

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



Evaluación Del Uso Eficiente Del Agua Con Un Sistema De Riego Automatizado En Goteo  
Con Colcha Empleando Sensor De Humedad

Por:

**Jesús Eduardo Villa Álvarez**

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Evaluación Del Uso Eficiente Del Agua Con Un Sistema De Riego Automatizado En Goteo  
Con Colcha Empleando Sensor De Humedad

POR:

**JESUS EDUARDO VILLA ALVAREZ**

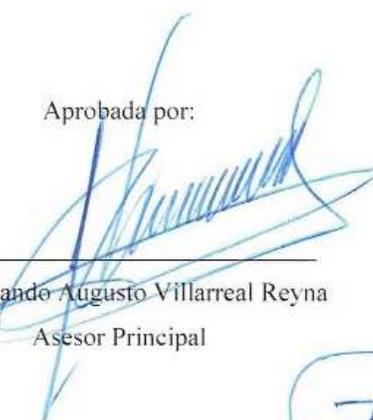
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Aprobada por comité de Asesoría:

Aprobada por:

  
Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna  
Asesor Principal

  
Dr. Jesús Ricardo Mercado Gutiérrez

Coasesor

  
M. C. Luis Rodríguez Gutiérrez

Coasesor

  
Dra. Rosa Elvira Valdez Ramos

Coasesor

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Evaluación Del Uso Eficiente Del Agua Con Un Sistema De Riego Automatizado En Goteo  
Con Colcha Empleando Sensor De Humedad

POR:

**JESUS EDUARDO VILLA ALVAREZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

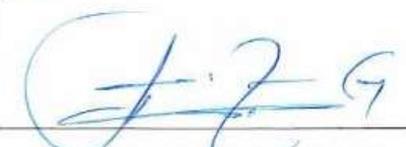
Aprobada por el H. Jurado Examinador:

Aprobada por:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna  
Asesor Principal

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jesús Ricardo Mercado Gutiérrez

Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
M. C. Luis Rodríguez Gutiérrez

Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Rosa Elvira Valdez Ramos

Coasesor



  
\_\_\_\_\_  
M. C. Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio 2023

## DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consiente de que, en caso de comprobarse plagio del texto no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de la consecuencia generada en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

Así mismo declaro que mi proyecto es de continuidad, desarrollado en el Jardín Hidráulico parte del departamento de Riego y Drenaje, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro amparado con el número de clave 38111-425401001-426 registrado en la subdirección de investigación de nuestra institución y cuyo nombre del proyecto es ***“Evaluación Del Uso Eficiente Del Agua Con Un Sistema De Riego Automatizado En Goteo Con Colcha Empleando Sensor De Humedad”***.

Autor principal



---

Jesús Eduardo Villa Álvarez

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy agradecimiento a mi ALMA MATER, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme dado la oportunidad de realizar y concluir satisfactoriamente mi preparación profesional que de hoy en adelante me será esencial para poder continuar con mis próximas y futuras metas, al igual las gracias por ser una de las mejores etapas de mi vida al vivir tantas experiencias que me ayudaron no solo a crecer profesionalmente si no también como persona, siempre llevaré a mi ALMA MATER en el corazón.

Al departamento de Riego y Drenaje por todas las herramientas que me ofreció y supe aprovechar junto con sus grandes profesores que me enseñaron y guiaron para crecer y poder ejercer como profesional en el área de la Irrigación.

Al Dr. Fernando Augusto Villareal Reyna, por guiarme como un gran profesor en la carrera de irrigación, al igual de corregirme y ayudarme a ver las problemáticas de la irrigación no solo en laboratorio o en las aulas, sino también a enfrentar problemas de la vida real, también las gracias por darme la oportunidad de trabajar con él en esta investigación, un excelente profesor y una excelente persona.

A la Dra. Rosa Elvira Valdez Ramos, por apoyarme y regalarme parte de su tiempo al corregirme y guiarme para que yo pudiera llevar a cabo la presentación de este proyecto de tesis.

Al Dr. Jesús Ricardo Mercado Gutiérrez, por su gran aportación en mi proyecto, me dio su apoyo y tiempo para poder tener un proyecto mejor presentable, de mejor calidad y a alimentar aún más mi conocimiento sobre la irrigación.

Al M. C. Luis Rodríguez Gutiérrez, por apoyarme a resolver mis dudas y corregirme en mis errores en su área de conocimiento de las ciencias exactas que me fueron de gran ayuda.

A mi familia, padres y hermano, que me dieron primeramente el apoyo de poder viajar lejos de mi casa para realizar y cumplir mi sueño, me apoyaron en el transcurso de mis estudios no solo de la universidad si no en todas las etapas de mi vida, a formarme como persona y a enseñarme los valores que hoy en día sigo poniendo en práctica.

A mis amigos y compañeros que conocí en el transcurso de mi preparación profesional, y fueron uno de mis más grandes apoyos tanto en lo escolar y en lo personal.

## **DEDICATORIA**

A mi papá Gerardo Villa Torres y mi mamá Adriana Álvarez Villalobos que son grandes y asombrosas personas y ejemplo para seguir, siempre me apoyaron en mis decisiones y siempre han estado y me han apoyado en cada uno de mis problemas que se me han presentado, me enseñaron a lo que es ganarse las cosas, a tener valores no solo en casa si no también fuera de, sin el apoyo yo no sería la persona que soy hoy en día.

A mi hermano Gerardo Villa Álvarez que siempre me apoyó y estuvo para mí como un gran amigo y compañero desde que puedo recordar.

A mi demás familia que siempre estuvieron apoyándome y al pendiente de mí.

A mis amigos y compañeros que conocí en el transcurso de mi vida y de la escuela que siempre han estado apoyándome y al igual yo a ellos.

## RESUMEN

En México en la agricultura el agua, hoy en día, es un recurso cada vez más limitado (disponibilidad hídrica), consecuencia del incremento urbano y de la demanda de una mayor superficie de riego. Se ha demostrado que mediante la automatización de estos sistemas se han logrado ahorrar en alto porcentaje dichos recursos hídricos y energéticos. La automatización de los equipos se realiza con base en controladores cuya función es mecánica eléctrica la cual se programa con base en una lámina de riego calculada con datos obtenidos del terreno y condiciones climatológicas, los cuales dichos software o programas aplicados a los riegos por tiempos programados, los controladores electrónicos hacen más eficiente la aplicación del agua al suelo que los convencionales (manuales), sin embargo dado al desarrollo de la tecnología actualmente contamos con sensores de humedad, tensiómetros, aparatos que miden el diferencial de su potencial hídrico, que además de medir puede tener un acceso de manipulación de amplio rango y así poder automatizar dicha acción considerando una de las variables más importante de este proceso que es la *humedad en el suelo*.

El uso de sensores de humedad a diferencia del controlador manual basa su principio en la capacidad de retención del agua de los componentes del suelo (*humedad aprovechable*), la lámina de riego y su duración serán variables dependientes de este porcentaje de humedad.

Este trabajo se calibró del 70% al 100%, es decir, al momento en el que el sensor mida por debajo del 70% de humedad, iniciará el riego hasta llevarlo al 100% teniendo un coeficiente de deflexión permisible del 30%. Es decir, los intervalos de riego nunca son iguales, y el tiempo de riego dependerá de la velocidad con que se deflexionó ese coeficiente.

El lograr apegarse a la curva de evapotranspiración traerá en consecuencia un uso adecuado del recurso hídrico (metros cúbicos) y energético (tiempo de bombeo).

El cultivo se empleó con acolchado agrícola para eficientar aún más la cantidad de agua aplicada ya que el acolchado es una herramienta para reducir la evaporación del terreno.

Es importante conocer el comportamiento de este tipo de sensores, ya que puede descalibrarse por tiempos prolongados de sequía por encima del calibrado, que podría llevar a un uso por debajo de la eficiencia esperada.

**Palabras claves:** Automatización, sistema de riego, porcentaje de humedad en el suelo, energía eléctrica, humedad aprovechable, mecánico eléctrico, sensor de humedad, acolchado agrícola.

## **ABSTRACT**

In Mexico, in agriculture, water today is an increasingly limited resource (water availability), a consequence of urban growth and the demand for a larger irrigated area. It has been shown that by automating these systems, a high percentage of water and energy resources have been saved. The automation of the equipment is carried out based on controllers whose function is electrical mechanics which is programmed based on an irrigation sheet calculated with times obtained from the terrain and weather conditions, which said software or programs applied to programmed irrigation, electronic controllers make the application of water to the soil more efficient than conventional (manual) ones, however, given the development of technology, we currently have humidity sensors, tensiometers, devices that measure the differential of its water potential, which in addition to measuring it can have a wide-range manipulation access and thus be able to automate said action considering one of the most important variables of this process, which is the humidity in the soil.

The use of humidity sensors, unlike the manual controller, bases its principle on the water retention capacity of the soil components (usable humidity), the irrigation sheet and its duration will be variables dependent on this percentage of humidity.

This work was calibrated from 70% to 100%, that is, at the moment in which the sensor measures below 70% humidity, at irrigation until it reaches 100%, starting with a permissible deflection coefficient of 30%. That is to say, the irrigation intervals are never the same, and the irrigation time of the speed with which that coefficient was deflected.

Being able to adhere to the evapotranspiration curve will result in an adequate use of water resources (cubic meters) and energy (pumping time).

The crop was used with agricultural mulch to further efficiently the amount of water applied since mulch is a tool to reduce evaporation from the soil.

It is important to know the behavior of this type of sensor, since it can go out of calibration due to prolonged periods of dryness above the calibration, which could lead to a use below the expected efficiency.

## INDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO.....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
INDICE DE CONTENIDO.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE TABLAS.....	XIII
INDICE DE GRÁFICAS.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
2. LITERATURA REVISADA.....	- 3 -
2.1. Humedad del suelo.....	- 3 -
2.2. Humedad aprovechable.....	- 3 -
2.3. DPH.....	- 4 -
2.3.1. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente.....	- 6 -
2.4. Medidores de humedad.....	- 7 -
2.4.1. Sonda TDR.....	- 7 -
2.4.2. Tensiómetro.....	- 8 -
2.5. Sistema de riego.....	- 10 -
2.5.1. Riego por superficie.....	- 10 -
2.5.2. Riego por aspersión.....	- 10 -
2.5.3. Riego localizado.....	- 10 -
2.6. Automatización.....	- 11 -

2.6.1.	Sistema de riego automatizado .....	- 11 -
2.7.	Arrancador .....	- 12 -
2.7.1.	Que es un relevador .....	- 12 -
2.7.2.	Que es un contactor .....	- 13 -
2.7.3.	Cálculos eléctricos .....	- 14 -
2.8.	Box control o controlador .....	- 15 -
2.8.1.	Sensor de humedad .....	- 15 -
2.9.	Motor eléctrico .....	- 16 -
2.9.1.	Selección de equipo de bombeo .....	- 17 -
2.10.	Evapotranspiración .....	- 19 -
2.11.	Zonas de humedad en un suelo .....	- 20 -
2.12.	Acolchado agrícola .....	- 21 -
2.12.1.	Tipos de acolchado .....	- 21 -
3.	Hipótesis .....	- 22 -
4.	Justificación .....	- 23 -
5.	Objetivo general .....	- 23 -
6.	Lugar de establecimiento del experimento .....	- 23 -
7.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	- 26 -
7.1.	Materiales utilizados .....	- 26 -
7.2.	Estimación de la evapotranspiración .....	- 27 -
7.2.1.	Software CropWat .....	- 27 -
7.2.2.	Normales climatológicas de la zona .....	- 28 -
7.3.	Preparación del terreno .....	- 31 -
7.4.	Evaluación del bombeo .....	- 31 -
7.5.	Diseño del sistema hidráulico .....	- 33 -

7.5.1.	Uniformidad de los emisores .....	- 37 -
7.6.	Diseño del sistema eléctrico y arrancador .....	- 38 -
7.7.	Instalación de sensores de humedad .....	- 41 -
7.8.	Siembra .....	- 44 -
7.9.	Monitoreo del sistema.....	- 47 -
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	- 48 -
8.1.	Curva de evapotranspiración .....	- 48 -
8.2.	Propiedades del suelo.....	- 49 -
8.2.1.	Velocidad de infiltración .....	- 49 -
8.2.2.	Capacidad de campo y punto de marchitez permanente.....	- 50 -
8.3.	Datos medidos del riego .....	- 52 -
9.	CONCLUSIONES.....	- 57 -
10.	RECOMENDACIÓN .....	- 58 -
11.	LITERATURA CITADA .....	- 59 -

## INDICE DE FIGURAS

Imagen 1 Propiedades físicas del suelo según texturas .....	- 4 -
Imagen 2 Condiciones de humedad para suelos de diferentes texturas.....	- 7 -
Imagen 3 Sonda TDR .....	- 8 -
Imagen 4 Tensiómetro instalado en terreno de experimento.....	- 9 -
Imagen 5 Tensiómetro (medidor de tierra).....	- 9 -
Imagen 6 Kit de sensor de humedad Hunter .....	- 16 -
Imagen 7 Características de familia KL de bombas de manual Berkeley .....	- 18 -
Imagen 8 Curvas características para bomba Familia KL del manual Berkeley .....	- 19 -
Imagen 9 Cabezal de succión positiva neta de bomba Familia KL del manual Berkeley-	19 -
Imagen 10 Ubicación de Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.....	- 24 -
Imagen 11 Ubicación de las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.....	- 24 -
Imagen 12 Ubicación de la zona del experimento.....	- 25 -
Imagen 13 Área de la zona del experimento .....	- 25 -
Imagen 14 Mapa del terreno dividido en dos unidades .....	- 33 -
Imagen 15 Mapa del diseño hidráulico del proyecto.....	- 33 -
Imagen 16 Succión del sistema .....	- 34 -
Imagen 17 Conexión de línea principal de riego.....	- 35 -
Imagen 18 Conexión y división de las unidades de riego .....	- 35 -
Imagen 19 Conexión de línea secundaria y mangueras regantes de ambas unidades .....	- 36 -
Imagen 20 Conexión de cintillas de ambas unidades.....	- 36 -
Imagen 21 Chequeo de presión de ambas unidades .....	- 37 -
Imagen 22 Eficiencia de uniformidad de caudal de la unidad 1.....	- 37 -
Imagen 23 Eficiencia de uniformidad de caudal de la unidad 2.....	- 38 -
Imagen 24 Transformador del sistema eléctrico.....	- 39 -
Imagen 25 Alimentación principal del sistema eléctrico.....	- 39 -
Imagen 26 Diagrama de armado del controlador en software CadeSimu .....	- 40 -
Imagen 27 Prueba de controladores en laboratorio .....	- 40 -
Imagen 28 Armado de arrancador y controlador de las unidades de riego .....	- 41 -
Imagen 29 Modem de sensores de humedad Hunter y Rain Bird .....	- 42 -

Imagen 30 Calibración de sensores de humedad en laboratorio .....	- 42 -
Imagen 31 Conexión de sensores de humedad al campo .....	- 43 -
Imagen 32 Instalación de sensor de humedad .....	- 43 -
Imagen 33 Tubo de PVC de ¾ de pulgada para instalar sensor .....	- 44 -
Imagen 34 Semillas que se utilizaron para el experimento .....	- 45 -
Imagen 35 Instalación de acolchado agrícola.....	- 45 -
Imagen 36 Siembra de semillas .....	- 46 -
Imagen 37 Mantenimiento del cultivo (deshierbe).....	- 46 -
Imagen 38 Avance de crecimiento del cultivo .....	- 47 -
Imagen 39 Monitoreo de las plantas.....	- 47 -
Imagen 40 Lectura de porcentaje de humedad de la sonda TDR .....	- 51 -
Imagen 41 Medición de CC y PMP con tensiómetros .....	- 51 -
Imagen 42 Esquema de interpretación de DPH en el suelo.....	- 58 -

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Porcentaje de unidades de producción según sistema de riego utilizado .....	- 1 -
Tabla 2 Coeficiente Hazen-Williams .....	- 17 -
Tabla 3 Evapotranspiración calculada con software CropWat.....	- 27 -
Tabla 4 Normales climatológicas de la estación 00005140 – Ramos Arizpe .....	- 28 -
Tabla 5 Evaporación registrada en estación 00005140 – Ramos Arizpe .....	- 28 -
Tabla 6 Datos de los surcos del terreno.....	- 34 -
Tabla 7 Comparación de evapotranspiración programado vs cultivo .....	- 48 -
Tabla 8 Tabla de datos de velocidad de infiltración utilizando cilindros infiltrómetros .	- 49 -
Tabla 9 Tabla de velocidad de infiltración por el método de Kostiakov – Lewis.....	- 49 -
Tabla 10 Tabla de datos obtenido con el uso de sonda TDR para CC y PMP .....	- 50 -
Tabla 11 Tabla de datos obtenidos del monitoreo de ambas unidades de riego.....	- 52 -

## INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Curvas de temperatura de la estación 00005140 – Ramos Arizpe .....	- 29 -
Gráfica 2 Curva de evaporación de la estación 00005140 – Ramos Arizpe: elaboración propia .....	- 29 -
Gráfica 3 Curva de precipitación de la estación 00005140 – Ramos Arizpe .....	- 30 -
Gráfica 4 Curva de evapotranspiración potencial del cultivo de calabaza .....	- 30 -
Gráfica 5 Curva característica obtenida de la bomba número 1 .....	- 32 -
Gráfica 6 Curva característica de la bomba número 2.....	- 32 -
Gráfica 7 Curva de comparación de evapotranspiración programado vs cultivo.....	- 48 -
Gráfica 8 Curvas de datos obtenidos de los caudalímetros .....	- 53 -
Gráfica 9 Curvas de comparación de datos de los caudalímetros acumulados .....	- 54 -
Gráfica 10 Curva de datos obtenidos de las horas de riego.....	- 54 -
Gráfica 11 Curva de comparación de datos de las horas de riego acumulado .....	- 55 -
Gráfica 12 Curvas de datos obtenidos del monitoreo de los sensores de humedad .....	- 55 -
Gráfica 13 Curvas de comparación de datos de los tensiómetros digitales en campo ....	- 56 -
Gráfica 14 Curvas de comparación de lámina acumulada de unidad 1, 2 y lámina programada .....	- 57 -

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso del agua para fines agrícolas es un tema central en cualquier debate sobre los recursos hídricos y la seguridad alimentaria. En promedio, en la agricultura se ocupa el 70 por ciento del agua que se extrae en el mundo, y las actividades agrícolas representan una proporción aún mayor del "uso consuntivo del agua" debido a la evapotranspiración de los cultivos. A nivel mundial, más de 330 millones de hectáreas cuentan con instalaciones de riego. La agricultura de regadío representa el 20 % del total de la superficie cultivada y aporta el 40 por ciento de la producción total de alimentos en todo el mundo. (BANCO MUNDIAL, 2017).

Dentro de México el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa) lleva un registro de las concesiones y volúmenes de agua asignadas a los usuarios para el uso de aguas nacionales por lo que hoy en día los usuarios concesionados llegan a tener problemas con el uso excesivo de agua del concedido por las grandes cantidades de agua utilizadas para la agricultura.

En México los datos obtenidos por la Encuesta Nacional Agropecuaria 2019 (ENA, 2019) se registraron un total de 4,650,783 unidades de producción agropecuaria con 29 cultivos de interés, el sistema de riego que emplean se agrupa de la siguiente manera:

*Tabla 1 Porcentaje de unidades de producción según sistema de riego utilizado*

Sistema de irrigación	Porcentaje		
	ENA 2014	ENA 2017	ENA 2019
Riego por gravedad o rodado	77.70	70.80	74.90
Goteo	8.80	15.60	11.40
Aspersión	12.30	5.50	7.30
Microaspersión	5.00	5.20	3.40
Riego en tiempo real	ND	1.60	2.80
Otro sistema	5.10	6.70	4.30

*Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria 2019*

El uso del acolchado agrícola reduce la evaporación directa del agua desde la superficie del suelo lo que reduce la aplicación de agua en los cultivos, mantiene una mayor humedad en el suelo, favorece la estabilidad estructural y fertilidad del suelo y reduce la concentración y salinización del suelo.

El riego automático se desarrolló con el fin de mejorar las condiciones de aplicación del agua en el momento más adecuado para la planta. Se ha diseñado para controlar todos o al menos las más importantes variables que pueden influir en las condiciones de este con el fin de lograr la máxima eficiencia del riego: Caudales de agua, presiones en las redes, características del flujo, condiciones climáticas como temperatura ambiente, viento, radiación solar, etc., humedad del terreno, temperatura y potencial foliar como muchas otras variables. De esta forma se puede conocer exactamente tanto las necesidades como las aportaciones de agua que se están produciendo en cada instante.

Los controladores de riego son el centro de cualquier sistema de riego, sirven para determinar qué partes del sistema y cuándo se activarán para comenzar y terminar de regar la zona requerida. Asimismo, ayudan a suministrar un riego adecuado, para tener un sistema a la medida del cultivo. Pueden emplearse en lugares pequeños o grandes, pues su finalidad es distribuir el agua a puntos específicos a través de una serie de válvulas, por lo que existen distintos modelos que se adaptan a las necesidades de cada cliente. El controlador de riego es el encargado de automatizar el programa de riego, porque en él se establecen los horarios y minutos a regar por cada estación. Por medio de este aparato, se enciende el equipo de bombeo y manda señal de apertura y clausura de riego.

A este aparato se le puede colocar accesorios como sensores de humedad, aire, lluvia, heladas y meteorológicos para el ajuste automático del clima geográfico o del área a regar. Por esta razón, los controladores de riego son herramientas con grandes ventajas, destacando el cuidado de los cultivos o terrenos sin necesidad de estar presentes, porque funcionan a través de un controlador o un smartphone; también se adaptan a cualquier sistema de riego porque funcionan con cualquier dispositivo de riego; se adaptan a todas las necesidades; ahorran agua, considerablemente; utilizan poco espacio; cuentan con un sistema de riego por goteo, riego por nebulización, riego por aspersión y micro aspersión de suelo.

Los sistemas de automatización de riego comunes dependen mucho de la intervención de una persona que ingrese datos como los días y la duración del riego, por lo que sería conveniente que el usuario tenga conocimientos. Los sistemas de automatización por lo general consisten en un controlador PLC, tuberías de PVC, electroválvulas y aspersores.

Plantea una forma de automatización diferente, pues con el hardware y el software desarrollado se podrá medir el nivel de humedad del césped e indicar en qué momento se

debe iniciar y terminar el riego del suelo, según datos teóricos de agronomía. El sensor de humedad, utilizado en la presente tesis, utiliza la tecnología de Reflectometría de Dominios de Frecuencia (o FDR por sus siglas en inglés), son sensores son muy utilizados en agroindustria y el concepto de esta tecnología ha sido la más relevante. Este tipo de sensor estima la variación de la constante dieléctrica del agua en el suelo mediante la emisión de ondas electromagnéticas, la cual depende de la cantidad de agua que contiene, la señal de salida del sensor es un voltaje que varía casi directamente proporcional con el agua contenida en el suelo; es decir a menos humedad el sensor da menos voltaje, a más humedad, más voltaje. Esta señal es digitalizada y procesada por un microcontrolador, el cual toma decisiones y da órdenes según sea programado, y finalmente la orden se transmite inalámbricamente a una electroválvula conectada a aspersores.

## **2. LITERATURA REVISADA**

### **2.1.Humedad del suelo**

Existe una relación entre agua, suelo y planta que son de mayor importancia para el riego en la agricultura: 1) la capacidad del suelo para retener y drenar agua; 2) las características del flujo del agua en los distintos tipos de suelos; 3) las propiedades físicas del suelo incluyendo la materia orgánica, profundidad, textura y estructura del suelo; 4) las propiedades químicas del suelo, concentración de sales solubles y nutrientes debido al movimiento, uso y evaporación del agua localizada en el suelo. Tener el conocimiento de estas relaciones es fundamental para todos aquellos que desean entender y mejorar las actividades de la irrigación para obtener un mejor manejo y eficiencia en el uso del agua.

Si existe un exceso de humedad o una insuficiencia de agua en el suelo, el cultivo se verá afectado en su desarrollo.

### **2.2.Humedad aprovechable.**

Es la humedad que es retenida en el suelo entre un rango de presiones negativas (Tensión) que van desde un tercio bar o 33,33 kpa (capacidad de campo) hasta 15 bars ó 1500 kpa (punto de marchitez permanente). Sin embargo, la humedad disponible dentro de este rango de presiones puede variar dependiendo de la textura del suelo.

Imagen 1 Propiedades físicas del suelo según texturas

Textura	Porosid. total (%)	DA (g cm <sup>-3</sup> )	CC (%)	CMP (%)	Agua disponible		
					H% p.s.	H% vol	H mm 10 cm <sup>-1</sup>
Arenoso	38	1.65	9	4	5	8	8
	(32-42)	(1.55-1.8)	(6-12)	(2-6)	(4-6)	(6-10)	(7-10)
Franco-arenoso	43	1.5	14	6	8	12	12
	(40-47)	(1.4-1.60)	(10-18)	(4-8)	(6-10)	(9-15)	(9-15)
Franco	47	1.4	22	10	12	17	17
	(43-49)	(1.35-1.5)	(18-26)	(6-10)	(10-14)	(14-20)	(14-19)
Franco-arcilloso	49	1.33	27	13	14	19	19
	(47-51)	(1.3-1.4)	(23-31)	(12-15)	(12-16)	(16-22)	(17-22)
Arcillo-Arenoso	51	1.3	31	15	16	21	21
	(49-53)	(1.25-1.35)	(27-35)	(14-18)	(14-18)	(18-23)	(18-23)
Arcilloso	53	1.25	36	17	18	23	23
	(51-55)	(1.2-1.3)	(31-39)	(16-20)	(16-20)	(20-25)	(20-25)

Fuente: Israelsen y Hansen, 1979

El suministro de agua limitado juega un papel muy importante en retrasar el crecimiento de las plantas, genera un esfuerzo de la planta debido a la deficiencia de humedad en el suelo (deficiencia hídrica), ocasionando cambios fisiológicos de la planta.

La diferencia entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) es expresada en términos de humedad aprovechable en la zona radicular como:

$$HA = (CC - PMP) ZR$$

Donde:

HA= Humedad aprovechable

ZR= Profundidad de la raíz

### 2.3.DPH

Solo una fracción de la humedad aprovechable debe ser permitido para extraerse, a esta parte se define como deflexión permisible de la humedad en el suelo que se expresa con la siguiente ecuación:

$$DPH = f (CC - PMP) ZR$$

Donde:

DPH= Deflección permisible de la humedad

f= factor de abatimiento

Lámina de riego:

$$D' = \frac{DPH}{TR * EU} = \frac{f * HA}{E_a}$$

Donde:

$D'$  = Lámina de riego

$TR$  = Razón del agua evapotranspirada por el cultivo del total del agua aplicada

$EU$  = Uniformidad de emisión

$E_a$  = Eficiencia de aplicación

$$F' = \frac{DPH}{ET}$$

Donde:

$F'$  = Intervalo en días entre dos sucesivos riegos para una misma subunidad

$ET$  = Evapotranspiración de referencia

La descarga de los emisores está en función del área a irrigar y esto define el gasto del sistema, por tanto:

$$q_a = \frac{D' * (s_p * s_h)}{tr} * 10$$

Donde:

$q_a$  = Descarga por planta

$s_p$  = Separación entre plantas

$s_h$  = Separación entre hileras

$tr$  = Duración del riego en horas

$$NDP = \frac{D' * (s_p * s_h) * 10}{F'}$$

Donde:

$NDP$  = Necesidades de agua de la planta en base diaria

También podría ser calculado con la siguiente expresión:

$$NDP = \frac{ET * (s_p * s_h)}{E_a}$$

Calcular por nuevos medios la descarga por planta:

$$q_a = \frac{NDP * F'}{tr}$$

Conocido el valor de la descarga por planta será necesario especificar el número de subáreas en que se dividirá el campo para completar un riego con:

$$N' \leq \frac{F' * H'}{tr}$$

Donde:

$N'$  = Número de subáreas

$H'$  = Número máximo de horas por día que puede operar el sistema

Con estos parámetros definidos será posible ahora calcular el gasto del sistema con:

$$Q = 2.78 * \frac{A}{N'} * \frac{q_a}{s_p * s_h}$$

Donde:

$Q$  = Gasto requerido por el sistema

$A$  = Área a irrigar en hectáreas

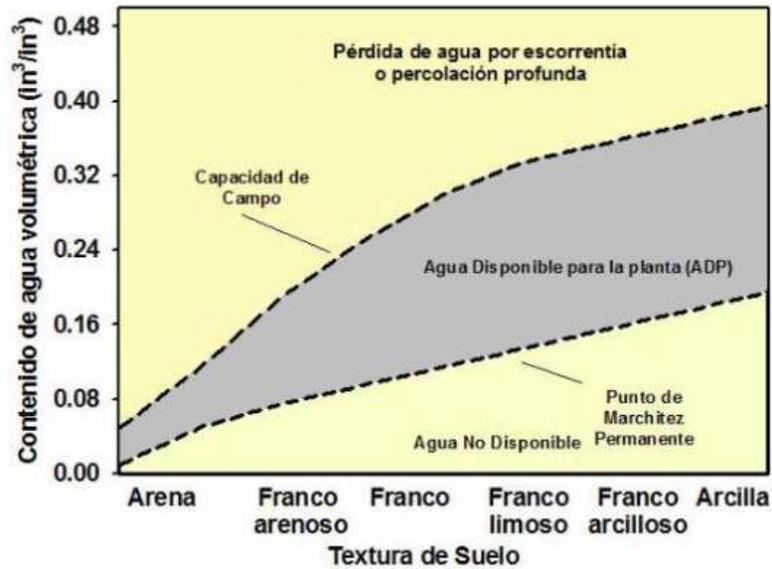
### **2.3.1. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente**

Existen diferentes tipos de suelo en los cuales se diferencian por su textura y estructura, la cantidad de agua que puede retener cada suelo también es diferente para cada suelo. El límite superior de almacenamiento de humedad es llamado “capacidad de campo” y en diferencia al límite inferior se le llama “punto de marchitez permanente”. Cada que se aplica agua al suelo ya sea por lluvia o riego hay un movimiento descendiente en el suelo al cual se le llama drenaje, la velocidad de este proceso se relaciona con la conductividad hidráulica del suelo. La capacidad de campo es cuando se aplica una cantidad de agua a un suelo a saturación y esta comienza a drenarse, después de un tiempo el rápido drenaje se vuelve insignificante y en ese punto se le denomina capacidad de campo. El punto de marchitez permanente es el punto en el que las plantas no pueden absorber la baja cantidad de agua que se encuentra en el suelo lo cual provoca marchitamiento y muerte de las plantas.

La cantidad de agua que las plantas tienen disponible del suelo que se le llama humedad aprovechable es la diferencia de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Relación general entre el agua disponible para la planta (ADP), la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, el agua no disponible y la clase de textura del suelo.

Imagen 2 Condiciones de humedad para suelos de diferentes texturas



Fuente: Zotarelli L., Dukes M. D., Morgan K. T

## 2.4. Medidores de humedad

### 2.4.1. Sonda TDR

Para medir el contenido de humedad en el suelo con esta sonda se utiliza la reflectometría, su nombre viene del inglés *Time Domain Reflectometry* (TDR) y es basada en la medida del retraso de una señal eléctrica enviada a través de un material con agua (humedad del suelo). El principio de la sonda se basa en el principio mediante el cual una onda emitida sufre una reflexión cada vez que se encuentre ante un cambio de medio. La precisión de las técnicas TDR depende del tipo de suelo ya que es más difícil su aplicación en zonas de escasa precipitación o gran salinidad.

Imagen 3 Sonda TDR



*Fuente: Autoría propia*

#### **2.4.2. Tensiómetro**

Los tensiómetros miden la cantidad de humedad del suelo en unidades de presión negativa la cual se llama tensión, esta es una medida de fuerza ejercida por las raíces de la planta al extraer el agua de los poros del suelo, a medida que las plantas extraen humedad del suelo, el suelo comienza a secarse por lo cual requiere más fuerza para extraer agua lo cual genera tensión en el suelo, a mayor tensión en el suelo, menor cantidad de humedad.

*Imagen 4 Tensiómetro instalado en terreno de experimento*



*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 5 Tensiómetro (medidor de tierra)*



*Fuente: Autoría propia*

## **2.5.Sistema de riego**

El riego se define como el sistema a partir del cual se logra un aporte de agua en los cultivos, capaz de suplir las necesidades hídricas de las plantas, que no se ven cubiertas únicamente por las precipitaciones. Este aporte puede realizarse con el fin de incrementar la producción de una parcela, transformando zonas agrícolas de secano en zonas de regadío.

Todo cultivo experimenta un intercambio de agua, tanto con el suelo sobre el que sitúa, como con la atmósfera que lo envuelve. Es del suelo de donde toma el agua necesaria para su nutrición, para después desprenderla a la atmósfera, mediante un proceso conocido como transpiración. Además, de forma paralela, se produce otro fenómeno de evaporación directa del agua del propio cultivo y desde la superficie del suelo hacia la atmósfera. A ambos fenómenos de transferencia se les conoce como evapotranspiración del cultivo.

### **2.5.1. Riego por superficie**

En el riego por superficie tiene una amplia variedad de sistemas de riego que tienen una característica en común de que el agua fluye por la superficie del terreno por la gravedad hasta cubrir toda la superficie deseada de la parcela. La característica principal en los riegos por superficie es que el propio suelo es el sistema de distribución de agua, al ser así este sistema es económico pero la cantidad de agua que se requiere para este sistema es muy aplica siendo el sistema de riego con mejor eficiencia de aplicación de agua.

### **2.5.2. Riego por aspersión**

El sistema de riego por aspersión es uno de los múltiples métodos de riego de cultivos que existen en la actualidad, consiste en aplicar el agua imitando la lluvia mediante un chorro de agua pulverizado en gotas. Funciona a través de una red de tuberías que transportan agua hasta los aspersores los cuales utilizan presión para ser disparada. Este sistema de riego como tal es potenciado a través de un sistema de bombeo.

Este mecanismo es posible alcanzar eficiencias de aplicación de 80% a 85%

### **2.5.3. Riego localizado**

El riego localizado es aquel que suministra agua filtrada directa e individualmente a cada planta, en suelo o medio de cultivo. En cultivos con grandes espaciados, el suministro se da con líneas laterales que van sobre la hilera del cultivo, incorporando emisores solamente en el área de influencia de la planta siendo estos, micro aspersores o goteros de botón, estos últimos con o sin estaca de tipo conductora o laberinto.

Con este sistema, las tasas de aplicación de agua son ligeras pero muy frecuentes, ya que buscan reponer, en medida de lo posible solamente el agua consumida por la planta en el intervalo entre riegos, esto nos permite tener eficiencias muy altas, ya que, al suplir solo el agua necesaria, la pérdida por percolación es mínima al igual que se reduce el consumo de agua por plantas no benéficas y evaporación de la superficie del suelo.

Los sistemas de riego localizados tienen una eficiencia de aplicación del 40% al 60% comparación de otros sistemas de riego además de ser el sistema que menor mano de obra se requiere para manejarlo, pero a diferencia de los demás sistemas es más costosa su instalación.

## **2.6. Automatización**

El concepto de automatización está enfocado en una disciplina de control que se basa en el uso de sistemas electromecánicos para controlar de forma automatizada diversos procesos industriales. Abarca control, sistemas digitales, supervisión, gestión de datos, accionamientos, instrumentación, comunicaciones, producción, interacciones y muchos otros. La automatización incorpora elementos y dispositivos tecnológicos que aseguran tener un control específico sobre los procesos y sus evidentes comportamientos.

Esta automatización debe ser capaz de poder controlar efectivamente todo el conjunto de posibles eventos previstos frente a posibles ocurrencias; buscando siempre lograr la situación más favorable según la determinación de recursos asignados.

### **2.6.1. Sistema de riego automatizado**

Consiste en una forma automatizada en el sistema de riego para proveer de agua a los cultivos, puede emplearse por medio de la aspersión o el goteo. También los hay que combinan tanto el goteo como la aspersión.

En otras palabras, el sistema de riego automatizado se encarga de controlar la distribución de agua. Con este sistema automatizado puede escogerse la cantidad, el horario, la ubicación y la frecuencia del riego. Convirtiéndose así en la opción más productiva y cómoda al momento de regar, ya que mantiene sanos y verdes el césped, las plantas y las plantaciones; permitiéndonos ahorrar tiempo y esfuerzo.

Actualmente hay muchas técnicas y es que los sistemas de riego automatizados están marcando tendencia debido a la gran cantidad de beneficios que poseen.

Para poder instalar un sistema de riego automatizado, previamente debe hacerse un estudio del terreno y de los tipos de cultivos, con el fin de hallar la mejor manera para la distribución del agua y lograr los resultados óptimos. También hay que analizar dónde debe estar ubicado, cuál será la cantidad de agua que se va a usar y la frecuencia con la que se programará el riego.

Estos sistemas actualmente representan un gran aliado para los agricultores, sus cultivos y cosechas. Esta tecnología está evolucionando, incorporando en sus innovaciones novedades cada vez más eficientes.

## **2.7.Arrancador**

Son equipos de control eléctrico que regulan la tensión y la corriente que conectan a la energía de un motor eléctrico para controlar paros y arranques. Los arrancadores están contruidos en dos partes, los contactores y las protecciones contra sobrecargas, los contactores controlan el paso de corriente eléctrica y vanean según las fases, voltaje y amperaje del motor y las protecciones contra sobrecargas protegen el motor evitando que pase un exceso de corriente eléctrica por algún fallo en alguna de las fases evitando que se queme el motor. El funcionamiento de los arrancadores se distingue por arrancadores de tensión plena, tensión reducida, suaves y de estado sólido.

Las funciones de los arrancadores:

- Reducir picos de corriente y eliminar caídas de tensión en la línea
- Reducir pares de arranque
- Acelerar, desacelerar o frenar suavemente la corriente para la seguridad de las personas u objetos transportados
- Arrancar maquinas progresivamente
- Proteger la maquina y motor con un sistema de protección completo
- Supervisar y controlar el motor en forma remota

### **2.7.1. Que es un relevador**

Conocidos también como relés, son dispositivos electromagnéticos que se encargan de abrir y cerrar el paso de la corriente eléctrica y son accionados bajo este mismo tipo de energía.

Los relevadores tienen una bobina conectada a una corriente, cuando esta se activa produce un campo electromagnético, el cual provoca que el contacto del relé que se encuentra

normalmente abierto se cierre y de esta forma, permite el paso de la corriente por un circuito para ejercer cierta acción, como arrancar un motor.

Cuando se deja de proveer corriente a la bobina, el campo electromagnético se retira y el contacto del relé se vuelve a abrir, dejando sin corriente al circuito eléctrico que iba al motor o al objeto en cuestión.

Como vemos, los relevadores son útiles para activar un circuito que tiene un consumo considerable de electricidad mediante un circuito de pequeña potencia de 12 o 24 voltios que imanta la bobina.

Los relevadores son imprescindibles para el control de circuitos eléctricos. Es muy común que se utilicen en los botones de parada de emergencia, es decir, para frenar una máquina que se encuentra dañada y no cause daños al personal que la ópera, basta con que se active el botón para realizar esta función, suelen ser de color rojo con carcasa amarilla.

También se pueden usar para la detección de fallas en controles a dos manos, cableados y circuitos de protección de contactores.

### **2.7.2. Que es un contactor**

El Contactor es un dispositivo eléctrico que puede cerrar o abrir circuitos en carga o en vacío en los que intervengan cargas de intensidad que pudieran producir algún efecto perjudicial para quien lo accione como por ejemplo en maniobras de apertura y cierre de instalaciones de motores.

Los contactores son dispositivos de conmutación eléctricos, similares a un relé. Los contactores pueden manejar niveles de corriente mucho más altos que los relés estándar, lo que los hace útiles para aplicaciones de equipos móviles. El contactor funciona aplicando un voltaje a la bobina, esto crea un campo magnético que mueve los contactos a la posición cerrada y completa el circuito. Una vez que se elimina el voltaje de la bobina, los contactos se abrirán nuevamente y desconectarán el circuito. La gran superficie de contacto y la gran cantidad de presión de contacto permiten que el contactor maneje las corrientes de entrada más altas que se ven típicamente en los mercados de equipos móviles.

Es una de las piezas clave en la automatización del motor eléctrico. Su correcto y eficiente desempeño es muy importante para establecer procesos autómatas estables. Los motores eléctricos están vinculados directamente con accionamientos, muchas veces cíclicos, en diversas áreas.

### 2.7.3. Cálculos eléctricos

Realizar estos cálculos son tan importantes para la selección del equipo del arrancador tanto como para el contactor como para selección de equipo de protección ya que la variación de voltaje puede generar un pico de corriente eléctrica que realice una interrupción en el suministro eléctrico para el equipo, el valor que se considera para la selección de estos es el amperaje que se calcula de la siguiente forma:

$$A = \frac{HP * 746}{Voltaje * \sqrt{F} * fs}$$

Donde:

$A \rightarrow$  Amperaje

$HP \rightarrow$  Caballaje comercial del motor

$Voltaje \rightarrow$  Voltaje disponible en la zona

$F \rightarrow$  Número de fases

$fs \rightarrow$  Factor de servicio

Al igual la selección para el sistema de cableado para el equipo para evitar caídas de voltaje fuera del rango permitido para el funcionamiento del equipo de bombeo, se hace un cálculo de caída de tensión para saber que cable seleccionaremos, material de conducción, área transversal del cable y resistencia de este y esto se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta v = \frac{2 * \rho * L * P}{V * S}$$

Donde:

$\Delta v \rightarrow$  Caída de tensión en volts

$\rho \rightarrow$  Resistividad del material

$L \rightarrow$  Longitud desde la fuente de energía al equipo en m

$P \rightarrow$  Potencia total requerida en watts

$V \rightarrow$  Voltaje disponible en la zona

$S \rightarrow$  Área transversal del conductor en  $mm^2$

Se recomienda para una correcta operación que la caída de tensión no exceda el 5% del voltaje disponible.

## **2.8.Box control o controlador**

Un programador de riego es una herramienta que se conecta al grifo, salida del agua o a las electroválvulas con el objetivo de permitirnos programar los días, las horas y la duración del riego incluso cuando estamos durante varios días fuera de casa por ello estamos hablando de un dispositivo cómodo y con grandes ventajas.

Los controladores de riego son el centro de cualquier sistema de riego, sirven para determinar qué partes del sistema y cuándo se activarán para comenzar y terminar de regar la zona requerida.

Asimismo, ayudan a suministrar un riego adecuado, para tener un sistema a la medida del cultivo. Pueden emplearse en lugares pequeños o grandes, pues su finalidad es distribuir el agua a puntos específicos a través de una serie de válvulas, por lo que existen distintos modelos que se adaptan a las necesidades de cada cliente.

El controlador de riego es el encargado de automatizar el programa de riego, porque en él se establecen los horarios y minutos a regar por cada estación. Por medio de este aparato, se enciende el equipo de bombeo y manda señal de apertura y clausura de riego.

A este aparato se le puede colocar accesorios como sensores de humedad, aire, lluvia, heladas y meteorológicos para el ajuste automático del clima geográfico o del área a regar.

Por esta razón, los controladores de riego son herramientas con grandes ventajas, destacando el cuidado de los cultivos o terrenos sin necesidad de estar presentes, porque funcionan a través de un controlador o un smartphone; también se adaptan a cualquier sistema de riego porque funcionan con cualquier dispositivo de riego, ahorran agua considerablemente.

### **2.8.1. Sensor de humedad**

Un sensor de humedad del suelo es un dispositivo que mide la humedad actual del suelo. Los sensores integrados en el sistema de riego ayudan a programar el suministro y la distribución de agua de forma mucho más eficiente. Estos medidores ayudan a reducir o mejorar el riego para un crecimiento óptimo de las plantas.

Los sistemas de sensores de humedad del suelo resultan vitales, ya que el cultivo es un proceso dinámico que requiere un mantenimiento regular. Esta dinámica justifica el uso de sensores para diferentes terrenos, etapas de desarrollo de las plantas, características climáticas y para anticiparse a los riesgos meteorológicos. Mediante el análisis de la emisión

de infrarrojos (IR), los sensores remotos por satélite garantizan un flujo constante de datos relevantes y fiables.

*Imagen 6 Kit de sensor de humedad Hunter*



*Fuente: Autoría propia*

Estos sensores de humedad son sensores resistivos ya que funcionan mediante una señal que toman de la resistencia (impedancia) o conductividad eléctrica de la humedad del terreno, es decir, mientras exista una mayor cantidad de humedad (saturación) el sensor toma una conductividad eléctrica alta y si la humedad se reduce la señal de la conductividad eléctrica es más baja, de esta forma previene el riego excesivo cuando hay humedad, se conecta a un controlador hunter con entrada de sensor que está normalmente cerrado y los cables del sensor conectados a una electroválvula a la cual le interrumpe su alimentación.

### **2.9.Motor eléctrico**

Los motores de riego son dispositivos fundamentales en la agricultura de irrigación, pues son los responsables de accionar el funcionamiento de las bombas de agua. La mayoría de estas bombas son de tipo rotodinámico. Es decir, generan un aumento de la velocidad del agua gracias al giro de las palas que propulsa un motor. Gracias a este movimiento, el líquido alcanza la presión necesaria en el cuerpo de la bomba.

### 2.9.1. Selección de equipo de bombeo

Para la selección de equipo de bombeo y deben obtener las pérdidas de carga por fricción generadas por el sistema hidráulico tanto en las mangueras regantes o cintilla, líneas secundarias de riego y líneas principales al igual que obtener el cálculo de caudal de riego que se requiere en todo el sistema el cual se obtiene con el gasto del diseño hidráulico del sistema, con estos datos se obtiene el cálculo de caballos de fuerza del motor para el sistema con la siguiente ecuación:

$$Hp = Hf * Q * 0.018$$

Donde:

Hp = Horse Power ó Caballos de fuerza

Hf = Perdida de carga por fricción en tubería (metros)

Q = Caudal (lps)

$$Hf = \frac{1.21 * 10^{10}}{25.4 * d^{4.87}} * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} * L * 1.023$$

Donde:

Hf = Perdida de carga por fricción en tubería (metros)

d = Diámetro de tubería (pulgadas)

Q = Caudal (lps)

C = Coeficiente de Hazen - Williams

L = Longitud de la tubería (metros)

Tabla 2 Coeficiente Hazen-Williams

Material	C
Hierro fundido	80
Hierro dúctil	120
Hierro galvanizado	100
PVC	140
Concreto	120
Acero nuevo	140

Fuente: García y Briones, 2015

## 2.9.2. Sistema de curvas características de las bombas

Las curvas de una bomba son esenciales para la selección de un equipo de bombeo ya que con esta te permite identificar a que gasto opera la bomba al tenerla a diferentes presiones de operación que te permite hacer una elección más correcta de la bomba:

Identificar el caballaje de la bomba → buscar bomba con el caballaje calculado → identificar carga y gasto del sistema dentro de la curva → si la carga con el gasto queda directa en la curva o dentro de ella, la bomba cumple con los requerimientos.

Familia de la bomba;

*Imagen 7 Características de familia KL de bombas de manual Berkeley*



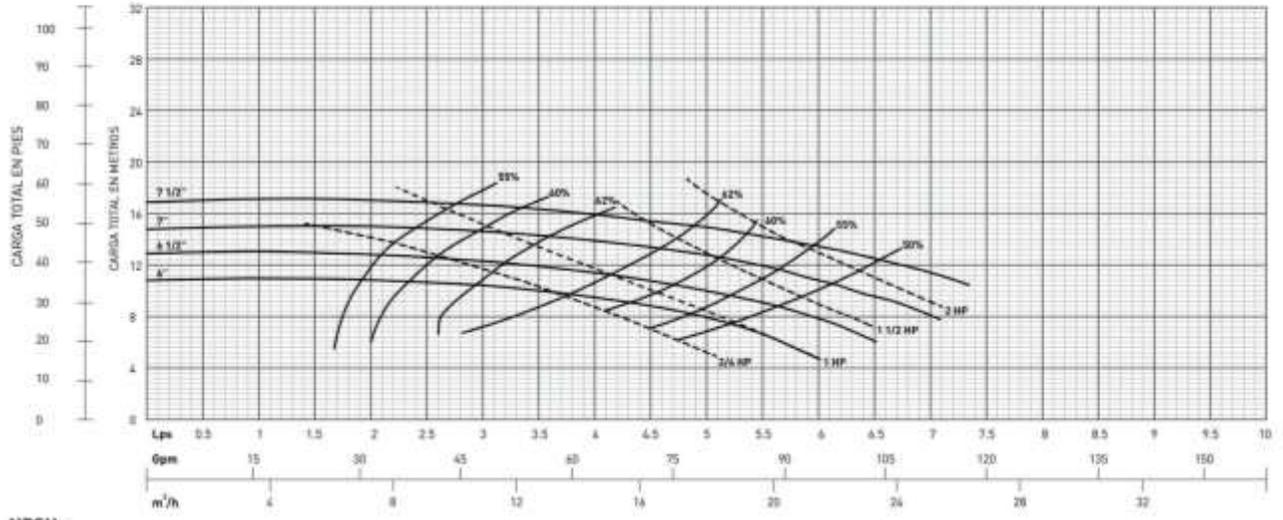
*Fuente: Catalogo de bombas Berkeley, 2013*

Sistema de curvas características del motor de  $\frac{3}{4}$  hp, 1hp, 1.5hp y 2hp con una carga máxima de 17 metros y un gasto máximo de 7.5lps junto con su curva de NPSH que es la capacidad de succión de la bomba.

Imagen 8 Curvas características para bomba Familia KL del manual Berkeley

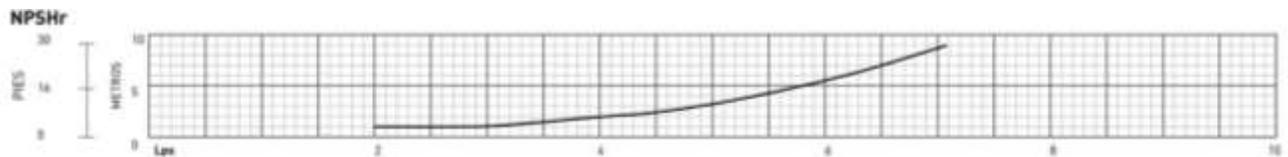
## K1 1/4L

R.P.M. 1750  
1 1/2" x 1 1/4"  
Succión y Descarga  
Gráfica MKT22



Fuente: Catalogo de bombas Berkeley, 2013

Imagen 9 Cabezal de succión positiva neta de bomba Familia KL del manual Berkeley



Fuente: Catalogo de bombas Berkeley, 2013

## 2.10. Evapotranspiración

### Definición

- Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos:
- Evaporación desde el suelo y desde la superficie cubierta por las plantas.
- Transpiración desde las hojas de las plantas.

Por lo tanto, el cálculo de la ET se usa para saber el agua que necesitan las plantas para su correcto desarrollo, ya sea en un jardín o en un campo de cultivo. Como consecuencia de esto, para poder diseñar todo lo relacionado con el riego, programación de riegos, cantidades de agua a aportar a un determinado cultivo, diseño y elección del mejor sistema de riego, conducciones de agua, etc., es necesario calcularlo de la manera más precisa posible.

### Condicionantes

Para que se produzca ET tienen que darse las siguientes condiciones:

- 1.- El agua tiene que estar presente.
- 2.- Tiene que haber alguna fuente de energía que convierta el agua líquida en vapor de agua.
- 3.- Se tiene que producir un fenómeno físico que separe el vapor de agua de la superficie de evaporación.

Las plantas para su crecimiento necesitan agua y otros nutrientes que toman del suelo a través de las raíces, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que toman del aire a través de sus hojas y una fuente de energía que es la luz del Sol. Las dos fuentes principales de agua que usan las plantas son la lluvia y el riego. En ambos casos, parte del agua que llega al suelo o las plantas queda retenido en forma de gotas sobre las hojas o sobre la superficie del suelo. Ésta es la parte de agua más fácilmente evaporable. El resto del agua se infiltra en el suelo de manera que las plantas pueden obtenerla por medio de sus raíces. Para obtener el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, las plantas abren sus estomas, poros microscópicos en la superficie de las hojas. Durante este proceso las plantas pierden agua hacia la atmósfera (transpiración). Una vez que están disponibles para las plantas el agua y el CO<sub>2</sub>, en las hojas se produce la fotosíntesis mediante la cual las plantas sintetizan glucosa (su alimento) a partir de agua, CO<sub>2</sub> y luz solar. El agua líquida que se evapora desde la superficie foliar y desde la superficie del suelo requiere gran cantidad de energía, alrededor de 540 calorías por gramo de agua a 100 °C. Esta energía proviene de la luz del Sol en forma de energía solar.

Evapotranspiración del cultivo de referencia o abreviadamente evapotranspiración de referencia (ETo)

Evapotranspiración de un cultivo en condiciones estándar (ETc): Es la evapotranspiración que se produciría en un cultivo especificado, sano y en condiciones óptimas de humedad del suelo. Es igual a la anterior (ETo) multiplicada por un coeficiente (Kc) correspondiente al tipo de cultivo:

$$Etc = ETo \cdot Kc$$

### **2.11. Zonas de humedad en un suelo**

Lo que se encuentra por encima de la superficie freática se denomina zona de aireación o zona vadosa. La humedad en ella puede estar distribuida de un modo irregular, pero esquemáticamente podemos distinguir tres subzonas:

–Subzona de Evapotranspiración. Es la afectada por este fenómeno. Puede tener desde unos pocos cm., si no existe vegetación, hasta varios metros.

–Subzona intermedia, entre las dos anteriores. A veces inexistente, a veces de muchos metros de espesor.

–Subzona capilar, sobre la superficie freática. El agua ha ascendido por capilaridad, su espesor es muy variable, dependiendo de la granulometría de los materiales.

En toda la zona vadosa puede haber agua gravimétrica que aún no ha descendido o contener agua por capilaridad. En la subzona capilar, la humedad forma una banda continua, mientras que en el resto estará irregularmente repartida.

## **2.12. Acolchado agrícola**

El acolchado es una técnica agrícola cuyo objetivo es elevar la temperatura del suelo alrededor de la planta para que las raíces de estas estén en mejores condiciones para el desarrollo de la planta.

Su uso también contribuye a reducir el consumo de agua en las explotaciones debido a que limita la evaporación desde la superficie del suelo. Es muy utilizada tanto en cultivo en exterior como en cultivo bajo invernadero.

Beneficios del acolchado

- Mayores rendimientos con mejores calidades.
- Precocidad.
- Control de malezas.
- Ahorro de agua, conservación de agua.
- Ahorro de fertilizantes.
- Anticipo de la fecha de siembra.
- Protección de la estructura del suelo, control de erosión.
- Control de insectos.
- Mayor eficiencia en los métodos de desinfección químico de suelo.
- Desinfección de suelo por solarización.

### **2.12.1. Tipos de acolchado**

Los tipos de acolchado se clasifican según los aditivos y el color de la película de polietileno, ya que según el color que posee el acolchado tiene unas propiedades distintas.

Trasparente:

Es el polietileno sin ningún tipo de pigmento ni aditivo y se utiliza para elevar la temperatura del suelo y evitar la evaporación del agua de la superficie del suelo. No realiza control sobre malas hierbas, ya que pueden crecer bajo el plástico.

**Negro:**

Se utiliza para el control de maleza y evitar la evaporación de agua del suelo. Debido a su color absorbe en torno a un 91% de la radiación solar que incide sobre él, por lo que es el tipo de acolchado que más se calienta, aunque no transmite la radiación al suelo. Puede llegar a producir quemaduras en los órganos de la planta en contacto con el film

**Gris:**

Asegura el control de malas hierbas, calienta el suelo menos que el plástico negro, ya que su coloración absorbe menos calor ya que refleja parte de la radiación solar. Además, al reflejar parte la radiación solar, provoca el aumento de la fotosíntesis al incidir parte de la radiación en las plantas.

**Metalizado:**

Se comporta igual al plástico gris. Además, repele a aves e insectos debido a la reflexión de la plata. Puede estar totalmente impreso en plata o en una franja central.

**Marrón o verde traslúcido:**

Ofrece un adecuado control de la maleza permitiendo el calentamiento del suelo, ya que transmite parte de la radiación que incide sobre él. Reduce la pérdida de calor durante la noche.

### **3. Hipótesis**

Ya que el porcentaje de humedad en el suelo es la variable detonante de la irrigación, el uso de un sistema de riego automatizado con base en un SENSOR DE HUMEDAD en comparación con los sistemas convencionales que están basados en el tiempo (Intervalo y duración sistema de paros y arranques automáticos), se puede disminuir el consumo de energía eléctrica provocada por el bombeo del sistema hasta en un 10 % y consumir menor volumen de agua a lo largo del ciclo de un cultivo obteniendo los mismos o mejores resultados, esto es debido a que los sensores tienen la capacidad de medir la humedad en el suelo y lograr mantener un porcentaje adecuado al requerimiento.

#### **4. Justificación.**

Se requiere actualmente en el campo el utilizar lo más avanzado en la tecnología de sistemas de comunicación y de internet, así como lo que el mercado ha desarrollado como sensores que aplicados en el suelo es obvio que se tiene una medición más exacta de las condiciones de humedad.

Este trabajo tiene como justificación el demostrar que con el uso de sensores de humedad se obtiene una condición tolerante, controlada; y en consecuencia el paro y arranque del bombeo se realiza con mayor eficiencia tanto el *Intervalo como Duración* provocando un menor consumo de energía.

Actualmente en la agricultura el uso del recurso agua está cada vez más limitado por lo que día a día se buscan diferentes alternativas para obtener mejores rendimientos de los cultivos reduciendo el uso del agua en el riego, la automatización es una de las mejores alternativas para el ahorro de este recurso. Con el uso de sensor de humedad en el sistema automatizado se puede reducir aún más la aplicación del agua en el cultivo ya que funciona a base del porcentaje de humedad que tiene el suelo, con un cultivo con acolchado agrícola debería bajar aún más el consumo de agua.

#### **5. Objetivo general**

Realizar una evaluación y análisis del consumo de energía eléctrica y volumen de agua en dos sistemas de riego de goteo por respuesta a dos sensores de humedad colocados en campo implementando el uso de acolchado agrícola negro y compararlos contra el testigo que es un sistema programado mecánicamente.

#### **6. Lugar de establecimiento del experimento**

Este trabajo se realiza en conjunto del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro dentro del área experimental del mismo departamento en el jardín hidráulico que se localiza en:

UTM 14R

295102.74 m E

2805783.53 m N

Altimetría: 1764 msnm

Imagen 10 Ubicación de Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro



Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2022

Imagen 11 Ubicación de las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro



Fuente: Google Earth, 2022

*Imagen 12 Ubicación de la zona del experimento*



*Fuente: Google Earth, 2022*

*Imagen 13 Área de la zona del experimento*



*Fuente: Google Earth 2022*

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1. Materiales utilizados

- Dos bombas centrífugas
- Cable de cobre (calibre 14)
- Cámara fotográfica
- Cinta topográfica de 30m
- Cintilla Toro calibre 6mil 16mm 1.011ph @20cm (EA5060867-1000)
- Plástico acolchado negro
- Cilindros infiltrómetros
- Computadora con software especializado (AutoCAD, Excel, Google Earth, etc.)
- Conectores manguera – cinta 5/8”
- Conjunto de tubería y conexiones de PVC 1” (tees, codos, adaptadores, etc.)
- Conjunto de filtros 120 mesh
- Conjunto de pichanchas
- Voltiamperímetro de gancho
- Contactores monofásicos 120v
- Dos controladores Hunter NODE-BT
- Cronómetro
- GPS
- Horómetros 120v
- Manguera ciega 16mm
- Manómetro 0 – 60PSI
- Multímetro de gancho
- Pegamento para PVC (Cemento)
- Dos sensores de humedad en suelo Hunter SOIL-CLIK
- Tractor con implementos (rastra y surcadora)
- Sonda TDR
- Dos tensiómetros (medidores de tierra)

### **Método:**

Este trabajo se inicia realizando los cálculos de evapotranspiración del cultivo, así como la preparación del terreno (rastreo y construcción de camas), la evaluación del bombeo

(amperaje, voltaje, gasto y carga), y el conocimiento de las curvas características del bombeo (elaboración de la curva de carga contra descarga en laboratorio). Realicé un diseño del sistema hidráulico para un terreno irregular (longitudes variables pero con igual número de goteros) uso de ecuaciones de Hazen-Williams para perdidas de carga y de Bernoulli para presión de operación, pero con la misma cantidad de goteros, se evaluó la uniformidad de los emisores en campo con método de Christiansen, así como el diseño del sistema eléctrico, construcción y armado de un gabinete de automatización en campo, calibración (laboratorio) e instalación de sensores de humedad, proceso de siembra y monitoreo del sistema.

## 7.2. Estimación de la evapotranspiración

### 7.2.1. Software CropWat

Para la estimación de la evapotranspiración del cultivo se tomaron en cuenta las normales climatológicas de la estación meteorológica número 00005140 RAMOS ARIZPE, COAHUILA DE ZARAGOZA y datos de METEORED los cuales se agregaron al software de CropWat para obtener los datos de la evapotranspiración de referencia para el cultivo

Tabla 3 Evapotranspiración calculada con software CropWat

MES	TEMP MIN °C	TEMP MAX °C	HUMEDAD %	VIENTO mt/s	SOL HORAS	RAD MJ/m2/día	ET mm/día
ENERO	-2.00	29.00	42	2.4	11	18.4	4.5
FEBRERO	0.00	30.00	58	2.7	11.5	21.5	4.89
MARZO	6.00	34.00	51	3.4	12	25	6.75
ABRIL	7.00	37.00	38	4.2	12.6	28	9.06
MAYO	13.00	34.00	47	4.4	13	29.5	8.42
JUNIO	14.00	37.00	57	4.5	13.7	30.6	8.79
JULIO	15.00	35.00	34	4.4	13.1	29.5	9.4
AGOSTO	15.00	33.00	54	3.7	12.5	28	7.41
SEPTIEMBRE	10.00	33.00	65	3.6	12	25.6	6.41
OCTUBRE	8.00	35.00	52	2.9	11.5	22.2	6.14
NOVIEMBRE	6.00	29.00	73	2.6	11	18.8	3.91
DICIEMBRE	5.00	32.00	76	2.8	10.5	17	4.03

Fuente: Software CropWat, 2023

### 7.2.2. Normales climatológicas de la zona

Se realizó la consulta de los datos de la estación meteorológica más cercana al área del experimento que fue la número 00005140 RAMOS ARIZPE, COAHUILA DE ZARAGOZA, los datos se consultaron en Información Estadística Climatológica en la página de CONAGUA:

Altitud= 1400 metros

Latitud= 25° 53' 91"

Longitud= 100° 95' 08"

Tabla 4 Normales climatológicas de la estación 00005140 – Ramos Arizpe

MES	Precipitación mm	Evaporación mm	Temperatura máx. °C	Temperatura mín. °C
Enero	14.30	64.30	20.80	3.20
Febrero	11.80	92.50	22.30	4.40
Marzo	5.50	125.40	26.60	6.90
Abril	17.00	167.50	28.70	10.20
Mayo	41.00	195.20	31.30	14.00
Junio	30.10	201.70	32.20	15.70
Julio	63.50	203.40	31.60	15.70
Agosto	29.10	193.50	31.00	15.40
Septiembre	58.30	142.50	28.80	13.10
Octubre	21.60	115.90	27.10	9.70
Noviembre	9.90	77.80	23.20	6.20
Diciembre	15.60	63.70	21.00	3.80

Fuente: SMN 2010

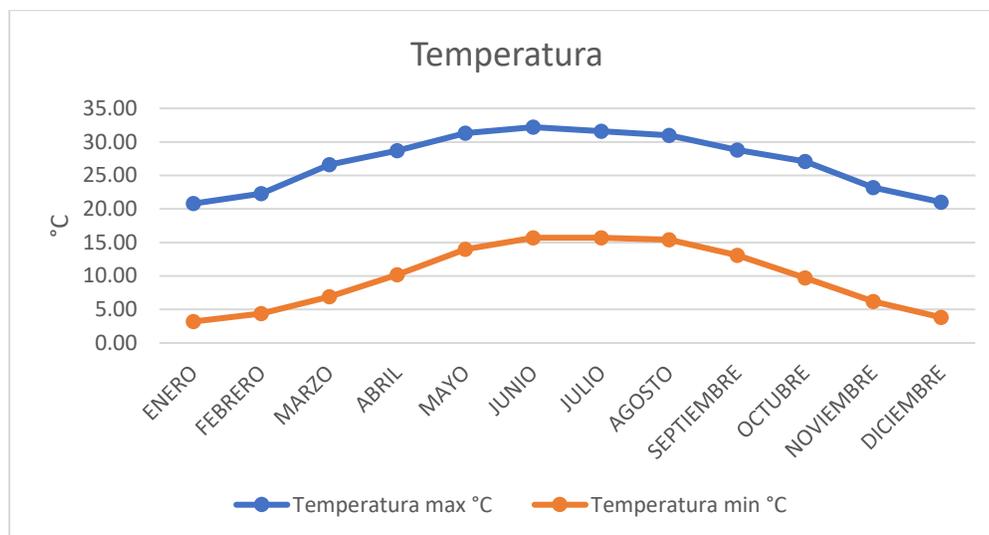
Tabla 5 Evaporación registrada en estación 00005140 – Ramos Arizpe

Mes	EV (mm)	Días	EV (mm/día)
ENERO	64.30	31	2.07
FEBRERO	92.50	28	3.30
MARZO	125.40	31	4.05
ABRIL	167.50	30	5.58
MAYO	195.20	31	6.30
JUNIO	201.70	30	6.72
JULIO	203.40	31	6.56
AGOSTO	193.50	31	6.24
SEPTIEMBRE	142.50	30	4.75
OCTUBRE	115.90	31	3.74

NOVIEMBRE	77.80	30	2.59
DICIEMBRE	63.70	31	2.05

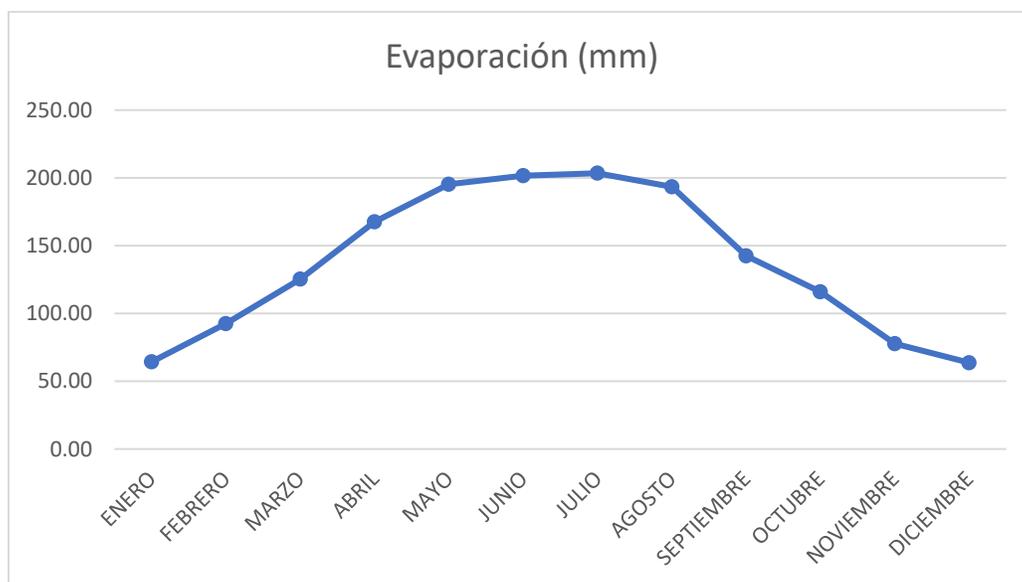
Fuente: SMN 2010

Gráfica 1 Curvas de temperatura de la estación 00005140 – Ramos Arizpe



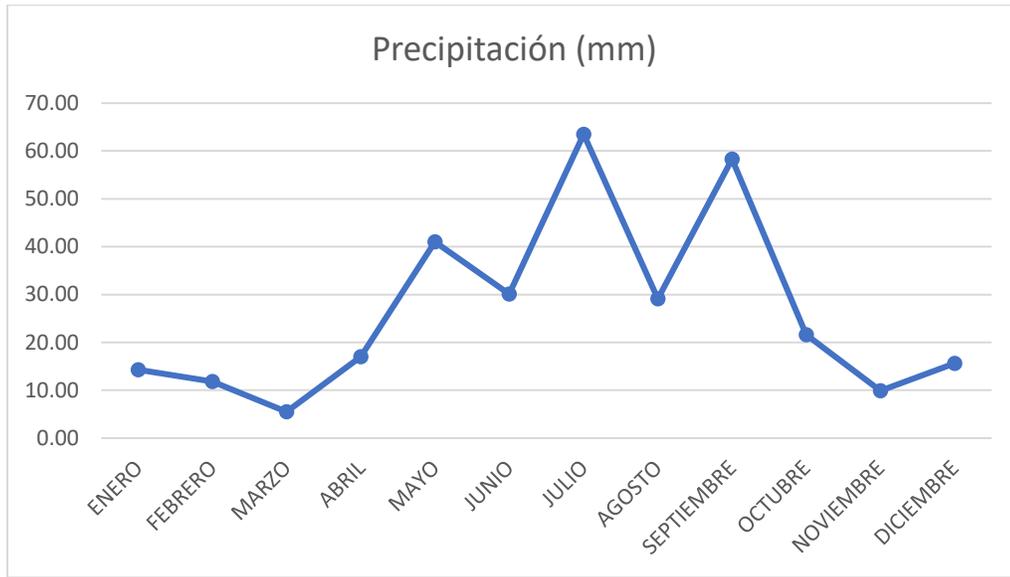
Fuente: Autoría propia con software Microsoft Excel

Gráfica 2 Curva de evaporación de la estación 00005140 – Ramos Arizpe: elaboración propia



Fuente: Autoría propia con software Microsoft Excel

Gráfica 3 Curva de precipitación de la estación 00005140 – Ramos Arizpe

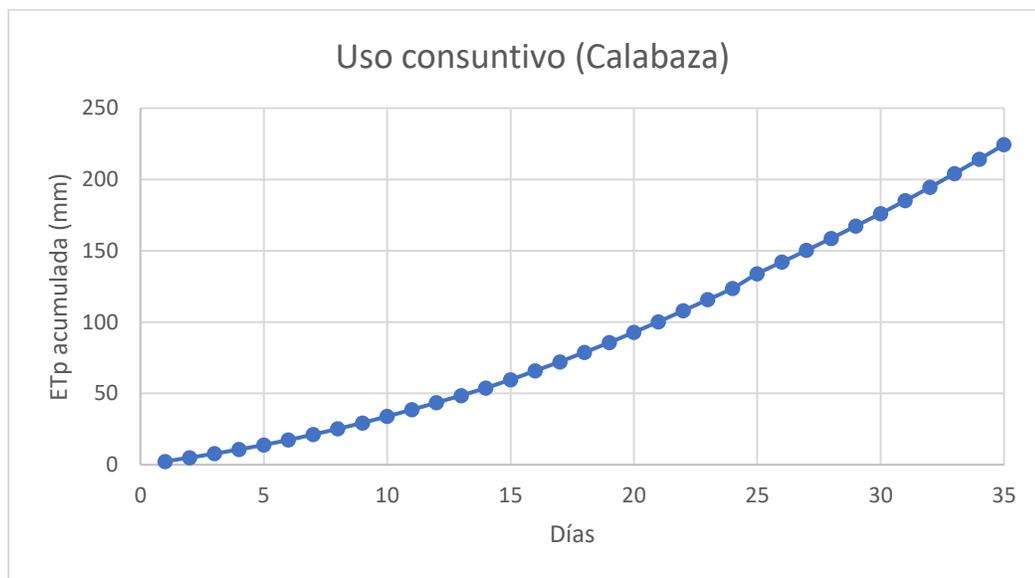


Fuente: Autoría propia con software Microsoft Excel

### 7.2.3. Evapotranspiración potencial del cultivo

El cálculo del uso consuntivo del cultivo da como resultado que en los 35 días de mediciones el cultivo debió de haber evapotranspirado 224.4mm de agua más el porcentaje de eficiencia global del 82% da un total de 273.65mm

Gráfica 4 Curva de evapotranspiración potencial del cultivo de calabaza



Fuente: Autoría propia con software Microsoft Excel

### **7.3.Preparación del terreno**

Identificación del área de trabajo

Volteo de suelo (subsuelo y arado)

Ventilación del terreno

Levantamiento de camas

Instalación de cintilla

Acolchado

### **7.4. Evaluación del bombeo**

Se realizaron pruebas de gasto de las bombas con el método  $Q = V/t$  en un contenedor de 20 litros:

Prueba de Bomba número 1

29 segundos

28 segundos

29 segundos

Promedio = 28.66 segundos

Gasto= 0.697 litros por segundo

Prueba de bomba número 2:

37 segundos

35 segundos

36 segundos

Promedio= 36 segundos

Gasto= 0.555 litros por segundo

Toma de amperaje:

Bomba 1

Cable 1= 8.1 Amps

Cable 2= 8.75 Amps

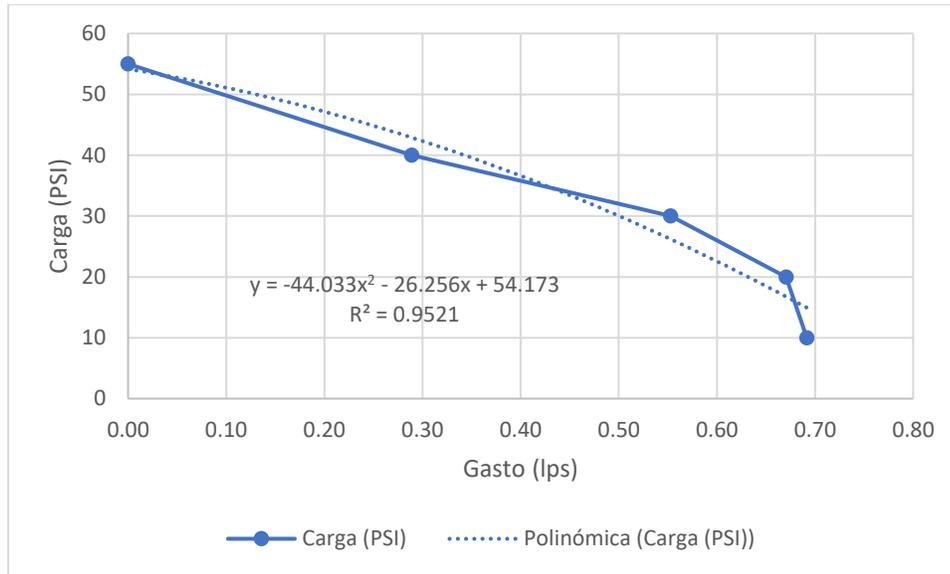
Bomba 2

Cable 1= 12 Amps

Cable 2= 13.37 Amps

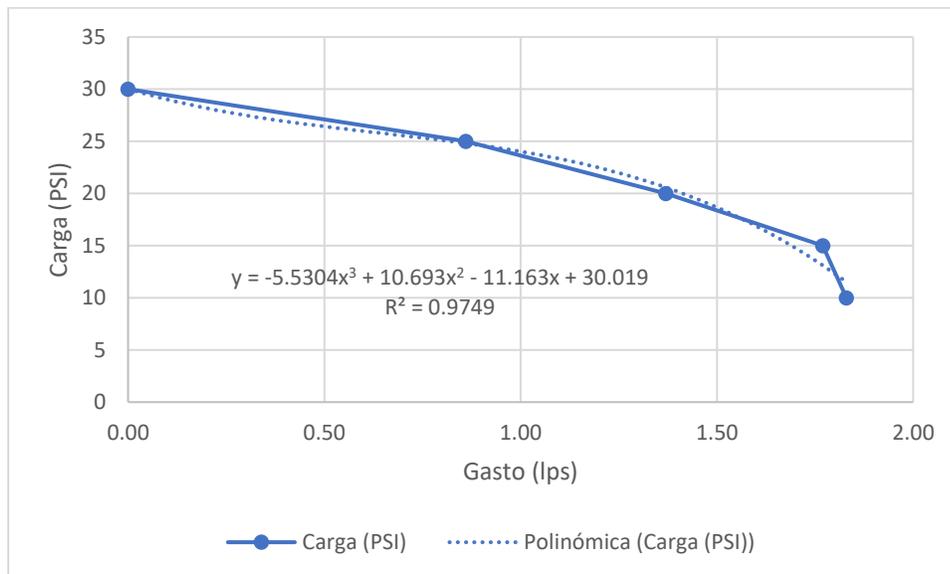
Las bombas al ser reacondicionadas no se tienen las curvas de operación de cada una de ellas, se obtuvieron las curvas con pruebas de laboratorio en el cual se probaron a diferentes presiones de operación:

Gráfica 5 Curva característica obtenida de la bomba número 1



Fuente: Autoría propia con software Microsoft Excel

Gráfica 6 Curva característica de la bomba número 2



Fuente: Autoría propia con software Microsoft Excel

### 7.5. Diseño del sistema hidráulico

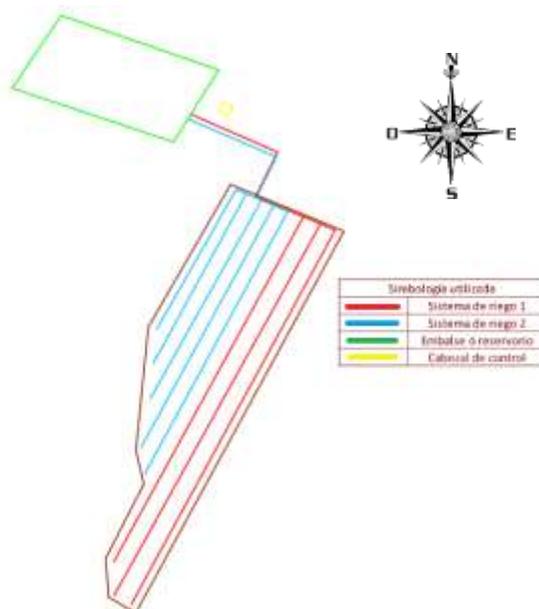
Se realizó la división del terreno en dos sectores con la misma longitud de surcos, 125.5 metros cada sector.

Imagen 14 Mapa del terreno dividido en dos unidades



Fuente: Google earth, 2022

Imagen 15 Mapa del diseño hidráulico del proyecto



Fuente: Autoría propia con software AutoCad

Tabla 6 Datos de los surcos del terreno

No. Surco	Longitud	No. Emisores	Caudal (lps)	Hf
1	20mts	100	0.0556	0.172
2	20mts	100	0.0556	0.170
3	25.5mts	128	0.0708	0.340
4	28.8mts	144	0.0800	0.481
5	31.2mts	156	0.0867	0.604
6	40.1mts	201	0.1114	1.236
7	42.7mts	214	0.1186	1.478
8	42.7mts	214	0.1186	1.478

Fuente: Autoría propia en software Microsoft Excel

Imagen 16 Succión del sistema



Fuente: Autoría propia

*Imagen 17 Conexión de línea principal de riego*



*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 18 Conexión y división de las unidades de riego*



*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 19 Conexión de línea secundaria y mangueras regantes de ambas unidades*



*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 20 Conexión de cintillas de ambas unidades*



*Fuente: Autoría propia*

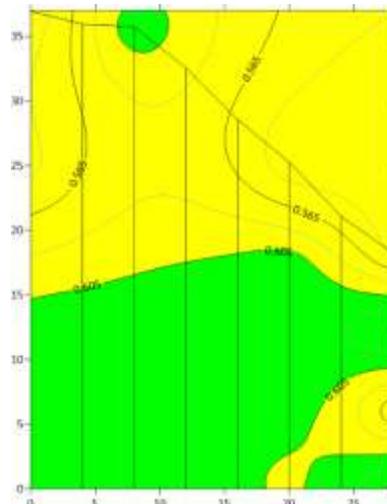
Imagen 21 Chequeo de presión de ambas unidades



Fuente: Autoría propia

### 7.5.1. Uniformidad de los emisores

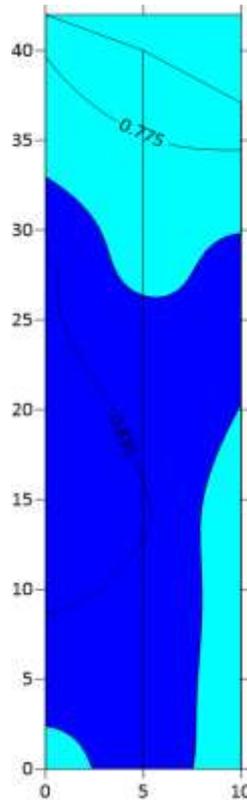
Imagen 22 Eficiencia de uniformidad de caudal de la unidad 1



Fuente: Autoría propia realizado en software Surfer

La unidad 1 presentó una eficiencia de uniformidad del 90 % con un caudal promedio de 0.6 LPH.

Imagen 23 Eficiencia de uniformidad de caudal de la unidad 2



Fuente: Autoría propia realizado en software Surfer

La subunidad 2 presentó una eficiencia de uniformidad del 95 % con un gasto promedio de emisores de 0.8 LPH.

### 7.6. Diseño del sistema eléctrico y arrancador

Se realizó el armado de tablero desde la toma de corriente principal hasta el sensor de humedad, el transformador de 300 KVA, el break de 100 Amps, el contacto de toma de corriente para el tablero que ya estaban conectados, en seguida se instalaron dos transformadores de 110 volts a 24 volts para los controladores hunter se conectaron junto con su modem para monitoreo de humedad, el break de 2 Amps para proteger el equipo, el contactor de 24 volts para pasar corriente a las bombas cada que los controladores mandaban señal por falta de humedad en el suelo.

*Imagen 24 Transformador del sistema eléctrico*



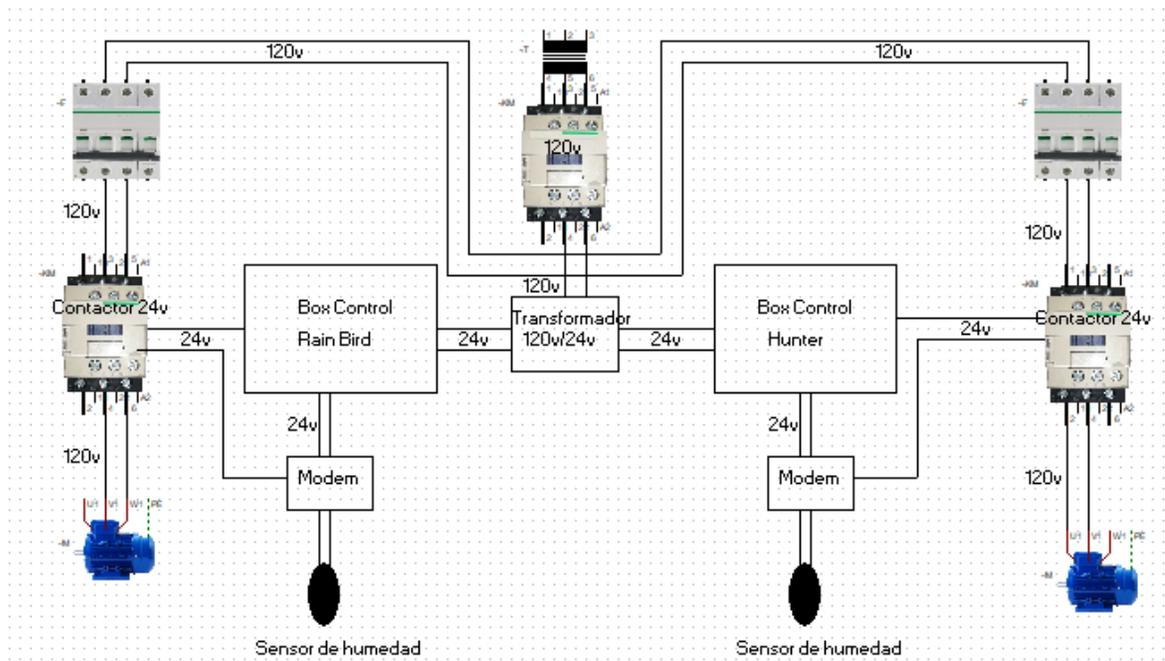
*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 25 Alimentación principal del sistema eléctrico*



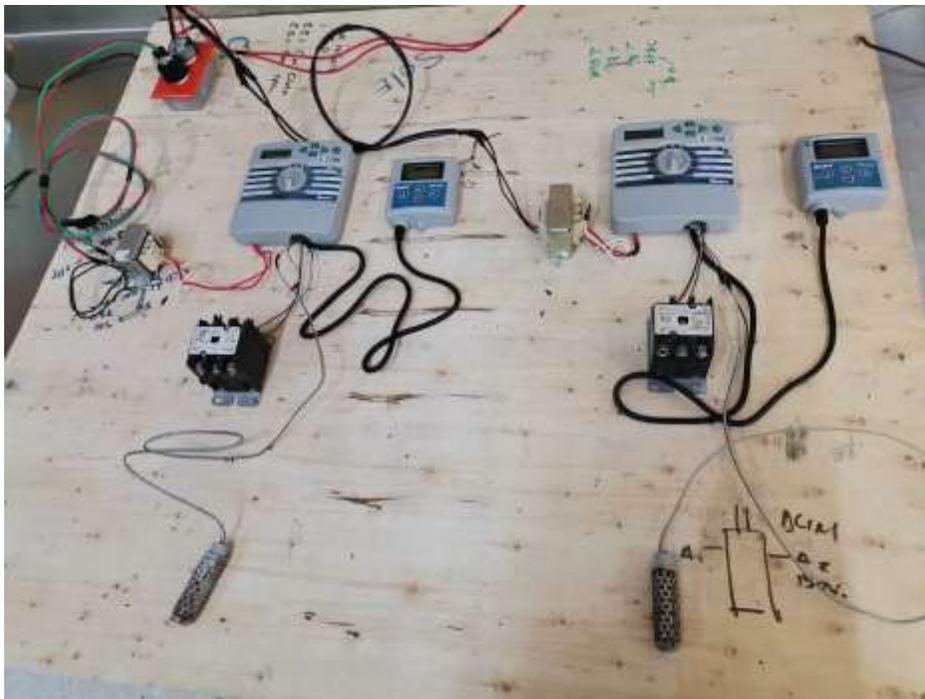
*Fuente: Autoría propia*

Imagen 26 Diagrama de armado del controlador en software CadeSimu



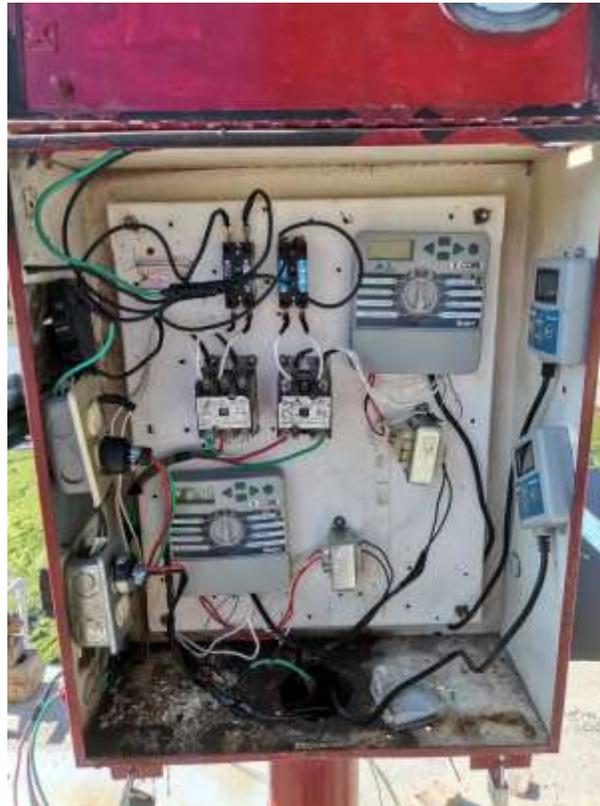
Fuente: Autoría propia con software CadeSimu

Imagen 27 Prueba de controladores en laboratorio



Fuente: Autoría propia

Imagen 28 Armado de arrancador y controlador de las unidades de riego



*Fuente: Autoría propia*

### **7.7. Instalación de sensores de humedad**

Para la instalación de los sensores de humedad se probaron y calibraron los modems junto los sensores con una muestra del mismo suelo del terreno para después ser instalados en campo, se tenían un sensor marca Hunter y otro sensor de la marca Rain Bird el cual tuvo fallos de no parar los riegos ya una vez iniciados por lo que se requirió el uso de otro sensor de la marca Hunter

Imagen 29 Modem de sensores de humedad Hunter y Rain Bird



Fuente: Autoría propia

Imagen 30 Calibración de sensores de humedad en laboratorio



Fuente: Autoría propia

*Imagen 31 Conexión de sensores de humedad al campo*



*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 32 Instalación de sensor de humedad*



*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 33 Tubo de PVC de ¾ de pulgada para instalar sensor*

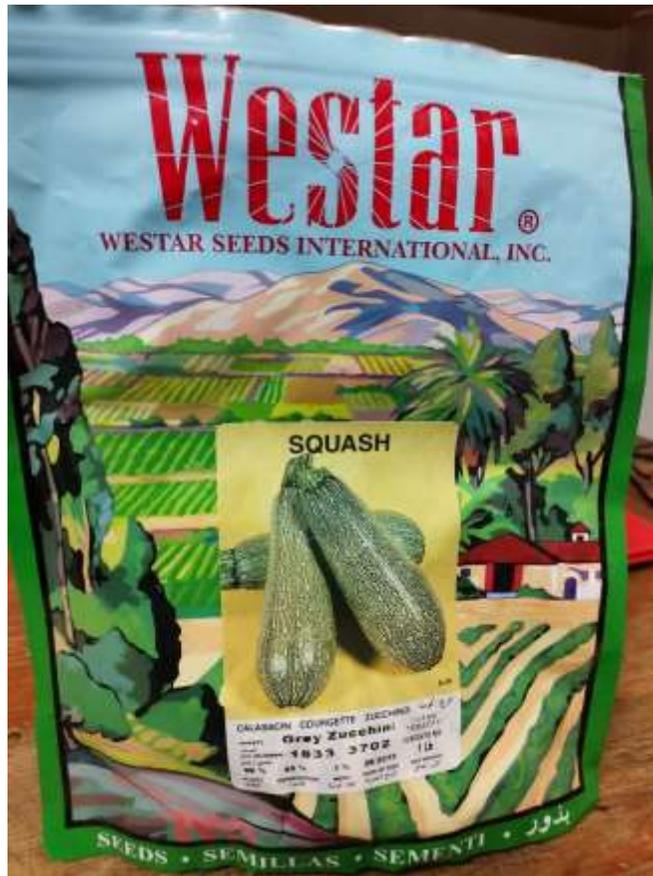


*Fuente: Autoría propia*

### **7.8.Siembra**

Se realizó la siembra de semilla de calabaza variedad Grey Zucchini de la marca Westar, siembra se hizo a una densidad de seis plantas por metro ya que el acolchado ya venía perforado para la siembra con doble surco a tres bolillos, se humedecieron las camas antes y después de la siembra, a los quince días teníamos brotes de aproximadamente cinco centímetros de altura.

Imagen 34 Semillas que se utilizaron para el experimento



Fuente: Autoría propia

Imagen 35 Instalación de acolchado agrícola



Fuente: Autoría propia

*Imagen 36 Siembra de semillas*



*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 37 Mantenimiento del cultivo (deshierbe)*



*Fuente: Autoría propia*

### **7.9. Monitoreo del sistema**

Ya con el sistema funcionando se fueron haciendo toma de datos de gasto con los medidores de flujo, horas de operación con el horómetro y porcentaje de humedad con los modem de los sensores de humedad, también se realizaron monitoreos de presión en las cintillas, fugas en el sistema, lavado de filtros.

*Imagen 38 Avance de crecimiento del cultivo*



*Fuente: Autoría propia*

*Imagen 39 Monitoreo de las plantas*



*Fuente: Autoría propia*

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. Curva de evapotranspiración

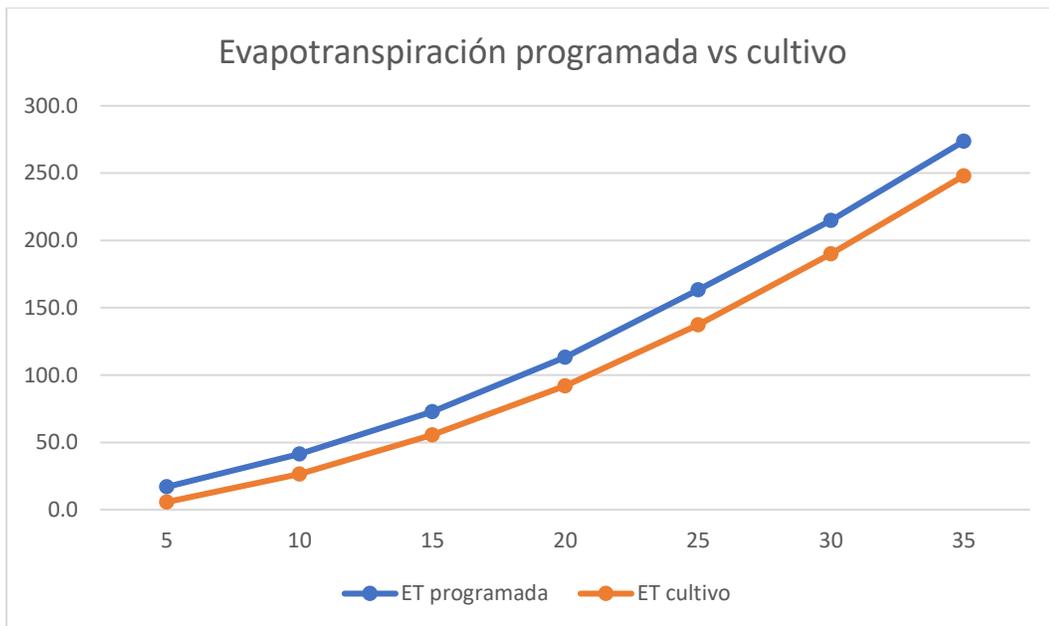
De acuerdo con los resultados obtenidos con las mediciones de campo se obtuvo el dato de la evapotranspiración real del cultivo mediante las reposiciones de lámina que se dieron con los sensores de humedad.

Tabla 7 Comparación de evapotranspiración programado vs cultivo

Día	ET programada	ET cultivo
5	17.0	5.7
10	41.4	26.5
15	72.7	55.5
20	113.3	91.9
25	163.3	137.3
30	214.8	190.1
35	273.7	248.0

Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

Gráfica 7 Curva de comparación de evapotranspiración programado vs cultivo



Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

La diferencia de riegos entra la evapotranspiración programada y la del cultivo dio una diferencia del 10%

## 8.2. Propiedades del suelo

### 8.2.1. Velocidad de infiltración

Con el apoyo de cilindros infiltrómetros se realizó la prueba de velocidad de infiltración y estos fueron los datos resultantes:

Tabla 8 Tabla de datos de velocidad de infiltración utilizando cilindros infiltrómetros

INTERVALO (MIN)	TIEM. ACOM. (MIN)	DIF. DE LECT. (CM)	LAM. ACUM. (CM)	VELOC. INFI (CM/H)
0	0	0	0	0
1	1	0.9	0.9	54
1	2	0.4	1.3	24
2	4	0.5	1.8	15
2	6	0.9	2.7	27
3	9	0.1	2.8	2
3	12	0.4	3.2	8
5	17	0.9	4.1	10.8
5	22	0.9	5	10.8
10	32	1.3	6.3	7.8
10	42	1.4	7.7	8.4
15	57	2	9.7	8
15	72	1.5	11.2	6
30	102	3.4	14.2	6.8
60	162	7	21.6	7

Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

Tabla 9 Tabla de velocidad de infiltración por el método de Kostiakov – Lewis

Z (t)	TIEM. ACOM. (MIN)	LAM. ACOM. (CM)	Lam acumulada (mm)	Ln (t- acumulada)	Ln (Z)	Infiltración (mm/h)
8	1	0.9	9	0	2.2	294.59
12.24	2	1.3	13	0.69	2.56	225.37
18.73	4	1.8	18	1.39	2.89	172.42
24.02	6	2.7	27	1.79	3.3	147.41
30.81	9	2.8	28	2.2	3.33	126.04
36.76	12	3.2	32	2.48	3.47	112.78
45.52	17	4.1	41	2.83	3.71	98.58
53.32	22	5	50	3.09	3.91	89.23
67.1	32	6.3	63	3.47	4.14	77.2

79.29	42	7.7	77	3.74	4.34	69.5
95.63	57	9.7	97	4.04	4.57	61.76
110.37	72	11.2	112	4.28	4.72	56.43
136.66	102	14.2	142	4.62	4.96	49.33
181.52	162	21.6	216	5.09	5.38	<b>41.25</b>

Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

### 8.2.2. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

Con una sonda TDR se realizaron dos mediciones por día cada doce horas durante 8 días con la finalidad de obtener capacidad de campo poco después de dejar el suelo en saturación y hasta el octavo día llegó al punto de marchitez permanente, cuando los intervalos de humedad baja insignificamente:

Tabla 10 Tabla de datos obtenido con el uso de sonda TDR para CC y PMP

Dato	Fecha	Hora	Tensiómetro de 30 cm (kpa)	Tensiómetro de 12 cm (kpa)	Contenido de humedad Sonda TDR varilla de 20 cm (cm <sup>3</sup> /100 cm <sup>3</sup> )
1	10/10/2022	10:00	0	0	40.5
2	10/10/2022	22:00	3	6	36.7
3	11/10/2022	10:00	12	9	34.3
4	11/10/2022	22:00	8	9	33.5
5	12/10/2022	10:00	8	11	33.3
6	12/10/2022	22:00	9	11	31.35
7	13/10/2022	10:00	10	14	30.8
8	13/10/2022	22:00	12	14	30.1
9	14/10/2022	10:00	10	14	29.1
10	14/10/2022	22:00	14	14	28.4
11	15/10/2022	10:00	14	15	26.7
12	15/10/2022	22:00	15	15	25.7
13	16/10/2022	10:00	14	15	25.6
14	16/10/2022	22:00	16	16	25.5
15	17/10/2022	10:00	17	18	25.35
16	17/10/2022	22:00	18	18	24.8
17	18/10/2022	10:00	18	16	24.025
18	18/10/2022	22:00	19	16	24
19	19/10/2022	10:00	19	17	22.95

Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

Imagen 40 Lectura de porcentaje de humedad de la sonda TDR



Fuente: Autoría propia

Imagen 41 Medición de CC y PMP con tensiómetros



Fuente: Autoría propia

### 8.3.Datos medidos del riego

A continuación, la tabla de datos con fecha de cada día que se tomaron datos del sistema, caudalímetro, horómetro, porcentaje del sensor hunter y porcentaje del tensiómetro, cada que se tomaba datos del sistema se hacía una inspección de todo el sistema para identificar fallas como fugas o taponamientos para realizar las gráficas de cada uno de los datos tomados:

Tabla 11 Tabla de datos obtenidos del monitoreo de ambas unidades de riego

	Unidad	14-dic	15-dic	19-dic	24-dic	26-dic	29-dic	01-ene	10-ene	17-ene
Caudalímetro acumulado(m3)	U1	0	0	0	4	6	8	10	12	22
	U2	0	0	2	5	12	1	11	18	15
Caudalímetro (m3)	U1	0	0	0	4	10	18	28	40	62
	U2	0	0	2	7	19	20	31	49	64
Horómetro acumulado tiempo de riego (horas)	U1	0	2	2	15	22	29	37	40	81
	U2	0	2	4	18	29	31	40	70	83
Horómetro tiempo de riego (horas)	U1	0	2	0	13	7	7	8	13	31
	U2	0	2	2	14	11	2	12	27	13
Hunter (%)	U1	100	90	85	70	85	90	85	100	95
	U2	100	90	90	90	90	90	90	100	95
Tensiómetro (%)	U1	100	85	62.5	60	80	70	90	95	100
	U2	100	90	55	50	90	70	90	95	100
Lamina acumulada (mm)	U1	0	0	0	43	65	86	108	130	238
	U2	0	0	22	86	130	140	151	216	248
Riego programado mecánico eléctrico	Lamina acumulada	3.8	7.7	23	41.6	54	72.6	99	189.5	278.5
	Horas acumuladas	1.3	2.6	7.8	14.0	18.2	24.5	33.4	63.9	94

Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

Antes de comenzar a probar el sistema a base de sensores se realizó un programa de riegos el cual es la lámina requerida de agua para el cultivo de calabaza con un sistema de riego mecánico eléctrico, esto para tener una referencia y poder compararlo con los datos que dieron los sensores.

### PROGRAMACIÓN DE RIEGOS

$224/0.82 = 273.65$  en 35 días

Lamina de riego promedio día = 7.81 mm

Primeros 8 días  $25.2/0.82 = 30.73/8 = 3.84\text{mm/}$

Segundos 8 día =  $65.88-25.2/.82 = 49.60/8 = 6.20$  mm/

Tercer 8 días =  $123.72- 65.88/0.82 = 70.53 /8 = 8.81\text{mm}$

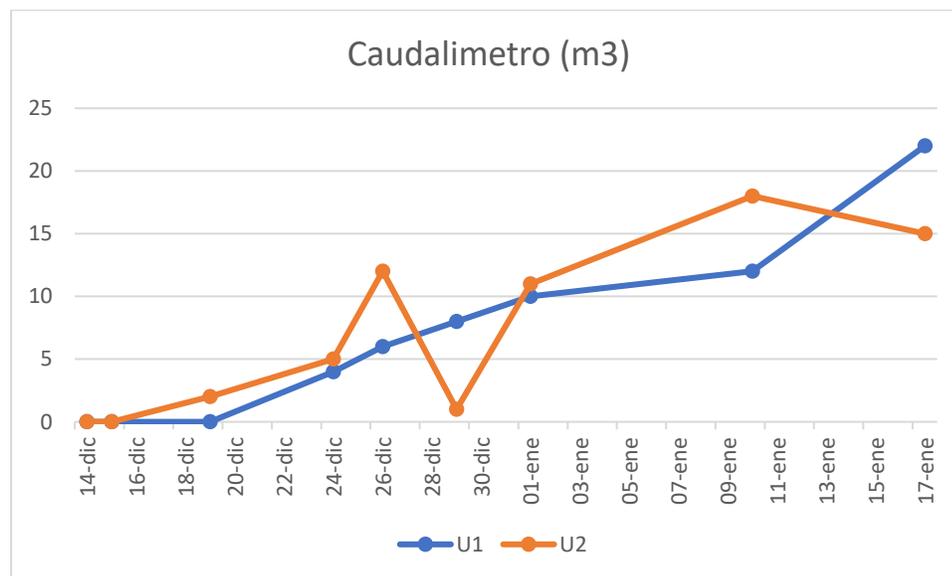
Ultimo grupo de 11 días más críticos  $224.4-123.72/0.82 = 122.78/11 = 11.161$  mm

Gasto promedio por gotero = 0.7 LPH

S1 = 628 goteros  $0.7 \times 628 = 439.6$  LPH/ riego = 0.443 M<sup>3</sup>/Hora

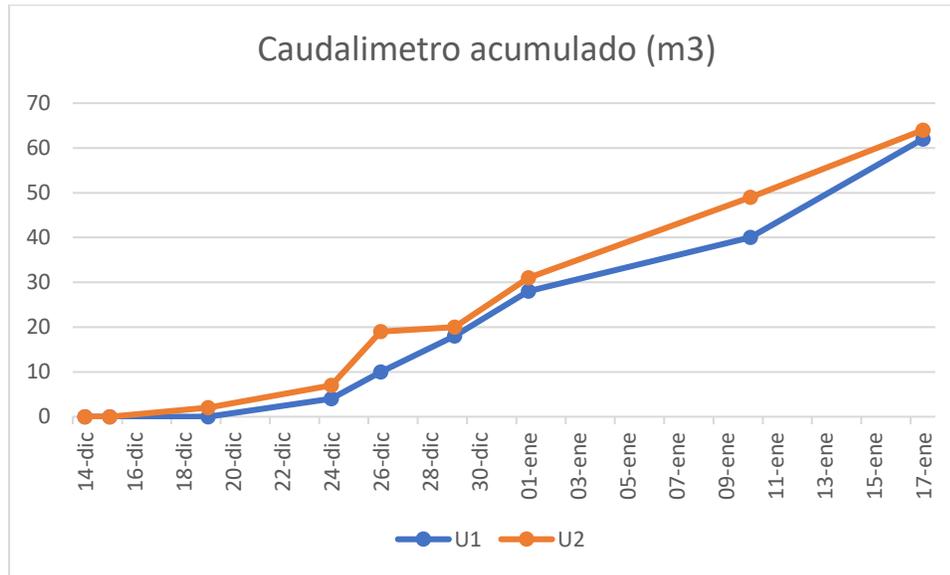
Se realizaron dos gráficas para el caudal del sistema, se tiene la comparación de las dos unidades que se midieron para comparar el caudal en metros cúbicos entre ambas unidades.

Gráfica 8 Curvas de datos obtenidos de los caudalímetros



Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

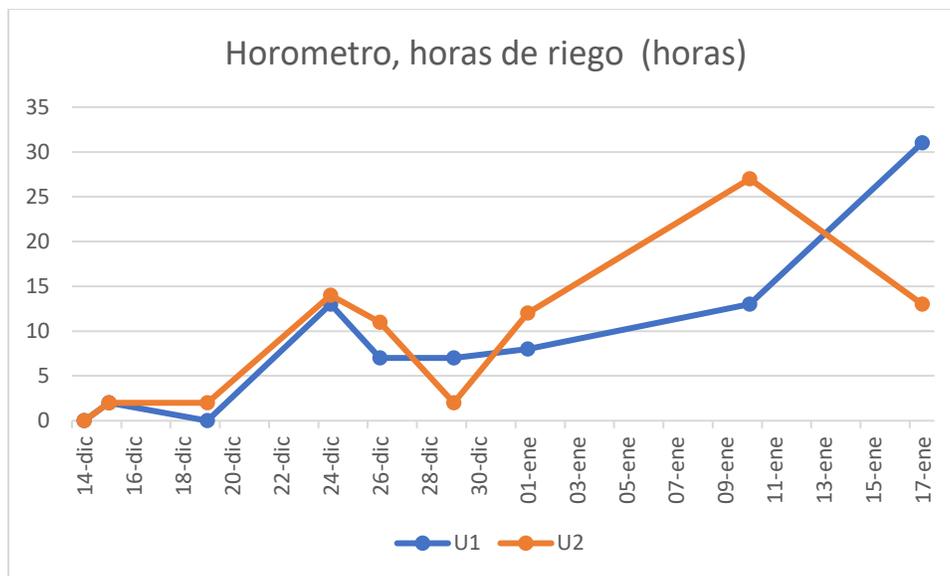
Gráfica 9 Curvas de comparación de datos de los caudalímetros acumulados



Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

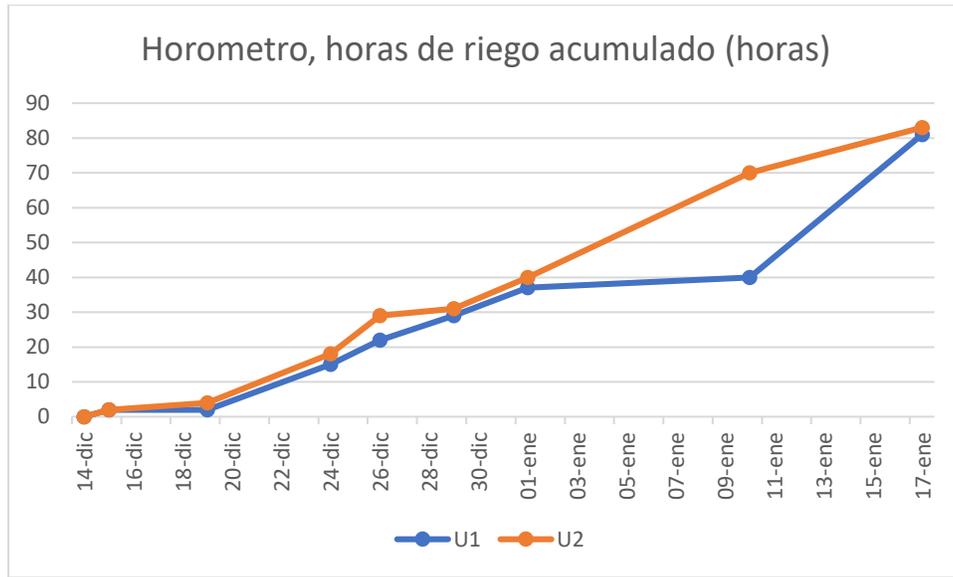
Las gráficas que dio el horómetro de cada unidad al igual fueron realizadas para comparar las diferencias de horas que trabajó cada una de las unidades y poder obtener el gasto por hora de cada unidad, las curvas de la gráfica de los horómetros a comparación del caudalímetro son parecidas, lo cual significa que ambas unidades trabajaron de igual forma.

Gráfica 10 Curva de datos obtenidos de las horas de riego



Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

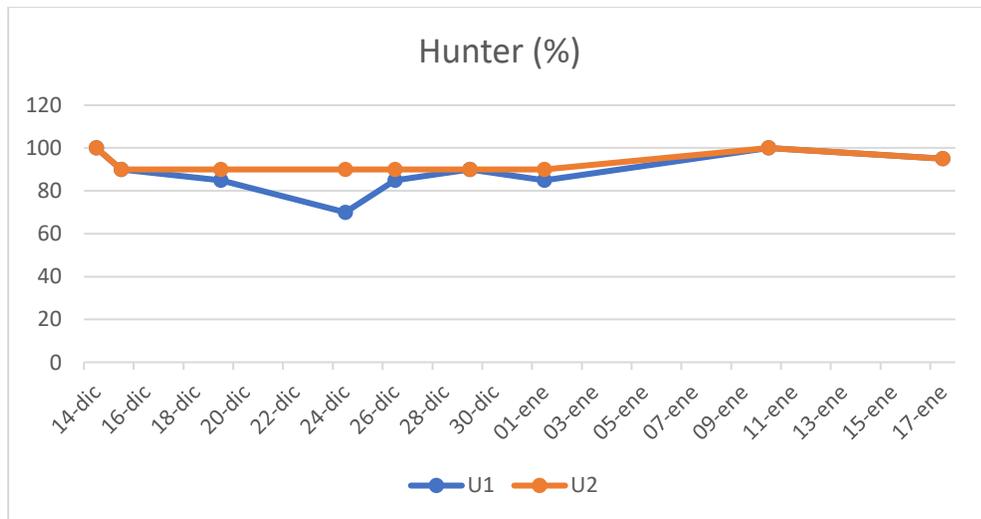
Gráfica 11 Curva de comparación de datos de las horas de riego acumulado



Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

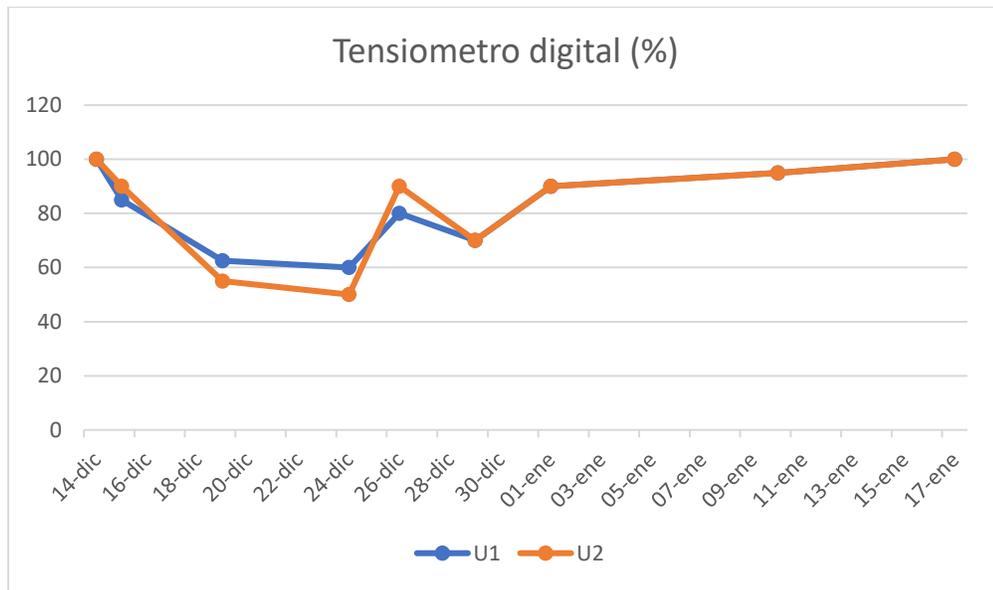
Las gráficas de los medidores de humedad tanto como los sensores hunter y los tensiómetros instalados en campo pocas veces tuvieron una humedad por debajo del 70% de la humedad a la que se calibraron, los sensores funcionaron bien, a diferencia de dos medidas por debajo del 70% fueron a causa de un fallo eléctrico que hubo en esa ocasión la cual no tuvo ningún problema ya que con el sensor se recuperó la humedad.

Gráfica 12 Curvas de datos obtenidos del monitoreo de los sensores de humedad



Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

Gráfica 13 Curvas de comparación de datos de los tensiómetros digitales en campo



Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

DPH

Capacidad de campo= 40.5 cm por metro

Punto de marchitez permanente= 22.95 cm por metro

Eficiencia de aplicación del terreno más acolchado= 82%

Profundidad de raíz= 30cm

$$HA = (CC - PMP)ZR$$

$$HA = (40.5 - 22.95)0.3m$$

$$HA = 5.265cm \rightarrow 52.65mm$$

Lámina acumulada promedio = 242.91mm

Lámina de riego = 242.91mm / 35 días = 6.94 mm

$$Lr = \frac{DPH}{Ea} = f * HA$$

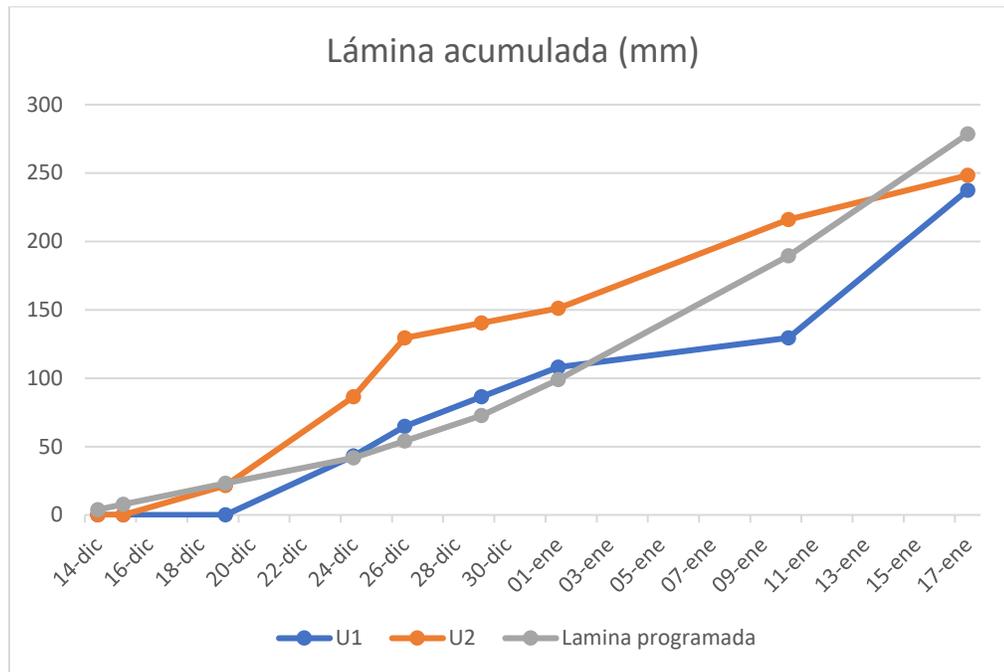
$$f = \frac{Lr}{HA}$$

$$f = \frac{6.94mm}{52.65mm} = 0.1318 \rightarrow 13.18\%$$

Como última grafica se realizó un cálculo de lámina acumulada de cada una de las unidades las cuales se compararon con la curva de lámina programada en base a un

sistema mecánico eléctrico la cual tuvo una diferencia del 13% lo cual quiere decir que ambas unidades con sensores de humedad y colcha ahorran hasta un 13% de agua a diferencia de riegos convencionales (mecánico eléctrico).

Gráfica 14 Curvas de comparación de lámina acumulada de unidad 1, 2 y lámina programada



Fuente: Autoría propia con Microsoft Excel

## 9. CONCLUSIONES

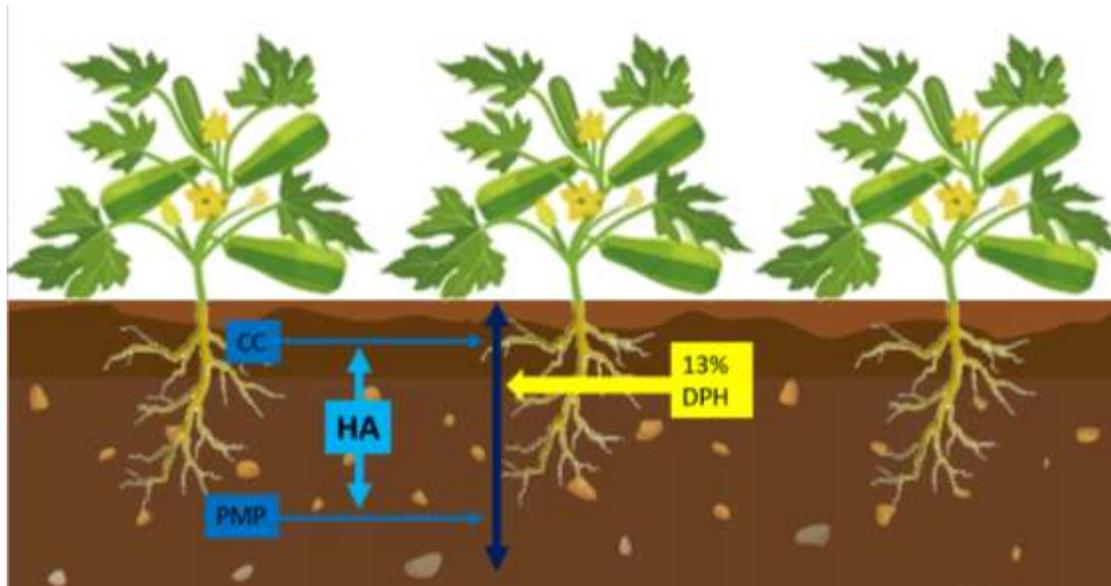
Con base en la hipótesis que presenté en este trabajo, podemos observar en las curvas entre un programa manual y uno automatizado en base a la humedad se presenta una relación o resultado final de acuerdo con el coeficiente de flexión de humedad del suelo franco limoso presentó una diferencia de un 13%.

La diferencia de la cantidad de agua aplicada y consumo de energía eléctrica, el sistema programado mecánico eléctrico y los resultados del proyecto fue de un 13% de ahorro de agua ( $9.5 m^3$ ) y de energía eléctrica (12 horas) con el uso de sensores de humedad.

Me queda como resultado de este trabajo que aún se requiere mayor calidad para uso rudo de este tipo de sensores ya que a lo largo de este trabajo batallé para su calibración, considero que es básico el usar este tipo de aparatos o equipos, sin embargo mientras más electrónico/eléctrico más delicado y complicado es para su operación llevando consigo que el operador de este tipo de sistemas de riego debe de tener un nivel alto en su

preparación técnica, es decir, a mayor sofisticación y a mayor tecnología más dependencia técnica ya que podría llegar a descalibrarse e inclusive no irrigar que comparado contra el manual puede irrigar o sobre irrigar pero nunca tendría deficiencia.

Imagen 42 Esquema de interpretación de DPH en el suelo



Fuente: Autoría propia

Lámina acumulada unidad 1= 238mm

Lámina acumulada unidad 2= 248mm

Promedio= 243mm

ETp= 273.65mm

La división entre la evapotranspiración estimada con la evapotranspiración repuesta dio como resultado una diferencia del 13%

## 10.RECOMENDACIÓN

Con base en la preparación que obtuve en esta institución sobre el uso eficiente del agua para riego y sistemas de abastecimiento de agua considero que el nivel que obtuve es satisfactorio para poder resolver la problemática en el campo de México sobre el diseño y construcción de sistemas de riego automatizados.

Mas sin embargo considero que en el mapa curricular se debe agregar y darle más valor a la materia de automatización y sobre todo una automatización real que esté basada en productos ofrecidos en campo industrial y no idealizar equipos que nunca se van a aplicar en el campo por ejemplo, la automatización a base de sensores de humedad de la línea Arduino, es a nivel localizado (macetas o viveros) y no de grandes extensiones de riego ya que se queman fácilmente por una diferencia de potencial eléctrico y sobre todo la extensa gama de productos automatizados inalámbricos a base de sensor (movimiento, iluminación, humedad, insolación, temperatura) debería estar en el mapa curricular de nuestro perfil.

## 11.LITERATURA CITADA

- *Automatización en sistemas de riego. (2021, 11 agosto). Mundoriego.*  
<https://mundoriego.es/automatizacion-de-sistemas-de-riego/>
- *Calvo, A. (2020, 12 febrero). Motores de riego Deutz: una buena alternativa para fincas sin electricidad. Agroptima.* <https://www.agroptima.com/es/blog/motores-riego-deutz-buena-alternativa/>
- *Castañón L, G. (2010). Automatización del riego. Agricultura revista agropecuaria.*  
[https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf\\_Agri/Agri\\_2004\\_860\\_202\\_205.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Agri/Agri_2004_860_202_205.pdf)
- *Cherlinka, V. (2022, 3 agosto). Sensores De Humedad Del Suelo: ¿Para Qué Sirven? EARTH OBSERVING SYSTEM.* <https://eos.com/es/blog/sensores-de-humedad-del-suelo/>
- *Cómo usar un Tensiometro. Distrito de Conservación de Recursos del Condado de Monterey.* <https://www.rcdmonterey.org/images/docs/publications/How-to-Use-Tensiometer-Spanish-Reader-final.pdf>
- *Contactores: ¿Qué son y para qué sirven? (2021, 13 octubre). NIVIHE S.A.*  
<https://motores-electricos.com.ar/contactores-que-son-y-para-que-sirven/>
- *Criado, V. L. A. (2013, 29 abril). Diseño de un sistema electrónico para riego de césped de jardín empleando un sensor de humedad de suelos y comunicación inalámbrica.* <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/4510>

- Cruz B, F., Zermeño G, A., Álvarez R, V., Cano R, P., Rivera G, M. & Siller G, M. (2017). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y ciencias del agua*. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000100045#:~:text=Modelo%20de%20Schwartzman%20y%20Zur%20\(1986\),Schwartzman%20y%20Zur&text=donde%20w%20y%20z%20son,m3%20s%20D1](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000100045#:~:text=Modelo%20de%20Schwartzman%20y%20Zur%20(1986),Schwartzman%20y%20Zur&text=donde%20w%20y%20z%20son,m3%20s%20D1)).
- *El agua en la agricultura*. (s. f.). World Bank. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>
- *Evapotranspiración*. (s. f.). [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/Evapotranspiraci%C3%B3n\\_tcm30-82951.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/Evapotranspiraci%C3%B3n_tcm30-82951.pdf)
- Formación para la Industria 4.0. (2018, 5 marzo). *Arrancadores electrónicos*. - *Formación para la Industria 4.0*. <https://automatismoidustrial.com/curso-carnet-instalador-baja-tension/d-automatizacion/1-7-arrancadores-electronicos-y-variadores-de-velocidad/arrancadores-electronicos/>
- Garduño, B. (2022, 5 septiembre). *Controladores de riego*. *Acrocarpus*. <https://acrocarpus.com/controladores-de-riego/>
- *Histórico del Clima en Saltillo - Meteored*. (s. f.). Meteored.mx | Meteored. <https://www.meteored.mx/saltillo/historico>
- INEGI. (2019). [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2019/doc/rrdp\\_ena2019.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2019/doc/rrdp_ena2019.pdf)
- Innk. (s. f.). *ELECVA, Arrancadores para controlar y regular la tensión en motores eléctricos*. <https://electricavarietades.com/material-electrico/productos-material-electrico-distribucion-energia-arrancadores.php#:~:text=Los%20arrancadores%20son%20equipos%20el%C3%A9ctricos,contactores%20y%20protecci%C3%B3n%20contra%20sobrecargas>.

- *Innovatione AgroFood Design*. (2021, 6 febrero). *Sistemas de riego: características y tipos*. *Innovatione*. <https://innovatione.eu/2019/07/08/riego-agricultura/>
- López J. Riego por aspersión.  
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/12308/U%200219.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- María, F. G. J. (2009, 24 septiembre). *Riego por superficie*. DIGITAL.CSIC.  
<http://hdl.handle.net/10261/17141>
- Martín, Edward C.; Munoz, Carolina. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo?. College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ).  
[https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/625275/az1220s-2017\\_0.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/625275/az1220s-2017_0.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Muñoz C. R. *Field Devices For Monitoring Soil Water Content*. (s. f.).  
<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/ae266>
- *Novagric*. (2016, 7 septiembre). *Beneficios de las Cubiertas Plásticas en Acolchado*. <https://www.novagric.com/es/blog/articulos/beneficios-cubiertas-plasticas-acolchado>
- *Relevadores: Qué Son, Funcionamiento, Tipos Y Aplicaciones*. (2022, 7 septiembre). *SDI*. <https://sdindustrial.com.mx/blog/relevadores/>
- Sánchez S, F. J. (2022). *Evapotranspiración*. *Hidrología*.  
<https://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>
- *Sensor de humedad – Tipos y principio de funcionamiento*. (2020, 26 marzo). *Electronica Lugo*. <https://electronicalugo.com/sensor-de-humedad-tipos-y-principio-de-funcionamiento/>

- Sevilla. (2010). *RIEGO POR SUPERFICIE*.  
[https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160940Riego\\_por\\_superficie\\_baja.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160940Riego_por_superficie_baja.pdf)
- *Sistemas de riego por aspersión: Todo lo que debe saber*. (2022, 24 marzo).  
<https://www.agropinos.com/blog/sistema-de-riego-por-aspersion>
- *Unidad de Hidrología Depto. de Suelos y Aguas Facultad de Agronomía - PDF Free Download*. (s. f.). <https://docplayer.es/10103474-Unidad-de-hidrologia-depto-de-suelos-y-aguas-facultad-de-agronomia.html>
- *Zotarelli L., Dukes M. D., Morgan K. T.: Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de Humedad*. (s. f.).  
<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE496>