móviles de AccuWeather. Debido a que las predicciones de esta aplicación en cuanto al cielo predominante tienen diferentes valores a los definidos en este trabajo, únicamente se realizó la comparación entre la salida del controlador y la observación de campo del cielo en la zona.

Para observar los valores obtenidos de cada sensor, se realizó la comunicación serial entre la tarjeta STM32F4 y Simulink, donde mediante el puerto virtual que ofrece esta tarjeta, se podía visualizar en tiempo real los datos obtenidos por cada sensor.

Tabla 20*Comparación de variables climáticas*

	Variable	AccuWeather	Estación Meteorológica
Día 1	Humedad	81%	78 %
	Temperatura	20 °C	18 °C
	Radiación solar	5	4
	Velocidad del viento	12 km/h	3 km/h
Día 2	Humedad	69 %	68 %
	Temperatura	20 °C	21 °C
	Radiación solar	7	6
	Velocidad del viento	12 km/h	2 km/h
Día 3	Humedad	85 %	78 %
	Temperatura	24 °C	22 °C
	Radiación solar	8	6
	Velocidad del viento	12 km/h	0 km/h
Día 4	Humedad	79 %	70 %
	Temperatura	20 °C	20 °C
	Radiación solar	4	3
	Velocidad del viento	11 km/h	2 km/h
Día 5	Humedad	86%	77 %
	Temperatura	21 °C	20 °C
	Radiación solar	6	6
	Velocidad del viento	12 km/h	0 km/h
Día 6	Humedad	75%	68%
	Temperatura	19 °C	20 °C
	Radiación solar	4	3

CONTINÚA 

Día 7	Velocidad del viento	15 km/h	2 km/h
	Humedad	89 %	78 %
	Temperatura	23 °C	23 °C
	Radiación solar	6	6
Día 8	Velocidad del viento	12 km/h	0 km/h
	Humedad	75 %	71 %
	Temperatura	20 °C	20 °C
	Radiación solar	4	4
Día 9	Velocidad del viento	13 km/h	2 km/h
	Humedad	88%	80 %
	Temperatura	19 °C	18 °C
	Radiación solar	3	2
Día 10	Velocidad del viento	14 km/h	0 km/h
	Humedad	98%	90 %
	Temperatura	14 °C	13 °C
	Radiación solar	3	2
	Velocidad del viento	13 km/h	0 km/h

De la tabla 20 podemos observar que para el caso de la humedad existe una diferencia entre 1 y 9 %, para la temperatura entre 0 y 2 °C, para la radiación entre 0 y 2 y para la velocidad del viento entre 8 y 13 km/h. Estas diferencias pueden darse debido a que la aplicación AccuWeather toma sus datos de mapas meteorológicos de muestras satelitales o estaciones meteorológicas cercanas a la ubicación en estudio, mas no en la ubicación precisa donde se tomó los datos con la estación meteorológica desarrollada en este proyecto, es por esto que, para el caso de la humedad, temperatura y radiación solar, no existen diferencias muy grandes de los datos de nuestro sistema meteorológico, con los datos de la aplicación AccuWeather. En cuanto a la velocidad del viento existe

una gran diferencia la cual puede ser a que el anemómetro es de construcción casera, el cual no es muy sensible a los cambios la velocidad del viento.

Para todas las variables climáticas una de las soluciones para disminuir el error entre el valor de la variable tomada y el valor proporcionado por la aplicación AccuWeather, es calibrar los instrumentos utilizados en este proyecto, con instrumentos de una estación meteorológica muy cercana a la estación meteorológica diseñada en este proyecto, ya que como se había mencionado anteriormente los valores climáticos de la aplicación AccuWeather son valores tomados del clima donde se encuentra cierta estación meteorológica, más no en el sitio exacto donde se desarrolla el proyecto. Para el caso de la velocidad del viento se debería utilizar un anemómetro de producción en masa más no de producción casera, ya que este último al no tener los elementos ideales para determinar la velocidad del viento, como veletas aerodinámicas, al no tener una buena calibración, suele dar valores con gran variación como se demostró en la tabla 20.

Para el caso del cielo predominante, se realizó la comparación entre la observación de campo y la salida de la lógica difusa. La determinación de la observación de campo se la realizó tomando en cuenta el porcentaje de nubes y tonalidad como se mencionó anteriormente, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 21.

Tabla 21

Comparación de cielo predominante

Día	Observación de campo	Controlador Difuso
Día 1	Despejado	Poco Nuboso
Día 2	Despejado	Despejado
Día 3	Poco Nuboso	Despejado

CONTINÚA 

Día 4	Despejado	Despejado
Día 5	Poco Nuboso	Despejado
Día 6	Despejado	Despejado
Día 7	Despejado	Despejado
Día 8	Despejado	Despejado
Día 9	Nuboso	Nuboso
Día 10	Muy Nuboso	Muy Nuboso
Día 11	Nuboso	Nuboso
Día 12	Despejado	Despejado
Día 13	Despejado	Despejado

En los 13 días existen 4 diferencias en cuanto al cielo predominante, esto puede ser debido a que las variables registradas estuvieron en los límites de cada variable lingüística, es decir al registrar una temperatura de 12 °C, estará dentro de la temperatura “media” y a su vez dentro de la temperatura “baja”, con lo cual la decisión final del cielo predominante será determinada por el controlador difuso. También se debe considerar que las observaciones de campo no siempre son exactas, ya que cada persona puede interpretar de diferente manera el cielo observado. Para solucionar esto se debería tener observaciones de campo con varios individuos que determinen el cielo predominante y así obtener de una manera más aproximada el cielo real que se tiene en la zona.

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento de la lógica difusa para determinar el cielo predominante en la zona, se realizó la prueba del controlador de riego, el cual está conformado por el sistema de la lógica difusa y las variables de humedad del suelo y presencia de lluvia. De igual manera inicialmente se realizó la prueba mediante simulación, colocando bloques de valores

constantes en el área de trabajo de simulink donde se diseñó el controlador para comprobar el funcionamiento del controlador de riego diseñado, es decir si se obtiene un cielo despejado o muy nuboso y si la cantidad de humedad del suelo es menor al 45% la salida del controlador de riego no se activa; si se obtiene un cielo poco nuboso y nuboso y si la humedad del suelo es menor al 45%, la salida del controlador de riego se activará hasta que llegue al 100% de humedad del suelo.

Para realizar las pruebas con variables reales, debido a que las lluvias fueron constantes durante el periodo de pruebas se tenía una humedad del suelo del 100%. Para comprobar el funcionamiento total del sistema, es decir al tener un cielo nuboso o poco nuboso, sin presencia de lluvia y la humedad del suelo menor al 45% humedad, se buscó trabajar con un cielo nuboso y sin presencia de lluvia, posteriormente para obtener una humedad menor al 45% se colocó el sensor de humedad del suelo en tierra seca para que el controlador a la salida de un valor de 1. Con este valor se pudo observar la activación de la electroválvula y posteriormente de la bomba de agua para comenzar con la dosificación de agua. Para comprobar que al llegar al 100% la salida del controlador de riego sea 0, se fue añadiendo agua a la muestra de tierra seca hasta alcanzar una humedad del 100% y se pudo observar que la electroválvula se desactivo al igual que la bomba de agua.

7.3 Pruebas de funcionamiento de la Interfaz gráfica

Para realizar las pruebas de funcionamiento de la interfaz gráfica el primer paso fue verificar la conexión serial entre la tarjeta STM32F4 y Simulink. Una vez obtenida la comunicación el siguiente paso fue verificar que los datos obtenidos por los sensores sean similares a los mostrados en la pantalla de la interfaz gráfica. Para determinar esto, se midió el voltaje de salida de cada sensor, se transformó este voltaje a una variable de medida de humedad, temperatura, radiación

solar, velocidad del viento y humedad del suelo y luego se comparó con lo mostrado en la interfaz gráfica obteniendo lo siguiente.

Tabla 22

Pruebas de funcionamiento de la Interfaz gráfica

	Variables Climáticas	Medición sensores	Interfaz gráfica
Comparación 1	Humedad	78 %	78%
	Temperatura	23 °C	23 °C
	Radiación solar	6	6
	Velocidad del viento	0 km/h	0 km/h
Comparación 2	Humedad	71 %	71 %
	Temperatura	20 °C	20 °C
	Radiación solar	4	4
	Velocidad del viento	0	0
Comparación 3	Humedad	80 %	80%
	Temperatura	18 °C	18 °C
	Radiación solar	2	2
	Velocidad del viento	0 km/h	0 km/h
Comparación 4	Humedad	90 %	90 %
	Temperatura	13 °C	13 °C
	Radiación solar	2	2
	Velocidad del viento	0 km/h	0 km/h
Comparación 5	Humedad	68 %	68 %
	Temperatura	20 °C	20 °C
	Radiación solar	3	3
	Velocidad del viento	0 km/h	0 km/h

En la tabla 21 podemos observar que no existe diferencia entre los valores tomados por los sensores y los valores observados en la interfaz gráfica.

De igual manera al cumplirse la condición de riego, se comprobó que el indicador tipo lámpara, se encienda (color verde), indicando que se está regando el cultivo.

7.4 Pruebas y resultados del funcionamiento total del sistema de irrigación inteligente

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento tanto del controlador de riego como de la interfaz, se procedió a la conexión total de todos los elementos con el fin de realizar pruebas para visualizar si se realiza el proceso de irrigación inteligente.

Debido a las lluvias por época de invierno la humedad del suelo era la ideal para que las plantas se desarrollen correctamente, por ende, no hacía falta que se active el sistema de irrigación inteligente para regar el cultivo.

Para comprobar que el sistema de verdad funcione cuando la humedad del suelo sea menor al 45% de la dosis bruta de riego, al tener un cielo poco nuboso o nuboso, a la entrada del sensor de humedad del suelo se le conecto un voltaje de 2,9 V para simular que la humedad del suelo estaría en niveles muy bajos.

7.5 Resultados del sistema de irrigación inteligente

En el capítulo III se determinó que es necesario regar 69 mm de agua por cada metro cuadrado.

Al tener un campo experimental de 200 m² con 8 camas y separación entre ella de 50 cm se tendría de suelo de cultivo de 144 m² el cual se debería regar 69 litros de agua por cada metro cuadrado de suelo de cultivo.

En total para regar el cultivo se necesitarán de 9936 litros de agua. Esta medida dependerá de las precipitaciones que exista durante el desarrollo del cultivo entre los meses de diciembre y marzo; considerando la estimación del diseño agronómico, se debería regar 4 veces esta medida de agua hasta la cosecha. Es importante mencionar que esta cantidad es solo una referencia, tomando en cuenta el clima presente para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo del año 2017, con

lo cual para el clima presente de este año podría variar dependiendo de las precipitaciones que dan humedad al suelo y el clima en la zona, todo esto determinado por el sistema de irrigación inteligente.

Actualmente, en la hacienda Cochicaranqui el riego se lo realiza mediante gravedad, sin tomar en cuenta la cantidad real de agua que el cultivo necesita, donde un trabajador hace pasar agua del canal de riego a las parcelas o camas hasta que las divisiones entre camas se inunde.

En consultas a trabajadores de la hacienda, para un campo de 200 m² se necesitarían aproximadamente dejar pasar agua del canal de riego durante 15 minutos a las camas del cultivo. Los periodos de riego dependerán de la apreciación del trabajador, aunque generalmente lo realizan cada 15 días cuando no existe mucha lluvia.

El caudal asignado de riego para la hacienda Cochicaranqui es de aproximadamente 74.81 l/s, de este caudal se toma aproximadamente 20 l/s para regar un cultivo. Es decir que en 15 minutos se entrega aproximadamente 18000 litros de agua a un terreno de 200 m².

Para determinar el porcentaje de ahorro de agua para el cultivo de fréjol en la época de invierno desde diciembre hasta mayo, durante 2 periodos de siembra, se toma en cuenta que el sistema mediante la estimación mostrada en el diseño agronómico, se debería regar el cultivo cada 25 días aproximadamente, es decir que se tendría que activar el sistema 7 veces con lo cual se tendría un consumo aproximado de 69500 litros de agua.

Para un riego por gravedad considerando que, en la época de invierno por estimación del trabajador, se debería regar cada 15 días, se tendría que realizar este proceso 12 veces, es decir que se tendría un consumo aproximado de 216000 litros de agua.

Al realizar una comparación entre el sistema de irrigación inteligente y un sistema de riego por gravedad se pudo determinar que el ahorro de agua del sistema mostrado en este proyecto, durante los 6 meses de la época de invierno, sería del 68%.

Para el cálculo del consumo de energía del sistema de irrigación inteligente se tomaron en cuenta 3 elementos principales:

- Bomba de agua
- Electroválvula
- Tarjeta STM32F4

La bomba de agua tiene una potencia de 750 W, la electroválvula tiene un consumo de potencia de 2.25 W en afluencia de caudal y de 1.87 W en sostenimiento de caudal.

Al tener 24 emisores/goteros por cada metro cuadrado, tomando en cuenta que cada gotero entrega una cantidad de 2 litros/hora, para completar los 69 litros de agua a partir de la cantidad mínima de humedad correspondiente a 31 litros determinados por el diseño agronómico, se necesitaría tener encendida la electroválvula y la bomba por aproximadamente 1 hora.

Es decir que la potencia total consumida cada 25 días sería de 0.75 kW/h. Para la época de invierno (6 meses) se necesitarían 5 kW/h.

Para el caso de la electroválvula al igual que la bomba de agua se debería encender cada 25 días por el mismo periodo de tiempo, si la potencia es de 2.25 W, en 6 meses se tendría un consumo de 0.016 kW/h.

Al no estar activado el sistema la electroválvula consumiría 1.87W, si se toma en cuenta que en los 6 meses de invierno existen 4313 horas (horas totales – horas de encendido del sistema), se tendrá 8.06 kW/h.

Para el caso de la tarjeta STM32F4 se estima una potencia de 0.35 W en pleno funcionamiento con conexión de todos los sensores, en los 6 meses de invierno existen 4320 por lo tanto se tendría 1.51 kW/h.

El consumo total de los 3 elementos sería

$$\text{Consumo total} = \frac{5 \text{ kW}}{\text{h}} + 0.016 \frac{\text{kW}}{\text{h}} + \frac{8.06 \text{ kW}}{\text{h}} + 1.51 \frac{\text{kW}}{\text{h}} = 14.58 \text{ kW/h}$$

Si se toma en cuenta que en Ecuador cada kW/h tiene aproximadamente un valor de 11 cvts de dólar, en 6 meses para el funcionamiento del sistema de irrigación inteligente la planilla de luz aumentaría en un dólar con 60 cvts.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.6 Conclusiones

Se realizó el diseño del sistema agronómico con el fin de conocer la cantidad de agua que necesita el cultivo de fréjol, tomando en cuenta los datos climáticos obtenidos en el 2017 para la ciudad de Ibarra, el tipo de cultivo, el tipo de suelo y el sistema de riego. La cantidad de agua máxima fue de 69 mm y la cantidad mínima de 31 mm, por cada metro cuadrado, garantizando así un mejor desarrollo del cultivo.

Se optó por la elección de un sistema de riego por goteo ya que este presenta la mayor eficiencia de aplicación y previene menores enfermedades o plagas al cultivo, frente a otros sistemas como el riego por aspersión o gravedad.

El uso del software CROPWAT de La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), permitió estimar la Evapotranspiración de Referencia (ET_o), dato muy importante para el diseño del sistema agronómico

Se creó un abrigo meteorológico tipo Stevenson con el fin de proteger a los instrumentos de las inclemencias del tiempo y además para que las lecturas tomadas por estos instrumentos sean lo más exactas posibles en cuanto al clima en la zona.

Se diseñó un controlador de riego el cual contiene, un sistema de predicción de cielo predominante mediante lógica difusa y variables de humedad del suelo y presencia de lluvia, para determinar cuando es conveniente realizar el riego al cultivo de fréjol tomando en cuenta la cantidad mínima y máxima de agua determinado por el diseño agronómico.

El uso de las máscaras e indicadores animados de la herramienta Simulink de Matlab, permiten realizar una interfaz gráfica de visualización donde los datos obtenidos por la tarjeta STM32F4, pueden visualizarse en la pantalla del computador en tiempo real

Las pruebas del funcionamiento total del sistema de irrigación inteligente durante 13 días, permitieron observar el funcionamiento del controlador de riego y elementos de riego que la finalidad emitir resultados del trabajo realizado.

Se estimó que el ahorro de agua del sistema de irrigación inteligente frente a un sistema de riego por gravedad es de aproximadamente del 68%, en la época de invierno comprendida entre diciembre y mayo de cada año. Este ahorro se debe a que en el sistema de irrigación inteligente se toma en cuenta la cantidad real de agua que necesita la planta y la conveniencia de realizar el riego tomando en cuenta el clima predominante en la zona.

En cuanto al consumo energético el aumento en la planilla eléctrica es de aproximadamente 1,60 \$. Esto hace que el funcionamiento del sistema de irrigación inteligente sea viable económicamente en cuanto a gastos de operación por energía eléctrica.

La implementación de sistemas de irrigación inteligente aporta a la gestión, preservación y conservación del agua, cumpliendo así uno de los objetivos principales de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua, además de colaborar con la matriz productiva ya que al utilizar la cantidad de agua correcta en los cultivos se trabaja de forma consciente y coherente en cuanto al uso de agua en la agricultura, permitiendo así, juntamente con otros factores que la producción de un cultivo sea mejor.

Para las personas encargadas de la agricultura este proyecto es de gran interés, ya que la mayoría de ellas realizan un riego sin tomar en cuenta el clima y la cantidad real de agua que necesita la planta. En ocasiones al no conocer la cantidad real de agua, al realizar el riego se produce un estrés

hídrico para la planta, provocando que sus hojas se vuelvan amarillas y por ende el cultivo se vea afectado en su desarrollo. Además, el sistema funciona de manera autónoma, sin la intervención de algún operario, disminuyendo así la mano de obra para el proceso de riego. Por todo esto hace que el sistema de irrigación inteligente en los agricultores cause gran interés por su importancia para el correcto desarrollo de sus cultivos.

El desarrollo de este proyecto de investigación hace posible juntar 2 ramas de ingeniería, la ingeniería electrónica con la ingeniería agropecuaria, donde mediante el uso de elementos electrónicos hace posible que el proceso de riego en la agricultura sea más eficiente. La integración de diferentes ramas de ingeniería hace posible llevar a cabo diferentes proyectos que beneficien a la sociedad.

7.7 Recomendaciones

Se debe realizar un mantenimiento preventivo de los elementos de riego para evitar obstrucciones en la tubería y emisores (goteros). De igual manera se debe realizar el mantenimiento de los instrumentos que componen la estación meteorológica para que puedan obtener datos correctos del clima.

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología debe proporcionar mayor información de las variables climáticas al menos para cada ciudad principal del Ecuador, para lo cual se debería montar más estaciones meteorológicas de las cuales se puedan obtener datos para realizar trabajos sobre irrigación basados en el clima.

Incorporar un sistema de fertirrigación al sistema de irrigación inteligente para automatizar el uso de fertilizantes en los cultivos.

Las pruebas ideales del sistema de irrigación inteligente se las debe realizar en la época de verano, ya que en invierno el sistema funciona únicamente cuando no existe presencia de lluvia por un periodo de 7 días en adelante. No se pudo realizar en la época de verano debido a que el proyecto tenía una duración máxima de 6 meses coincidiendo con la época invernal.

Para la conexión de la interfaz gráfica con el controlador, se recomienda utilizar una comunicación inalámbrica con el fin de que la información mostrada en la interfaz se la pueda observar sin la necesidad de cables en computadoras y en dispositivos móviles. De igual manera el uso de sensores inalámbricos mejoraría la captación de datos, ya que, por caída de tensión debido a la distancia entre los sensores y el controlador, los datos no suelen ser los más precisos.

El uso de sensores profesionales serviría para apreciar de mejor manera el clima real en la zona y así mejorar el diseño del controlador de riego. Para que este sistema sea una solución comercial se deberían utilizar los sensores que sean precisamente para uso en meteorología y agricultura, que tengan una mayor precisión y rango de medida y que hagan posible la comunicación con un controlador, computador o tarjeta de desarrollo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2017). Water Sense. Estados Unidos.
- Agencia Estatal de Meteorología. (2015). Radiación Solar. Madrid, España.
- Agrícolas SA. (2016). *agrícolas sa*. Obtenido de <http://www.novedades-agricolas.com/es/riego/materiales-de-riego/emisores-de-riego>
- Alexis , V., & Abelardo, V. (2010). Componentes de un cabezal de riego presurizado.
- Allen. (Agosto de 1989). Bean Production Problems in the Tropics. Colombia.
- Ambientum. (2006). *ambientum*. Obtenido de <https://www.ambientum.com/revistanueva/2006-10/hagar.htm>
- Arteaga, P. (2015). Sistemas de riego por gravedad. Trujillo, Perú.
- Ayuntamiento de Valencia. (2015). Sistema de Riego Inteligente en el Jardín del Turia y parque de Cabecera. España.
- Bravo, V., & Muñoz, J. (2014). Diseño e implementación de un sistema de riego inteligente basado en sensores y módulos de radiofrecuencia para la transmisión. Ecuador.
- Burgos, X., & Ribeiro, A. (2007). Controlador borroso multivariable para el ajuste de tratamientos en agricultura de precisión.
- Calera , A., & Campos, I. (2016). Determinación de las necesidades de agua y riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. España.
- Carrazón, J. (2007). Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego. FAO.
- Castro, J. (2016). Sistema de Riego Autónomo Basado en la Internet de las Cosas. Colombia.
- Castro, P., Aguila, F., & Quevedo, A. (Octubre de 2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. México.

- CI. (s.f.). *ci.eres.ca.us*. Obtenido de <https://www.ci.ceres.ca.us/DocumentCenter/View/483>
- Cruz, J. (Noviembre de 2009). Diseño de un sistema de riego por goteo controlado y automatizado para uva italia. Perú.
- Cun, R. (2010). Introducción al riego y drenaje. México.
- Del Brio, B., & Sanz, A. (2002). Redes neuronales y sistemas difusos. España.
- Díaz, S. (15 de Junio de 2012). Análisis CFD de diferentes diseños para una estación meteorológica de pequeñas dimensiones. Cataluña, España.
- Enciso, J., Porter, D., & Péries, X. (2017). Uso de sensore de humedad del suelo para eficientizar el riego.
- Escobar, C., & Galindo, J. (2014). Software genérico de Control Difuso: Aplicación en Agricultura Industrial. España.
- FAO. (2003). Enfoques: Mejorar la tecnología de riego. FAO.
- FAO. (2007). Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego. FAO.
- Fernandez, J., & Romero, R. (2015). Estrategias y programación de riego. Sevilla, España.
- Freemeteo. (s.f.). *Sitio de predicciones meteorológicas*. Obtenido de www.freemeteo.com
- Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. (2004). Meteorología y climatología. España.
- Gómez, R. (2010). Manual de riego para agricultores. España.
- Guijarro, M., Torajada, E., & González, F. (2007). Sistema de Riego Inteligente Borroso. España.
- HAGAR, L. (2006). Obtenido de http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE02_ENV_E_000210_LAYMAN.pdf

Honeywell. (2008). *sparkfun*. Obtenido de

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/SEN-09569-HIH-4030-datasheet.pdf>

Illaco. (1985). Evaluación de la textura por el tacto.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2010). Riego por gravedad. Mexico.

Inzunza, J. (2006). Presión Atmosférica y Vientos.

itunews. (2015). Una tecnología de Irrigación Inteligente para Abu Dhabi.

LAPIS Semiconductor. (2013). *sparkfun*.

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, U. y. (6 de Agosto de 2014). Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua. Quito, Ecuador.

Liotta, M. (2015). Riego por goteo.

Mapama. (2016). Riego por gravedad. España.

Maqueda, R., Requena, A., & Meneses, J. (2016). Diseño de un Sistema de Control de Riego Inteligente. México.

Martinez, M. (2012). Obtenido de

http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/FICHA%20TECNICA_L%3%8DNEA%20DE%20CONDUCCI%C3%93N.pdf

Mata, M., & Tortajada, E. (2007). Sistema de Riego Inteligente Borroso.

Mendoza, A. (2013). Riego por Goteo. San José, Costa Rica.

Mihajlovich. (1979). Rehabilitation and agricultural diversification project. Agricultural extension training project, Honduras. Final report of the expert in irrigation application.

- Ministerio de Agricultura de Argentina. (s.f.). *Riego por Surcos*. Obtenido de <http://ing.unne.edu.ar/pub/riegoydrenaje/mdr.pdf>
- Narváez, G. (2009). Automatización de un sistema de riego dedicado a la producción florícola basado en las tecnologías de agricultura de precisión y en telemetría utilizando la plataforma de comunicaciones de telefonía móvil GPRS. Ecuador.
- Novedades Agrícolas SA. (2016). Obtenido de <http://www.novedades-agricolas.com/es/riego/sistemas-de-riego/riego-automatico><http://www.novedades-agricolas.com/es/riego/sistemas-de-riego/riego-automatico>
- O'Connor , B., Baeumner, A., & Laban, V. (2005). Precision Agriculture - Nanotech Methods Used, Such as 'Smart Dust', Smart Fields' and Nanosensors. EEUU.
- Ojeda. (s.f.). Pronóstico de riego en zonas de riego asistido por computadora.
- OMM. (2004). Meteorología.
- Ortega, F., & Carrasco , M. (s.f.). Sistema de programación de riego usando estaciones meteorológicas automáticas. Colombia.
- Orts, R. (s.f.). Obtenido de http://www.agroambient.gva.es/estatico/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/calidad_aire/airval/PDF/vis_1.pdf
- Pastor, R., & Narro, A. (2014). Evaluación del Comportamiento Hidráulico de doce modelos de goteros de bajo caudal. Lima, Perú.
- Pérez, B. (2014). Un sistema de riego inteligente minimiza el despilfarro de agua. España.
- Pizarro, A. (2014). Curso de riego localizado.
- Pizarro, A. (s.f.). Curso de riego localizado.
- Puican, C. (2012). Meteorología y climatología agrícola. Perú.

Revelo, A. (2006). Control difuso. México.

S.A. (2014). Estaciones meteorológicas en la agricultura.

Santos, L. (Marzo de 2010). El riego y sus tecnologías. España.

Sarochar, H. (2017). Introducción a la Meteorología General.

Suárez, D. (2005). VII Curso Internacional de Riego Localizado. California, EEUU.

Templo, D. A. (2012). Sistema de Riego en el Cultivo de Espárrago. Perú.

UDLAP. (s.f.). Obtenido de

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/deschamps_g_e/capitulo3.pdf

UDLAP. (s.f.). *udlap*. Obtenido de

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_ii/capitulo4.pdf

Universidad de Castilla. (s.f.). Obtenido de

https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/PresentacionesPDF_STR/AutomatizacionRiego.pdf

Universidad de Sevilla. (2007). Obtenido de http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%2010.Riego%20goteo/tutorial_07.htm

USDA. (1997).

Vásconez, J., & Chamba, F. (2013). Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y controlado de forma inalámbrica en una finca ubicada en el sector popular de balerio. Ecuador.

Veita, E., & Martínez, Y. (2014). Aplicación de la lógica difusa en la toma de decisiones para la sostenibilidad del suelo.

WWF. (2005). Curso de riego para agricultores.

ANEXOS

ANEXO A

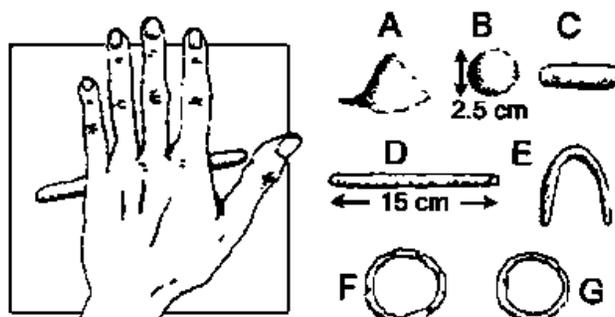


Figura 62 Evaluación de la textura del suelo por el tacto según Ilaco

Fuente: (Ilaco, 1985)

Se pone aproximadamente una cucharada de suelo en la palma de la mano y se le echa unas gotas de agua. Se escurre y se amasa hasta que se adhiera a la mano. La medida en que se pueda moldear, como en la figura, dará una idea aproximada de su clase de textura.

- a) **Arenoso.** Es imposible formar una bola de suelo redondeándola con las palmas de la mano. El suelo permanece suelto y en granos simples y puede ser amontonado pero no moldeado.
- b) **Franco arenoso.** Puede ser moldeado en forma esférica pero se desgrana fácilmente con solo aplastar la bola entre los dedos pulgar e índice.
- c) **Limo.** Podemos formar un cilindro a partir de la bola, pero nunca mayor de 15 cm de largo.
- d) **Franco.** Podemos amasar la bola hasta formar un cilindro de 15 cm de largo y 0.5 cm de diámetro. Al intentar doblar el cilindro en forma de U se rompe.

- e) **Franco arcilloso.** El suelo puede ser amasado como en (d) pero puede ser cuidadosamente doblado en U sin romperse.
- f) **Arcillo arenoso.** El suelo es de tacto suave y al seguir doblando el cilindro para formar un círculo se agrieta un poco.
- g) **Arcilla.** Se maneja como plastilina y puede ser doblado en un círculo sin agrietarse.

ANEXO B

Tabla 10 Resumen de las propiedades físicas de los suelos.				
Textura del suelo	Densidad aparente (g/cm ³)	Capacidad de campo (% θ g)	Punto de marchitez permanente (% θ g)	Infiltración básica (mm/h)
Arenoso	1.65 (1.55 – 1.90)	9 (6 – 12)	4 (2 – 6)	50 (25 – 250)
Franco arenoso	1.50 (1.40 – 1.60)	14 (10 – 18)	6 (4 – 8)	25 (13 – 75)
Franco	1.40 (1.35 – 1.50)	22 (18 – 26)	10 (8 – 12)	13 (8 – 20)
Franco arcilloso	1.35 (1.30 – 1.40)	27 (23 – 31)	13 (11 – 15)	8 (2.5 – 15)
Arcilloso	1.25 (1.20 – 1.30)	35 (31 – 39)	17 (15 – 19)	5 (1.3 – 10)

Figura 63 Resumen de las propiedades físicas del suelo

Fuente: (Mihajlovich, 1979)

ANEXO C

Tabla 11 Profundidad radicular efectiva de los cultivos más comunes.			
Cultivo	Profundidad efectiva (cm)	Cultivo	Profundidad efectiva (cm)
Banana	50 - 90	Repollo	40 - 50
Melón	100 - 150	Pepino	70 - 120
Cítricos	120 - 150	Otras hortalizas	30 - 60
Olivo	100 - 150	Frijol	50 - 90
Vid	75 - 180	Otras leguminosas	50 - 125
Otros frutales	100 - 200	Maíz	75 - 160
Fresa	20 - 30	Cereales	60 - 150
Cebolla	30 - 75	Alfalfa	90 - 180
Pimiento, tomate	40 - 100	Otros pastos	60 - 100
Piña	30 - 60	Palma	70 - 110
Chile	50 - 100	Papa	40 - 60
Sorgo	100 - 200	Camote	100 - 150

Figura 64 Profundidad efectiva de los cultivos más comunes

Fuente: (Mihajlovich, 1979)

ANEXO D

“Déficit permitido en el manejo del riego (DPM): es el contenido de agua en el suelo al cual no se debe permitir bajar o llegar al punto de marchitez permanente para evitar el estrés de la planta por falta de agua, y por lo tanto, evitar la reducción en la producción. La diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y el DPM debe ser la lámina de riego por aplicar. El contenido de agua que queda debajo de este límite es la cantidad de agua que queda en el suelo. El déficit permitido (DPM) dependerá de las especies de plantas y variará de acuerdo a las temporadas de cultivo. Generalmente, el déficit permitido se expresa en porcentajes. El nivel de déficit permitido recomendado para muchos cultivos de campo es de alrededor del 50% por ciento. Para cultivos sensibles a la sequía (incluyendo muchas verduras), el déficit permitido puede ser tan bajo como de un 25 por ciento” (Enciso, Porter, & Péries, 2017)

Cultivo	Déficit permitido de manejo del riego (%)	Profundidad de la raíz (pies)
Cultivos de fibra		
Algodón	65	3.3–5.6
Cereales		
Cebada y avena	55	3.3–4.5
Maíz	50–55	2.6–6.0
Sorgo	50–55	3.3–6.6
Arroz	20	1.6–3.3
Legumbres		
Frijoles	45	1.6–4.3
Soya	50	2.0–4.1
Forrajes		
Alfalfa	50–60	3.3–9.9
Bermuda	55–60	3.3–4.5
Pasto para pastizales	60	1.6–3.3
Césped		
Temporada fría	40	1.6–2.2
Temporada caliente	50	1.6–2.2
Caña de azúcar	65	4.0–6.5
Árboles		
Duraznos	50	3.3–6.6
Cítricos		
70% bajo sombra	50	4.0–5.0
50% bajo sombra	50	3.6–5.0
20% bajo sombra	50	2.6–3.6
Árboles coníferos	70	3.3–4.5
Huerto de nogales	50	5.6–8.0
Verduras		
Zanahorias	35	1.5–3.3
Melones y sandías	40–45	2.6–5.0
Lechuga	30	1.0–1.6
Cebollas	30	2.0–3.0
Papas	65	1.0–2.0
Pimientos dulces	30	1.6–3.2
Calabacines y pepinos	50	2.0–4.0

Figura 65 Déficit permitido de manejo del riego (DPM, %) para algunos cultivos

Fuente: (Allen, 1989)