



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos

Facultad de Ingeniería Civil

**“DISEÑO DE SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO PARA EL
MÓDULO 1 DEL DISTRITO DE RIEGO 020 (MORELIA-
QUERÉNDARO)”**

Tesis

**Que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de los Recursos
Hídricos**

Presenta:

Ing. Tariácuri Márquez Álvarez

Asesor:

Dr. Constantino Domínguez Sánchez

Co-Asesor

Dr. Joel Hernández Bedolla

Morelia Michoacán, noviembre de 2025

Índice

1	Introducción.....	4
2	Antecedentes	5
3	Objetivo General	7
3.1	Objetivos Particulares	7
3.2	Hipótesis	7
3.3	Marco Teórico.....	7
3.3.1	El agua en la agricultura de México.	7
3.3.2	Evapotranspiración (ETo).....	8
3.3.3	Métodos para el cálculo de la evapotranspiración (ETo)	10
3.3.4	Propiedades físicas del suelo	11
3.3.5	Niveles de humedad del suelo	11
3.3.6	Justificación	13
4	Zona de Estudio	16
4.1	Características Generales del Distrito de Riego 020 Morelia Queréndaro	16
4.2	Clima.....	17
4.3	Suelos.....	17
4.4	Vegetación	18
4.5	Principales fuentes de almacenamiento	18
4.6	Asociaciones Civiles de Usuarios.....	20
4.7	Inventariado de los canales de cada uno de los módulos del DR	22
4.8	Suministro de demanda del módulo I	25
4.9	Eficiencia del módulo I.....	26
4.10	Cultivos existentes en el módulo I.....	28
4.11	Suelo	31
5	Metodología.....	32
5.1	Análisis y selección del método de ETo de mejor ajuste.....	33
5.1.1	Método de FAO Penman-Monteith	33
5.1.2	Métodos comparativos de evapotranspiración	33
5.2	Cálculo de la evapotranspiración de cultivo (ETo).....	39

5.2.1	Determinación de los coeficientes de cultivo (K_c)	39
5.3	Descripción del Funcionamiento del software utilizado (CropWat)	41
5.3.1	Precipitación Efectiva.....	45
5.4	Descripción del software EPANET	48
5.4.1	Componentes de EPANET	49
5.5	Construcción del modelo de simulación del funcionamiento hidráulico	51
6	Resultados	54
6.1	Caracterización de la zona de estudio.....	55
6.2	Resultados comparativos de la FAO Penman-Monteith con respecto a métodos alternativos.....	58
6.3	Obtención de la evapotranspiración de cultivo	63
6.4	Resultados de los requerimientos de riego.....	68
6.5	Análisis de plan de riego y selección del tipo de sistema de riego	75
6.6	Propuesta de trazo de red de distribución	75
6.6.1	Diseño de la red.....	75
6.6.2	Propuestas de ubicación de hidrantes	78
7	Presupuesto Básico de la Red.....	80
7.1	Costos de diseño y materiales	80
7.1.1	Presupuesto General para Excavación, Instalación de Tubería e Hidrantes...	80
8	Conclusiones y recomendaciones	82
9	Referencias.....	84

Abstract

Currently, it is very important to have efficient irrigation systems that allow excellent water control while meeting the water requirements of the crops within the irrigation area, in order to avoid generating either an excess or a deficit of water supply to the crops. To consider an adequate design, several factors must be evaluated, such as the irrigated area, the type of crops present, and whether there are water bodies with sufficient volumes to extract as much water as needed. The latter, however, is impossible; we know that, due to climate change, these water bodies have decreased in size, while irrigated areas have expanded, thus increasing water demand.

Nowadays, there are various methods to calculate evapotranspiration, which is a very important factor in determining the irrigation volume that must be supplied. These methods generally estimate values on a monthly scale, but the question arises: *Are those values truly uniform throughout the month, even though climatic variables do change?* For this reason, efforts have been made to standardize a single method capable of determining evapotranspiration based on very specific climatic variables. However, weather stations with all required variables are not always available. Nonetheless, there are methods that, with only some of these variables, can help estimate evapotranspiration.

This document presents research aimed at identifying a method suitable for the climatic conditions of the city of Morelia, applied to Module 1 of the Irrigation District 020 Morelia–Queréndaro, and capable of providing daily estimates that account for regional climatic variations.

Keywords: Evapotranspiration, crops, irrigation system, distribution network, irrigation volume

Resumen

Actualmente es muy importante contar con sistemas de riego eficientes que ayuden a tener un excelente control de agua que a la vez cumpla con las necesidades hídricas de los cultivos que existan en el área de riego esto para no provocar un excedente o déficit hídrico a los cultivos. Pero para considerar un buen diseño hay factores que debemos revisar, desde la superficie de riego, que tipo de cultivos existen y si existen cuerpos de agua con cantidades exorbitantes que nos permitan extraer toda el agua que deseemos, esto último es imposible, sabemos que con el cambio climático estos cuerpos de agua se han reducido y en contra parte las superficies de riego han crecido y por lo tanto demanda más agua. Hoy en día existen diversos métodos para calcular la evapotranspiración, que es un factor muy importante para conocer la cantidad de volumen de riego que hay que administrar; estos métodos calculan a escalas mensuales, pero ¿realmente los valores que nos arroja son uniformes y no cambian durante todo el mes, aunque las variables climáticas si lo hacen? Es por eso que se ha querido estandarizar un solo método que determine evapotranspiración dependiendo de las variables climáticas muy específicas, pero aun así no siempre se cuentan con estaciones climatológicas que tengan todas estas variables disponibles, pero si existen métodos que con algunas de ellas nos pueden ayudar a estimar la evapotranspiración. En este escrito se realiza la investigación de encontrar un método que se adapte a las condiciones climáticas de la Ciudad de Morelia aplicado al Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro y que a la vez tenga un alcance diario que considere estas variaciones en la región.

Palabras Clave: Evapotranspiración, cultivos, sistema de riego, red de distribución, volumen de riego

1 Introducción

En México existe en la actualidad 88 Distritos de Riego (DR), estos cuerpos fueron creados por la Comisión Nacional de Irrigación; hoy la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 1926 con la finalidad de tener sectores encargados en la agricultura y suministrar estos cuerpos de agua y diseños de vasos de almacenamiento, presas, pozos y caminos. Estos distritos de riego están organizados en módulos y ejidos. Dichos módulos pertenecen a ejidatarios y pequeños concesionarios. En la actualidad cada distrito de riego consta con áreas específicas y planes de riego, pero como bien se ha observado muchas veces estas zonas sufren cambios de usos de suelo o aumentan su superficie de riego generando así una mayor demanda de agua, muchas veces los métodos de riego con los que cuentan actualmente ya no satisfacen la necesidad hídrica o por no tener un conocimiento tecnificado muchas veces exceden el volumen de agua que realmente necesita el cultivo provocando un desperdicio del recurso hídrico todo esto porque el método ya es muy viejo y la infraestructura está demasiado gastada que en lugar de ayudar perjudica la zona de una u otra manera.

2 Antecedentes

Un Distrito de Riego (DR) se define como una zona geográfica localizada que cuenta con distintos conjuntos de canales para riego, fuentes de abastecimiento de agua como pozos, lagunas, lagos, presas y las áreas de cultivo. Los usuarios de los DR cuentan concesiones para el aprovechamiento de la infraestructura, además los usuarios crean asociaciones civiles para el correcto aprovechamiento de los recursos hídricos.

Los Distritos de Riego son proyectos de irrigación generados por el gobierno federal creados por la extinta Comisión Nacional de Irrigación creada en 1926, estos son operados por ejidatarios y pequeños concesionarios. Existen diferentes características que deben de cumplir los DR para que estos puedan hacer su función como uno véase Tabla 1 (Gonzáles Edmundo & Hinojosa Gustavo, 2013). En la actualidad Michoacán cuenta con 8 DR los cuales son: 020 Morelia-Queréndaro, 020 Ciénega de Chapala, 045 Tuxpan, 061 Zamora, 087 Rosario-Mesquite, 097 Lázaro Cárdenas, 098 José María Morelos, 099 Quitapan-La Magdalena.

Tabla 1. - Características de los distritos de riego en México

Característica	Distrito de Riego	Unidad de Riego
Superficie (ha)	Mayor a 2,000	Menor a 500
Propiedad infraestructura	Federal	Particular y/o ejidal
Propiedad de la tierra	Particular y/o ejidal	Particular y/o ejidal
Cantidad	88	39,000, aproximadamente
Organización usuarios	Asociación civil de usuarios	Sociedades no formales, organizadas para la concesión
Título de concesión	Agua, infraestructura y maquinaria	Agua
Supervisión de la operación	Permanente por CONAGUA	Eventual
Planificación del riego	Plan de Riego autorizado por la Conagua	Indefinido
Entorno económico	Influencia regional, estatal	Influencia local
Cuotas de riego	Se enteran parcialmente a la SHCP, y para uso de la ACU	Son de uso particular
Régimen legal asociación	Código civil del estado	Usos y costumbres

Los DR están subdivididos en distintas áreas, conocidas como “módulos de riego” esto para tener una mejor entrega parcial o total de agua para las áreas a regar (Palerm Viqueira, 2020).

Por otro lado debido a las inmensas extensiones de algunos distritos de riego estos son administrados de manera general por los Organismos de Cuenca (OC) en sus respectivas Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) y ejecutados y mantenidos por mismos usuarios de la región que pueden ser por asociaciones ejidales o asociaciones sin fines de lucro, esto se establece en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) en su sección cuarta “*Distritos de Riego*” artículo 65 (Cámara de Diputados, 2023)

Así mismo de acuerdo a la LAN cada distrito de riego debe de contar con un personal técnico hidráulico que en conjunto con estas sociedades puedan ejercer una operación adecuada en apoyo con la elaboración de un reglamento que los distritos deberán acatar sus puntos a ejercer de manera eficaz gracias a los conocimientos técnicos que este proporcionará; como lo especifica en su artículo 66 (Cámara de Diputados, 2023).

De acuerdo a la información recabada en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro existió un departamento denominado “Riego y Drenaje” el cual desapareció en el 2014 pero no existe información documentada del porque ya no ejerce, consecuencia de esto la operación de la demanda de agua paso a ser controlada a las distintas asociaciones civiles que existen en los distintos módulos del DR por lo que pasaría a ser un incumplimiento al artículo mencionado anteriormente.

En los DR la distribución del agua depende de la extensión de área de irrigación y del tipo de cultivo que se especifique en la zona. Para que esta distribución y dote de agua se expedido es necesario que todos los DR cuenten con un plan de riego (Palerm Viqueira, 2020). Para poder continuar con el desarrollo de un plan de riego es necesario conocer directamente las necesidades hídricas de los cultivos existentes, ya que cada cultivo necesita diferentes requerimientos de agua. Actualmente existen métodos empíricos que nos ayudan a conocer estas necesidades hídricas, métodos para la estimación de evapotranspiración. En el presente documento se analizan diferentes métodos que tengan una mejor adaptabilidad de acuerdo a las condiciones climáticas y a las variables existentes en las estaciones climáticas.

3 Objetivo General

Diseñar un sistema de riego presurizado que permitirá satisfacer las necesidades hídricas de los diferentes cultivos en la zona de estudio a escala diaria, lo que en subsecuencia permite tener un control total del recurso hídrico disponible.

3.1 Objetivos Particulares

- ~ Caracterización de la zona de estudio (módulo piloto)
- ~ Estimación los usos consuntivos (evapotranspiración) con los métodos de mejor ajuste de acuerdo a las variables climáticas
- ~ Obtener el volumen neto necesario para los cultivos existentes en la zona de estudio
- ~ Diseño óptimo del sistema presurizado (red de conducción, tuberías, hidrantes).

3.2 Hipótesis

El nuevo sistema de riego presurizado, basado en la evapotranspiración a escala diaria, mejorará significativamente el rendimiento y la eficiencia del uso del agua en los cultivos de la zona de estudio en comparación con los sistemas de riego convencionales.

3.3 Marco Teórico

3.3.1 El agua en la agricultura de México.

La agricultura en el campo mexicano a pesar de tener una de las más altas demandas es un sector totalmente rezagado. El papel del agua es el más importante ya que sin ella no existirían cosechas en ningún momento, se sabe que el aumento de la escasez del agua en la agricultura reducirá la producción de cosechas en el futuro (W. Liu et al., 2019), para esto se han desarrollado dos conceptos que ayudan a conocer mejor los índices de disponibilidad del agua: el agua azul (definida como el uso consuntivo de ríos y acuíferos) y el agua verde (el agua almacenada en los cultivos y la humedad en el suelo) (J. Liu et al., 2017; Pedrozo Acuña, 2022).

De acuerdo a Pedro Acuña (2022), el cambio climático aumentará la evapotranspiración de los cultivos, así mismo en combinación con la reducción de la precipitación provocarán una reducción del recurso hídrico. Para eso es importante empezar a llevar una gestión del agua y sus disponibilidades para garantizar una producción agrícola (Hoekstra, 2014). Entonces de acuerdo a estas aseveraciones es de vital importancia la implementación de sistemas de distribución y riego que permitan que exista un control total del agua que ayude en la demanda actual para que exista un mejor manejo a futuro del recurso hídrico.

3.3.2 Evapotranspiración (ETo)

Antes que nada, se tiene que definir el concepto de “evapotranspiración” ya que es una acción de dos procesos que ocurren simultáneamente en la naturaleza. Como primer parte tenemos a la **Evaporación**, la cual es el proceso en que el agua líquida se transforma en vapor y es llevada a la atmósfera. Para que este proceso pueda ocurrir es necesario una intervención de energía, como la radiación y la temperatura del ambiente. Para que el vapor que surge se pueda retirar debe de existir una diferencia entre la presión de la superficie y la presión de vapor de la atmósfera (Allen R. et al., 2006).

La **Traspiración** es el proceso por el cual el agua líquida existente en las plantas se evapora. Este proceso se lleva dentro de los estomas (pequeñas aberturas de la hoja de la planta). Este proceso también hay un aporte de energía por un gradiente de presión de vapor y la velocidad del viento. Señalando que existen diferentes tasas de traspiración ya que este proceso depende particularmente de cada cultivo. Debido a que la evapotranspiración (Et) es un proceso combinado de estos dos últimos conceptos, no existe una forma sencilla de diferenciarlos (Allen R. et al., 2006). Conocer los dos procesos que conforman la Et dependen también no solo de transferencia de energía, sino que también de diferentes factores que afectan directamente este proceso.

- ~ Factores climáticos. – múltiples métodos empíricos para determinar la Et se basan en datos climáticos como son: radiación, temperatura del aire, velocidad del viento y la humedad relativa.

- ~ Factores de cultivo. – el tipo de cultivo, la variedad, y las diferentes etapas de desarrollo se deben de considerar para los valores de Et. La altura del cultivo, la transpiración, sus características radiculares son factores que modificaran la Et, aunque estén bajo las misas condiciones climáticas.
- ~ Condiciones ambientales. – la cantidad de humedad en el suelo, el tipo de estructura del suelo (franco, arenoso, arcilloso).

Actualmente la *Food and Agriculture Organization on the United Nations (FAO)* por sus siglas en ingles ha estandarizado los criterios de cálculo de la evapotranspiración, siendo así que la Et depende de tres conceptos.

- ~ Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). - es la evapotranspiración de referencia sobre un cultivo en una superficie con las condiciones hídricas idóneas (Allen R. et al., 2006). Actualmente se tiene una tabla de referencia para la estimación de ET_o en diferentes condiciones agroclimáticas, véase Tabla 2.
- ~ Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c). – se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo bajo condiciones óptimas que alcanzan su máxima reproducción en las condiciones climáticas reinantes (Allen R. et al., 2006).
- ~ Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{c_{aj}}). – esta se refiera a los cultivos que no contienen condiciones óptimas para su desarrollo completo. Con factores como alta salinidad en el agua, exceso o limitación de la misma, plaga y enfermedades

Tabla 2.- ETO promedio para distintas regiones según FAO

Regiones	Temperatura promedio durante el día °C		
	Templada 10 °C	Moderada 20 °C	Caliente > 30 °C
Tropicos y Subtropicos			
húmedos y subhúmedos	2 -- 3	3 -- 5	5 -- 7
áridos y semiaridos	2 -- 4	4 -- 6	6 -- 8
Regiones Templadas			
húmedos y subhúmedos	1 -- 2	2 -- 4	4 -- 7
áridos y semiaridos	1 -- 3	4 -- 7	6 -- 9

3.3.3 Métodos para el cálculo de la evapotranspiración (ET_o)

Actualmente existen múltiples métodos para el cálculo de la evapotranspiración desde métodos que necesitan solamente datos de temperatura media mensual como es el caso de Thornthwaite o ubicaciones geográficas y valores de radiación como es Hargraves-Samani (Hargreaves et al., 1985; Thornthwaite, 1948). Muchos métodos, comúnmente son método desarrollados empíricamente para zonas y condiciones climáticas específicas. Debido esto se genera una incertidumbre muy grande al momento del cálculo de la evapotranspiración, es decir, muchos métodos pueden o no tener las mismas variables climáticas, por otro lado, también se les considera un coeficiente de ajuste que depende del criterio del creador. Para todos estos métodos de acuerdo a sus variables han sido clasificados en tres principales grupos:

- ~ **Métodos basados en temperatura.** – estos métodos su principal variable es la temperatura media del aire y la tasa de evaporación de la zona de estudio. El método más común en este grupo es el método de Thornthwaite que necesita la latitud de su ubicación para determinar un índice de evaporación. (Abtew, 2005a; Abtew2, 1996a; Thornthwaite, 1948). Los métodos basados en temperatura son los más utilizados para estimar la ET_o debido a su simplicidad y los requerimientos que necesitan para ser desarrollados, estos métodos fueron desarrollados después de comparar la relación entre la precipitación, temperatura y cambio hídrico (Jensen et al., 1990; Thornthwaite, 1948; Xiang et al., 2020).
- ~ **Métodos basados en transferencia de masa.** – estos métodos consideran el movimiento físico del agua líquida a la atmosfera debido a los procesos de evaporación y transpiración. (Droogers & Allen, 2002; Jensen et al., 1990; Robertson W. & Baier W., 1965; Xu & Singh, 2001; Albrecht, 1950; Celestin et al., 2020; Dalton, 1802; Meyer, 1926; Tabari & Talaei, 2011; Xiang et al., 2020).
- ~ **Métodos basados en radiación solar.** – estos métodos utilizan la radiación solar como sus principales variables en la temperatura máxima y mínima, así como la radiación solar. (Djaman et al., 2017; Dorji et al., 2016; Gafurov et al., 2018; Irmak

et al., 2003; Rohwer & Rohwer, 1931; Trajkovic, 2007; WMO, 1966; Xiang et al., 2020)

3.3.4 Propiedades físicas del suelo

Las partículas minerales del suelo pueden clasificarse de acuerdo a su tamaño. La proporción en que las partículas de arena, limo y arcilla se encuentran en el suelo definen la textura del mismo, véase Figura 1(Carrazón Alocén Julián, 2007).

En función de su textura los suelos se dividen en:

- ~ Arenosos. – Estos suelos presentan buena permeabilidad, drenaje y aireación.
- ~ Arcillosos. – En estos suelos predomina la arcilla, son suelos de textura fina, presentan poco drenaje y una baja permeabilidad.
- ~ Limosos. – En estos suelos predominan los limos son de textura suave, tienen buena retención de agua y de moderado drenaje.
- ~ Francos. - Contienen una mezcla equilibrada de los tres anteriores con textura intermedia, buena aireación, drenaje, adecuada retención de la humedad. (Carrazón Alocén Julián, 2007).

3.3.5 Niveles de humedad del suelo

Los suelos contienen ciertas diferencias de cantidades de agua que dependen de la estructura del suelo, en este orden de ideas existen niveles que en su definición son los siguientes: capacidad del campo (CC) es la humedad del suelo que permanece después de haber ocurrido el drenaje natural del campo; punto de marchitamiento (PM) es la cantidad de humedad el suelo que no puede absorber el cultivo; agua disponible (AD) es la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento, normalmente puede o no expresarse en porcentaje de volumen (Ma & González, 2012; Zotarelli et al., 2013).

Entonces para poder determinar el agua disponible estará expresado en milímetros (mm) se toma en cuenta el CC y PM y como estos dos dependen totalmente de la textura del suelo. (Carrazón Alocén Julián, 2007).

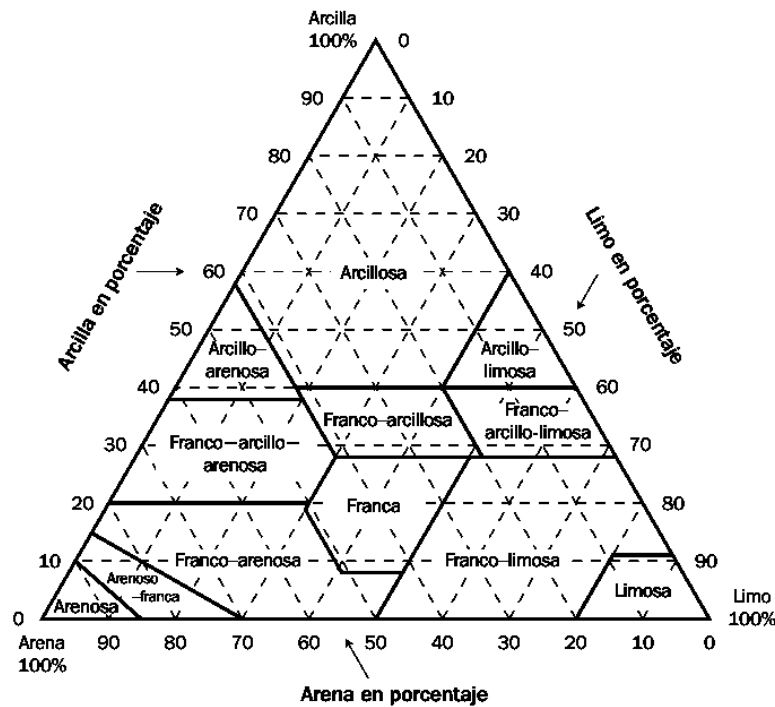


Figura 1.- Triángulo de texturas

El triángulo de texturas (Waller & Yitayew, 2016) nos ayuda a determinar físicamente la composición del suelo en que se está trabajando, este se debe de obtener de una muestra representativa la cual se lleva a laboratorio para un análisis granulométrico e identificar los porcentajes de arena, limos y arcillas.

Para el diseño de un sistema de riego debemos de conocer el agua disponible que existe en el suelo (véase Figura 2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), ya que en conjunto se determina el volumen de agua que realmente necesitan los cultivos para que estos se puedan desarrollar sin algún estrés hídrico. Hay que señalar que la aplicación de un plan de riego consta de saber el momento adecuado y la cantidad adecuada de agua que se dotara a los cultivos (Zotarelli et al., 2013).

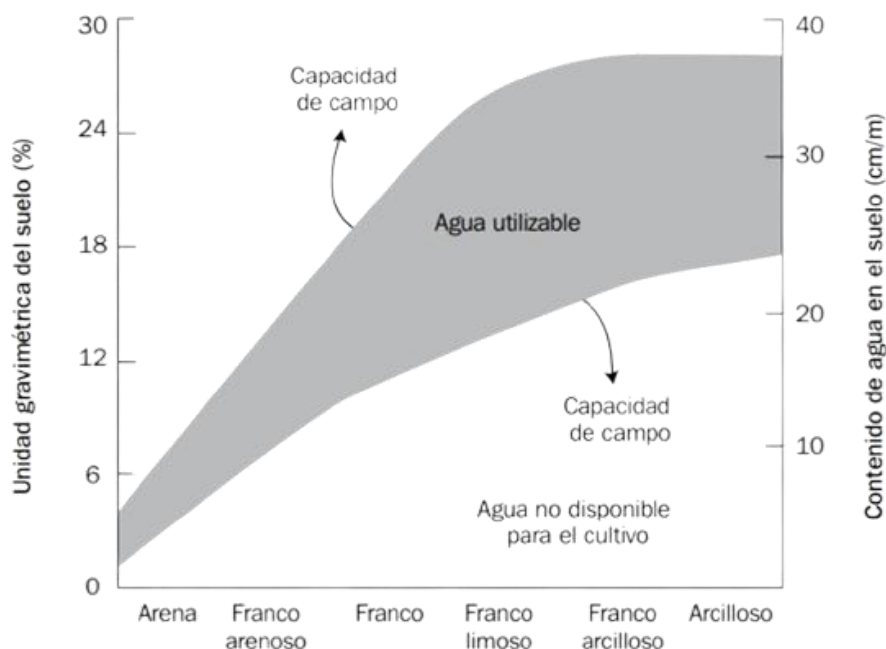


Figura 2.- Relación entre textura y características de agua en el suelo

3.3.6 Justificación

La agricultura es la principal actividad de proveer alimentos, materias primas, y mano de obra al sector agroindustrial, y en el aspecto social favorece el arraigo a sus tierras, el sustento a familias y la preservación de recursos naturales de cierto número de personas en localidades productoras (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023).

El agua, considerado un recurso limitado, sigue siendo un requisito elemental para la vida en la tierra. En este contexto el agua es muy demandada debido al aumento de la población y al cambio climático. Los recursos disponibles para la agricultura se han ido agotando a ritmos alarmantes, de ahí, varios métodos han sido remplazados por nuevos métodos de utilización con diferentes fuentes. (Ali et al., 2023)

Al explorar diferentes métodos de cálculo de ETo se ha determinado que existen ciertas incertidumbres ya que no siempre la necesidad hídrica se basa en un valor estandarizado, es decir, si el cultivo necesita 30L mensuales (por métodos a escala mensual) no quiere decir que hoy necesita 1 L y mañana también, ya que, por las condiciones del suelo, la

circunferencia radial del cultivo, la siguiente vez necesite menos agua o más. Teniendo en cuenta esto el cultivo tendrá que adaptarse de manera diaria a su necesidad lo que puede provocará un mal crecimiento y una mala cosecha. Actualmente la FAO ha estandarizado una ecuación que fue modificada en 1990, la ecuación de Penman-Monteith, esta ecuación (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) considera distintas variables climáticas, esta tabla se ha basado en el artículo (Celestin et al., 2020), por lo que contaría de necesitar estaciones cerca de nuestra zona de riego que cuenten con dichas variables.

Para el año 2050, la población mundial alcanzará los 9.1 mil millones, un aumento del 50% en comparación con el año 2000 (FAO, 2024). Debido al aumento del desarrollo industrial y el crecimiento urbano provoca consecuentemente la disminución de tierra y agua para el desarrollo de la agricultura que a su vez debe de perder satisfacer las demandas crecientes. La agricultura está en constante evolución y el riego debe de adaptarse a los nuevos requisitos (FAO | *Land & Water*, 2023).

De acuerdo a la evaluación de la gestión del agua, la agricultura tendrá que duplicar o cuadruplicar su rendimiento. Otras razones son la falta de acceso a la información, a los servicios de extensión y a los conocimientos técnicos. (FAO | *Land & Water*, 2023).

El consumo del agua para el uso agrícola es muy elevado, según el Banco Mundial en promedio se destina el 70% a nivel mundial y en México la cifra asciende al 76.04%, por lo que se convierte en una prioridad de agenda internacional (Romero et al., 2020).

México ha sido el más grande importador de frutas y vegetales frescos de EU. En el 2019 alrededor del 50% de la agricultura importada desde México a estados unidos fueron frutas y vegetales. Esta exportación alcanzo casi los 11 millones de toneladas métricas con un valor total de 15 billones de dólares casi dos veces el mismo año en el 2011 (F. Wu et al., 2022).

El desarrollo del riego superficial en México está muy limitado y actualmente, existen pocas fuentes de agua económicamente disponibles como pueden ser lagunas o lagos, por lo tanto, para mantener o mejorar la productividad en los distritos de riego es prioridad el mantenimiento óptimo de la infraestructura. Es importante notar que alrededor del 95% de la infraestructura de los distritos de riego fueron transferidas a las distintas asociaciones de los usuarios, tanto infraestructura y maquinaria (Ramón & Nazario, 2017). De acuerdo a la LAN

los usuarios pueden hacerse cargo de la infraestructura, siempre y cuando primero se cumpla lo dictaminado en el **art 71** (Cámara de Diputados, 2023):

En México la tecnificación de los sistemas de riego es poca debido a que se utiliza principalmente riego por inundación y por los costos de inversión, aproximadamente el 5% de los distritos de riego han sido tecnificados (Flores A, 2015). Por lo tanto, es de vital importancia la tecnificación de los diferentes DR del país.

Para poder desarrollar un proyecto de tecnificación en un Distrito de Riego se puede realizar en base a la LAN en el cual destacan los **art 76 y 77**. Sin embargo, muchas veces se limitan por cuestiones ambientales, técnicas o económicas dejando atrás los beneficios o intereses de los usuarios encargados de los Distritos. De poder llevarse a cabo se debe tomar en su totalidad lo que dicen los artículos de la LAN en su sección quinta “*Riego Tecnificado*”(Cámara de Diputados, 2023)

Es entonces que México no ha optado por tecnificar sus sistemas de riego, principalmente en esta zona de estudio del Módulo 1 del Distrito de Riego 020 de Morelia-Queréndaro ya que aún se sigue regando de manera tradicional y se siguen obteniendo los mismos rendimientos en cuanto a la producción y cosecha de sus cultivos.

La eficiencia de los DR tonelada de producción entre por metro cúbico de riego aplicado; también puede referirse al valor de la tonelada de producción obtenida por unidad hídrica utilizada (Romero et al., 2020).

4 Zona de Estudio

El DR 020 Morelia-Queréndaro mostrado en la Figura 5 (CONAGUA, 2023) se encuentra ubicado en los Municipios de Álvaro Obregón, Charo, Indaparapeo, Morelia, Queréndaro, Tarímbaro y Zinapécuaro en el estado de Michoacán. El Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro que comprende los valles de Morelia, Álvaro Obregón y Queréndaro, se encuentra localizado en la región Hidrológica No. 12 Lerma-Chápala zona B -Cuenca del Lago de Cuitzeo y Laguna de Yuriria y forman dos subcuencas menores constituidas por los Ríos Grande de Morelia y Queréndaro (Hernández Joel, 2011). El DR se encuentra actualmente conformado por 6 módulos de riego.

Para complementar la información sobre el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro fue necesario ir directamente a las oficinas del DR que se encuentran en la Ciudad de Morelia, para esto se complementara con la siguiente información

4.1 Características Generales del Distrito de Riego 020 Morelia Queréndaro

Desde el punto de vista del uso agrícola, el distrito está conformado por alrededor de 20 665 hectáreas dominadas bajo riego, de las cuales aproximadamente 19 646 ha son técnicamente regables. De esa extensión, la mayor parte se aplica al riego con aguas residuales tratadas. En términos de infraestructura hídrica, las fuentes de agua para riego comprenden las presas de Malpaís y Cointzio, siendo esta última especialmente relevante por almacenar tanto aguas superficiales de lluvia como aguas residuales tratadas provenientes de la ciudad de Morelia. Para su operación organizativa, el distrito se divide en varios módulos de riego, con una red de conducción, canales y sistemas de distribución que permiten abastecer a los usuarios agrícolas. Recientemente, el DR 020 ha sido objeto de intervenciones de modernización, con un convenio firmado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el gobierno estatal de Michoacán para la tecnificación de sus módulos II, III y IV. El carácter del distrito refleja los retos contemporáneos del uso del agua en agricultura: por un lado, la necesidad de incrementar la eficiencia del riego en regiones con estrés hídrico y, por otro, la integración del reúso de aguas residuales como herramienta para liberar agua para uso urbano.

4.2 Clima

El clima preponderante en la zona se clasifica como templado subhúmedo con lluvias en verano; se reporta una precipitación media anual cercana a los 862 mm, mientras que la evapotranspiración supera los 1 700 mm al año. (CONAGUA, 2023)

Según la clasificación de la FAO véase Tabla 3 (AGROVOC: *AGROVOC: Zonas Climáticas*, 2023), el Distrito de Riego se encuentra en una zona climática sub-húmeda con una precipitación entre 600-1200 mm/año. Esto hace posible la cultivación del mijo, el sorgo, el maíz, el maní, anacardos también yuca, caupí, algodón, camote, tabaco, arroz de secano, soya, mango, forrajes y pasturas. El Módulo 1 tiene una precipitación de 857 mm/año. (Hernández Joel, 2011)

Tabla 3.- Zonas climáticas de acuerdo a la FAO

Zona climática	Las precipitaciones anuales (mm)	Período húmedo (meses)	Vegetación
Desierto	menos de 100	0-1	Poca o ninguna vegetación
Áridas	100-400	01-mar	Algunos matorrales, algunos pastizales
Semi-áridas	400-600	03-abr	Matorrales y arbustos, pastizales
Sub - húmedo	600-1200	04-jun	Arbustos de los bosques, los pastizales
Húmedas subhúmedas	1200-1500	06-sep	Bosques y tierras arboledas
Húmedo	más de 1500	09-dic	Las selvas tropicales

4.3 Suelos

En el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, ubicado en el valle de Valle de Morelia-Queréndaro (Michoacán), se identifican varios tipos de suelos edáficos que influyen directamente en la aptitud agrícola de la zona. A continuación, se describen los principales tipos documentados, con base en estudios edafológicos de la región (INEGI, 2013). Vertisoles: Suelos de textura fina, con alto contenido de arcilla, que presentan fisuración en época seca y expansión/contracción. En el valle de Morelia-Queréndaro los vertisoles ocupan una proporción importante de la superficie. Feozem (o Phaeozem según clasificaciones):

Suelos oscuros, con buena fertilidad natural, desarrollados en materiales sedimentarios o aluviales, con buen drenaje y textura media. En la zona se indica que los feozems se encuentran luego de los vertisoles en cobertura superficial. Luvisoles: Suelos que se forman por acumulación de arcillas iluviales en horizontes subsuperficiales, con textura media a fina, y que han sido identificados en el municipio de Morelia y alrededores

4.4 Vegetación

En el valle de Morelia-Queréndaro, la vegetación original se ha visto fuertemente modificada debido a la intensificación agrícola. Dentro de los remanentes de vegetación natural se identifican Selva baja caducifolia, mezquital, vegetación halófila y vegetación procedente de reforestación (INEGI, 2013).

4.5 Principales fuentes de almacenamiento

Tabla 4.- Presas de Almacenamiento en funcionamiento dentro del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

Presas de almacenamiento	Capacidad m ³	
	NAME	NAMO
Cointzio	79,233,000.00	68,466,000.00
Malpais	27,249,000.00	18,512,000.00

Tabla 5.- Características documentadas de las presas de almacenamiento del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

Características de las presas de almacenamiento		
Comision Nacional del Agua		
Subdirección general de infraestructura hidroagícola		
Inventario de presas de almacenamiento		
Distrito de Riego No. 020 Morelia-Queréndaro		Año: Septiembre de 2016
Características	Numero de inventario y nombre de la presa de almacenamieto	
Obra	Cointzio	Malpais
Corriente principal	Rio grande de Morelia	Rio Queréndaro y Zinapecuaro
Año de terminación	1939	1938
Dependencia constructora	S.R.H.	Hacendados-S.R.H.
Cuenca		
Área	450 km ²	815.29 ha
Escurrimiento medio anual	78.7 millones de m ³	50.65 Mm ³
Gasto máximo registrado en la corriente principal	143.6 m ³ /s	60 m ³ /s
Gasto máximo probable en la corriente principal	150 m ³ /s	60 m ³ /s
Presa		
Tipo	Gravedad (Mat Grad.)	Gravedad
Altura	46 m	7 m
Longitud corona	300 m	8,000 m
Volumen de la Cortina	604, 726 m ³	
Geología de la boquilla	Tobas riolíticas	Limos arcillosos arenosos
Material de la cortina	Roca	Limos arcillosos arenosos
Vaso		
Capacidad total	79,232 Mm ³	27,249 Mm ³
Capacidad útil	68,519 Mm ³	18,512 Mm ³
Capacidad de asolves	10,000 Mm ³	4.85 Mm ³
Capacidad de control de avenidas	600 m ³ /s	12 m ³ /s
Obra de toma		
Tipo	Tubería de Presión	Compuerta Deslizante
Carga máxima	38 m	4 M
Gasto máximo	12,000 m ³ /s	0.300 m ³ /s
Superficie regable	14,888 ha	4,758 ha
Vertedor		
Tipo	Cresta Controlada	Compuerta Radial
Carga máxima	3.5 M	4 M
Longitud de cresta	29.90 m	
Gasto máximo	600 m ³ /s	14,000 m ³ /s

Tabla 6.- Inventariado de las presas de derivación del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

Características	Numero de Inventario y Nombre de la Presa de Derivación					
	El Salto	Cointzio	La Goleta	Corrales	Quirio	Zacapendo
Obra						
Corriente	Rio grande Morelia	Río grande	Río grande	Río grande	Río grande	Río grande
Año de iniciación						
Dependencia						
Constructora	SRH	SRH	Hacendados	Hacendados	SRH	SRH
A cargo de:	CNA	CNA	CNA	CNA	CNA	CNA
Corriente						
Escurrimiento medio						
Gasto máximo registrado						
Gasto máximo probable	15 m ³ /s	50 m ³ /s	45 m ³ /s	45 m ³ /s	50 m ³ /s	50 m ³ /s
Presa						
Tipo	Mampostería	Enrocamiento	Mampostería	Concreto	Mampostería	Concreto
Altura	5 m	2.07 m		1.25 m	1.95 m	
Longitud cortina o cresta	10 m	11.50 m		21 m	12 m	
Materiales	Cantera	Roca y Concreto Ref	Cantera	Concreto	Mampostería a Cantera	Concreto
Obra de toma						
Tipo	Compuertas	Compuertas	Agujas	Compuertas	Compuertas	Compuertas
Carga máxima						
Gasto máximo	2.5 m ³ /s	1.21 m ³ /s	0.8 m ³ /s	1.1 m ³ /s	9.68 m ³ /s	4 m ³ /s
Superficie regable	1000 ha	289 ha	150 ha	650 ha	8813 ha	4759 ha
Vertedor						
Tipo		Cresta libre		Cresta libre	Cresta libre	Cresta libre
Carga máxima		1.75 m			1.72 m	
Longitud cortina						
Gasto máximo						
Altura de sobreelevación						
Tipo de sobreelevación						

4.6 Asociaciones Civiles de Usuarios

El DR 020 se integra por 6 Módulos de Riego ya transferidos y organizados en Asociaciones Civiles, que son: Módulo 1, Asociación de Usuarios Aguas de Morelia, A.C.; Módulo 2, Asociación de Usuarios del Río Grande de Morelia, A.C.; Módulo 3, Asociación de Agricultores del Valle Alvaro Obregon-Tarimbaro, A.C.; Módulo 4, Asociación de Usuarios del Canal de Zacapendo, A.C.; Módulo 5, Asociación de Usuarios de la Presa Malpais, A.C.; Módulo 6, Asociación de Usuarios Lázaro Cárdenas Manantial-Chapultepec, A.C.

Estas asociaciones fueron designadas en operar, conservar y administrar las redes de canalés y drenes, así como recibir los volúmenes de agua y distribuirla a las diferentes zonas de cultivo.

Estructura Organizacional de las Asociaciones Civiles

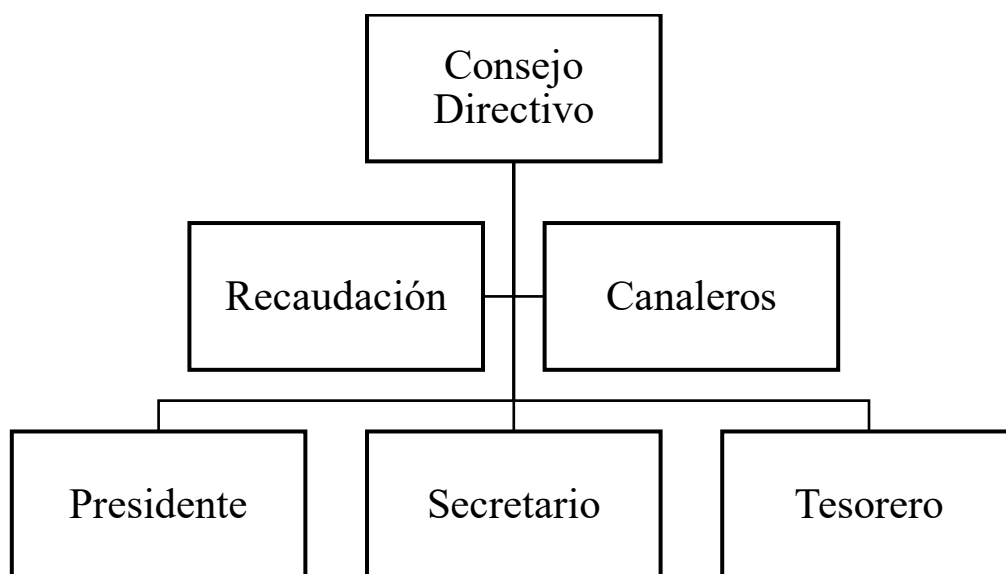


Figura 3.- Estructura de organización de las asociaciones civiles que se encuentran en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

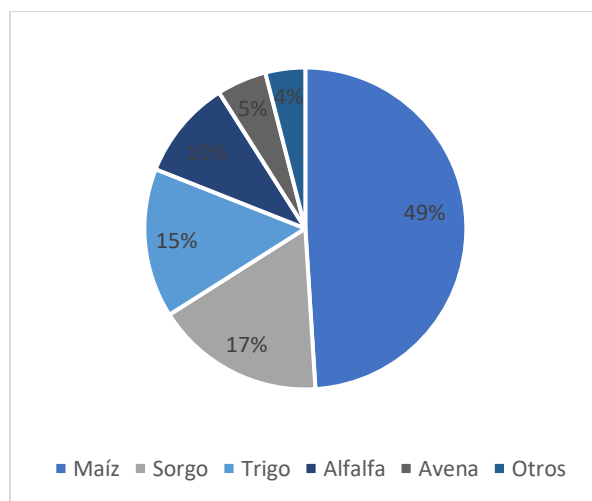


Figura 4.- Porcentajes de los cultivos más encontrados en todo el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

4.7 Inventariado de los canales de cada uno de los módulos del DR

El Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro cuenta con una red de conducción cuya longitud total es de 131.54 km, de los cuales únicamente 58.60 km (44.55%) se encuentran revestidos con concreto, el resto 72.94 km (55.45%) se encuentra sin revestir.

Tabla 7.- Canales del módulo VI del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

NOMBRE DE LA OBRA	CADENAMIENTO						LONGITUD EFECTIVA	GASTO (Q)	VELOCIDAD MEDIA (V)			
	INICIAL			FINAL								
	Km	Coordenadas geográficas		Km	Coordenadas geográficas					km	m³/s	m³/s
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud						
CANALES PPALES.												
CANAL BAJO IZQ	0+000	-101.527	19.571	8+052	-101.580	19.551	8.052	0.480	0.11			
CANAL ALTO IZQ	0+000	-101.521	19.573	4+632	-101.551	19.548	4.632	0.300	0.06			
CANAL BAJO DER	0+000	-101.527	19.571	6+540	-101.571	19.57	6.540	0.450	0.08			
CANAL ALTO DER	0+000	-101.522	19.574	4+720	-101.555	19.585	4.720	0.250	0.04			

Tabla 8.- Canales del módulo V del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

NOMBRE DE LA OBRA	CADENAMIENTO						LONGITUD EFECTIVA	GASTO (Q)	VELOCIDAD MEDIA (V)
	INICIAL			FINAL					
	Km	Coordenadas geográficas		Km	Coordenadas geográficas				
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud			
CANALES PPALES.									
CANAL SUR DE QDRO.	0+000	-100.879	19.833	12+190	-100.937	19.828	12.190	3.48-2.0	0.50
CANAL CANTERAS	0+000	-100.895	19.816	7+020	-100.941	19.847	7.020	0.8-0.45	0.24
S U M A							19.210		
CANALES LATERALES									
CANAL SAN RAMON	0+000	-100.899	19.816	2+700	-100.920	19.821	2.700	1.0-0.85	0.30
CANAL SAN ISIDRO	0+000	-100.889	19.822	6+720	-100.935	19.839	6.720	1.0-0.90	0.69
CANAL PAREDES	0+000	-100.88	19.833	8+400	-100.936	19.839	8.400	1.0-0.70	0.40

Tabla 9.- Canales del módulo IV del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

NOMBRE DE LA OBRA	CADENAMIENTO						LONGITUD EFECTIVA	GASTO (Q)	VELOCIDAD MEDIA (V)
	INICIAL			FINAL					
	Km	Coordenadas geográficas		Km	Coordenadas geográficas				
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud			
CANALES PPALES									
CANAL ZACAPENDO	0+000	-101.005	19.804	3+780	-100.993	19.829	3.780	7.0-6.5	1.38
	3+780	-100.993	19.829	7+000	-101.970	19.816	3.220	2.0-1.7	0.80
	7+000	-101.970	19.816	7+520	-100.972	19.820	0.520	1.37-1.3	0.36
	7+520	-100.972	19.820	10+140	-100.954	19.808	2.620	1.00-0.8	0.44
	10+140	-100.954	19.808	10+240	-100.952	19.809	0.100	1.00-0.8	0.16
	10+240	-100.952	19.809	11+960	-100.947	19.810	1.720	1.00-0.8	0.44
	11+960	-100.947	19.810	14+020	-100.928	19.803	2.060	0.80-0.8	0.18
CANALES LATERALES									
CANAL TZINTZIMEO	0+000	-101.005	19.804	9+000	-101.928	19.803	9.000	1.50-1.0	0.27
CANAL No. 7	0+000	-100.97	19.816	4+000	-100.955	19.840	4.000	0.45-0.3	0.26
CANAL No. 8	0+000	-100.943	19.804	4+000	-100.934	19.820	4.000	0.4-0.35	0.55
CANAL PALMAS 1	0+000	-100.993	19.829	5+000	-100.968	19.855	5.000	0.35-0.3	0.39
CANALES SUBLAT.									
CANAL LA MINA	0+000	-101.002	19.844	8+700	-100.987	19.891	8.700	0.5-0.28	0.07
CANAL LAS PIEDRAS	0+000	-101.005	19.843	5+500	-101.003	19.887	5.500	0.35-0.2	0.22
CANAL PALMAS 2	0+000	-100.9	19.836	5+000	-100.97	19.861	5.000	0.35-0.2	0.20

Tabla 10.- Canales del módulo III del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

NOMBRE DE LA OBRA	CADENAMIENTO						LONGITUD EFECTIVA	CONSERVACIÓN A CARGO DE	GASTO (Q)	VELOCIDAD MEDIA (V)
	INICIAL			FINAL						
	Km	Coordenadas geográficas		Km	Coordenadas geográficas					
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud				
							km		m³/s	m³/s
CANALES PPALES.										
CANAL JOCONOLES	0+000	-101.006	19.792	4+340	-101.029	19.811	4.340	MODULO III	12.0-12.0	1.000
	4+340	-101.029	19.811	12+300	-101.072	19.797	7.960	MODULO III	8.0-8.0	0.960
	12+300	-101.072	19.797	13+000	-101.098	19.785	0.700	MODULO III	8.0-8.0	0.960
	13+000	-101.098	19.785	18+630	-101.128	19.775	5.630	MODULO III	7.21-7.0	0.980
	18+630	-101.128	19.775	20+000	-101.143	19.773	1.370	MODULO III	6.0-5.94	1.790
	20+000	-101.143	19.773	23+000	-101.157	19.775	3.000	MODULO III	5.9-5.0	1.820
	23+000	-101.157	19.775	23+700	-101.158	19.779	0.700	MODULO III	3.6-6.0	1.260
	23+700	-101.158	19.779	25+000	-101.151	19.801	1.300	MODULO III	2.93-2.5	0.980
	25+000	-101.151	19.801	28+500	-101.138	19.814	3.500	MODULO III	2.5-2.0	0.760
	28+500	-101.138	19.814	37+100	-101.072	19.863	8.600	MODULO III	1.5-1.5	0.460
CANAL EL TUBO	0+000	-101.079	19.806	3+000	-101.07	19.808	3.000	MODULO III	0.334	0.327
CANAL LA CABA	0+000	-101.04	19.873	1+050	-101.044	19.877	1.050	MODULO III	0.358	0.300
CANAL LA LINEA	0+000	-101.036	19.889	2+376	-101.028	19.88	2.376	MODULO III	0.358	0.300
CANAL EL MORAL	0+000	-101.035	19.896	1+248	-101.025	19.893	1.248	MODULO III	0.08	0.045
CANAL EL INJERTO	0+000	-101.035	19.899	4+350	-101.011	19.916	4.350	MODULO III	0.12	0.035

Tabla 11.- Canales del módulo II del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

NOMBRE DE LA OBRA	CADENAMIENTO						LONGITUD EFECTIVA	GASTO (Q)	VELOCIDAD MEDIA (V)
	INICIAL			FINAL					
	Km	Coordenadas geográficas		Km	Coordenadas geográficas				
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud			
CANALES									
LA GOLETA	0+000	-101.113	19.744	7+000	-101.075	19.745	7.000	0.8-0.30	0.50
LA NOPALERA	0+000	-101.071	19.752	4+000	-101.060	19.765	4.000	0.6-0.40	0.48
	4+000	-101.060	19.765	13+300	-100.997	19.793	9.300	0.6-0.40	0.48
CORRALES	0+000	-101.073	19.753	10+000	-101.006	19.792	10.000	0.5-0.20	0.44

Tabla 12.- Canales del módulo I del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

NOMBRE DE LA OBRA	CADENAMIENTO						LONGITUD EFECTIVA	GASTO (Q)	VELOCIDAD MEDIA (V)
	INICIAL			FINAL					
	Km	Coordenadas geográficas		Km	Coordenadas geográficas				
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud			
CANALES PPALES.									
CANAL LA HUERTA	0+000	-101.262	19.632	8+600	-101.213	19.663	8.600	6.6-1.5	0.862
CANAL COINTZIO	0+000	-101.258	19.638	3+500	-101.272	19.649	3.500	1.0-0.15	0.517
CANAL ITZICUARO	0+000	-101.272	19.649	0+700	-101.273	19.652	0.700	1.0-1.0	0.482
	0+700	-101.273	19.652	7+000	-101.251	19.681	6.300	1.0-0.3	0.260
S U M A							19.100		
CANALES LATERALES									
CANAL LA ESCUELA	0+000	-101.228	19.656	3+000	-101.237	19.669	3.000	0.5-0.5	0.490
CANAL EL COYOTE	0+000	-101.215	19.677	3+000	-101.22	19.679	3.000	0.5-0.5	0.645
CANAL LA HIGUERA	0+000	-101.234	19.648	2+000	-101.242	19.661	2.000	0.5-0.5	0.645

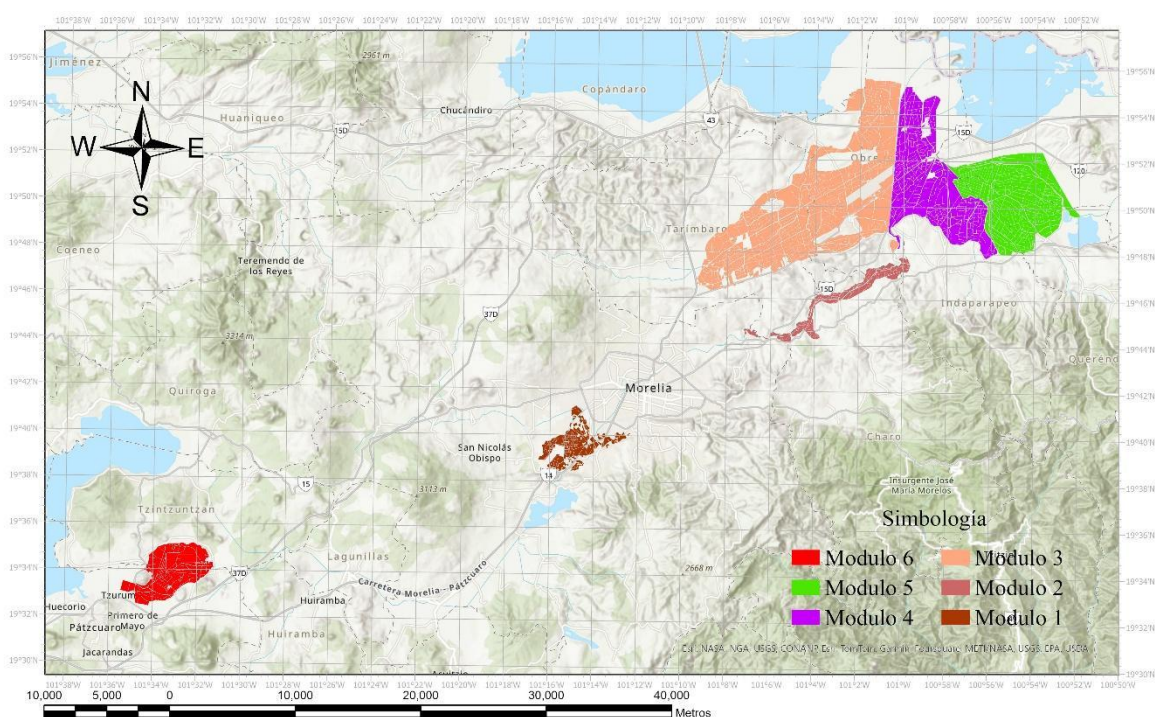


Figura 5.- Plano general del Distrito de Riego 020, Morelia-Queréndaro. Se pueden apreciar de manera general como está conformado el DR 020 por sus diferentes módulos

4.8 Suministro de demanda del módulo I

Como se conoce que la demanda agrícola crece con forme los años, los usuarios del DR se han dado cuenta que necesitan más volúmenes de agua que cubran toda la superficie de riego. Normalmente se espera que este crecimiento no varíe respecto a años anteriores y que la demanda de agua sea de igual manera similar. Pero en ocasiones existen cambios de cultivo en las zonas lo que hace en este sentido que las demandas de volúmenes entregados no sean suficientes.

El módulo cuenta con 19.06 km de canal de conducción (Hernández Joel, 2011). El módulo 1 está conformado por dos canales principales de conducción que anualmente cuentan con un suministro a la superficie de riego que a la vez cumple con la demanda (CONAGUA, 2009), véase 3.

Tabla 13.- Suministro superficial a la demanda del periodo (2005-2010) para la red de conducción.

Mes	Canal La Huerta		Canal Cointzio	
	Volumen (hm ³)	Volumen (m ³)	Volumen (hm ³)	Volumen (m ³)
Octubre	0.115	115,000	0	0
Noviembre	0.422	422,000	0.061	61,000
Diciembre	0.55	550,000	0.079	79,000
Enero	0.548	548,000	0.098	98,000
Febrero	0.606	606,000	0.094	94,000
Marzo	0.751	751,000	0.123	123,000
Abril	1.229	1,229,000	0.294	294,000
Mayo	0.841	841,000	0.173	173,000
Junio	0.251	251,000	0.036	36,000
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0
Anual Σ	5.313	5,313,000	0.958	958,000

El Módulo 1 es abastecido de manera superficial (sin bombeos). Para este Módulo se tienen las mayores diferencias entre lo suministrado y lo programado, principalmente los meses de diciembre, marzo y junio, véase Figura 6 (Hernández Joel, 2011) . El volumen medio anual suministrado es de 6.27 hm³ que es mayor al volumen medio anual programado que es de 6.145 hm³. El mes donde se hace la mayor entrega del recurso es en abril con 1.52 hm³ (Hernández Joel, 2011).

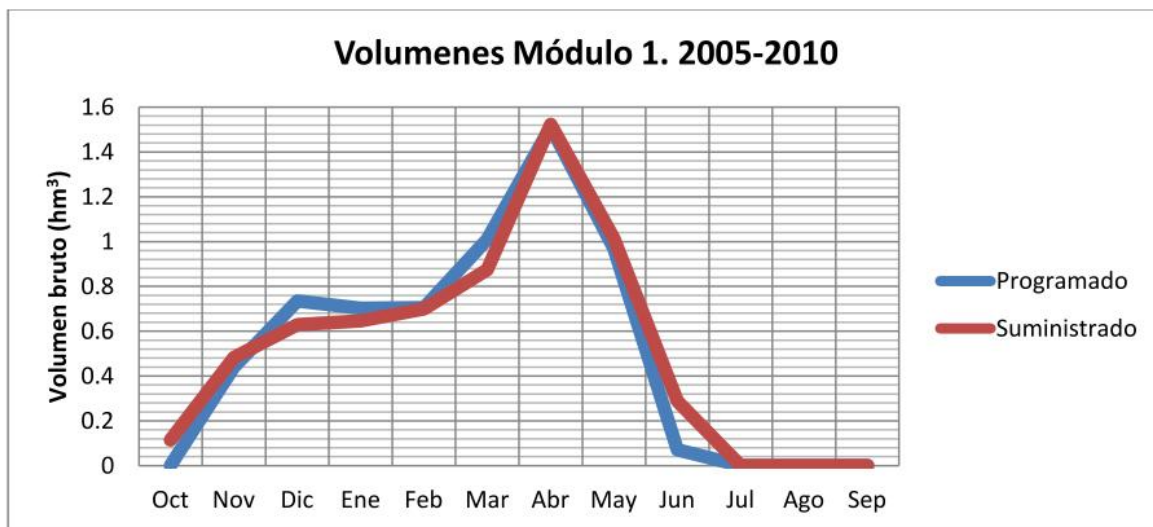


Figura 6. - Volúmenes brutos programados y suministrados para el Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro

4.9 Eficiencia del módulo I

Los Distritos de Riego cuentan con diversas características, para que este pueda tener un rendimiento y una eficiencia se deben de evaluar distintos parámetros, desde la producción de cultivos, la evaluación del sistema de conducción, la fuente de abastecimiento hasta las parcelas, la aplicación y principalmente la eficiencia.

Para evaluar la eficiencia depende igual de diferentes factores que varían respecto a cada mes y para cada año (Véase Figura 7). A continuación, se mencionan algunos de ellos.

- ~ La infiltración en los canales de conducción, distribución y drenaje.
- ~ La evaporación que ocurre en los canales.

- ~ Desbordamiento cuando el caudal excede las dimensiones que pueden transportar los canales.

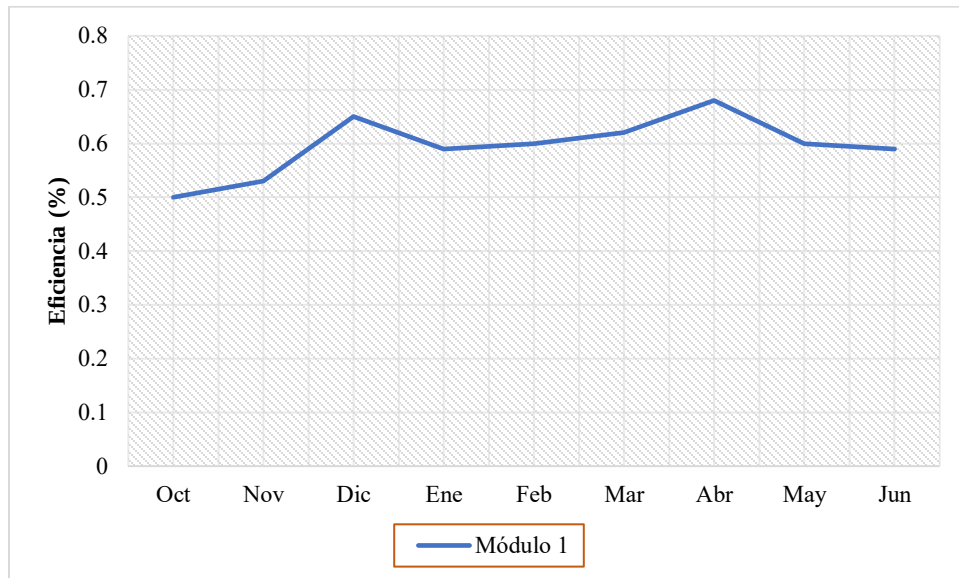


Figura 7.- Eficiencia del módulo 1

Para el Distrito de Riego la eficiencia de los canales se encuentra entre el 40 y el 80%. En lo concerniente al Módulo 1 la eficiencia para los últimos 5 años se encuentra en un 59.87% y se pierden en el sistema en promedio anual 2.383 hm³ (Figura 8). De esta cantidad de agua, hay una parte que se considera recarga al acuífero, otra se pierde en el sistema, véase Figura 8, (Hernández Joel, 2011).

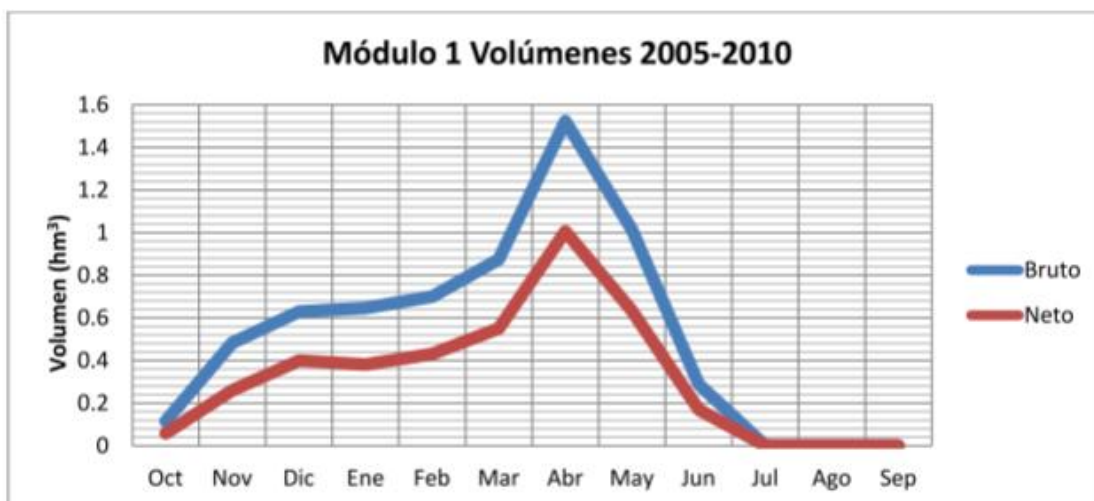


Figura 8.- Volumen bruto y neto para el Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

4.10 Cultivos existentes en el módulo I

El DR 020 Morelia-Queréndaro cuenta con diversos cultivos (Figura 9) que siembran en temporal y fuera de temporal, dichos cultivos en su materia presentes son los siguientes: maíz forrajero, sorgo, trigo, alfalfa, avena y otros como pueden ser distintos forrajes ya que esta zona se dedica bastante al auto consumo para animales para forrajes.

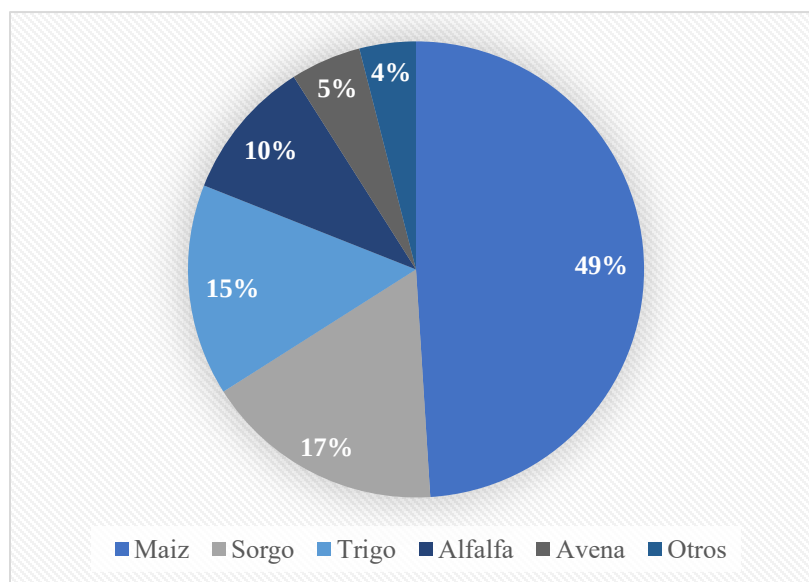


Figura 9.- Cultivos encontrados en DR 020 y su distribución en superficie.

En el módulo I existen una distribución de cultivos más específica como se pueden ver en la Tabla 14 y Figura 10 que representa tan tolo el ciclo de cultivo 2021-2022

Tabla 14.- Distribución de cultivos para el módulo I

Cultivo	Porcentaje	Area correspondida (ha)
Avena	6.00%	54.8772
Alfalfa	10.00%	91.462
Cebada	3.00%	27.4386
Chile	3.00%	27.4386
Garbanzo	3.00%	27.4386
Janamargo	3.00%	27.4386
Maíz	40.00%	365.848
Sorgo	17.00%	155.4854
Trigo	15.00%	137.193
Total	100.00%	914.62

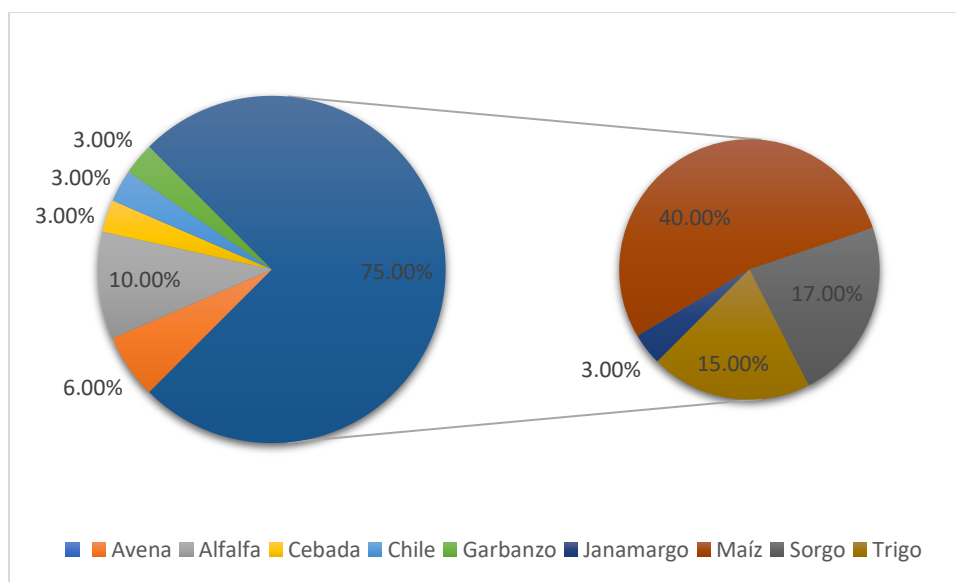


Figura 10.- Distribución porcentual de los distintos cultivos encontrados en el módulo I del DR 020

El cultivo más importante es el maíz con un 40% del modulo para este cultivo los cuales se presentan en la Tabla 15 y Figura 11. Este cultivo presenta volúmenes brutos de hasta 41.57 cm en la lámina bruta de riego y un volumen de 754,063 m³. El año agrícola con mayor abastecimiento es el 2017-2018.

Tabla 15.- Distribución de abastecimiento para el maíz (2007-2018). Fuente Elaboración propia

Maíz grano			
Lamina (cm)		Volumen (m ³)	
Neto	Bruto	Neto	Bruto
18.00	30.16	450,000	754,073
21.79	41.57	719,100	1,371,796
18.46	28.78	480,000	748,234
17.47	31.77	373,800	679,974
19.59	34.11	13,581,200	23,641,602
20.23	20.23	291,800	291,800
9.78	19.18	5,110,170	10,020,087
9.78	19.18	5,110,170	10,020,087
18.38	36.04	340,000	666,667
14.54	23.65	2,713,035.00	5,249,660.38
16.14	31.16	15,283,760	29,505,987
21.85	36.06	14,615,580	24,122,119
21.07	34.89	15,632,200	25,883,635

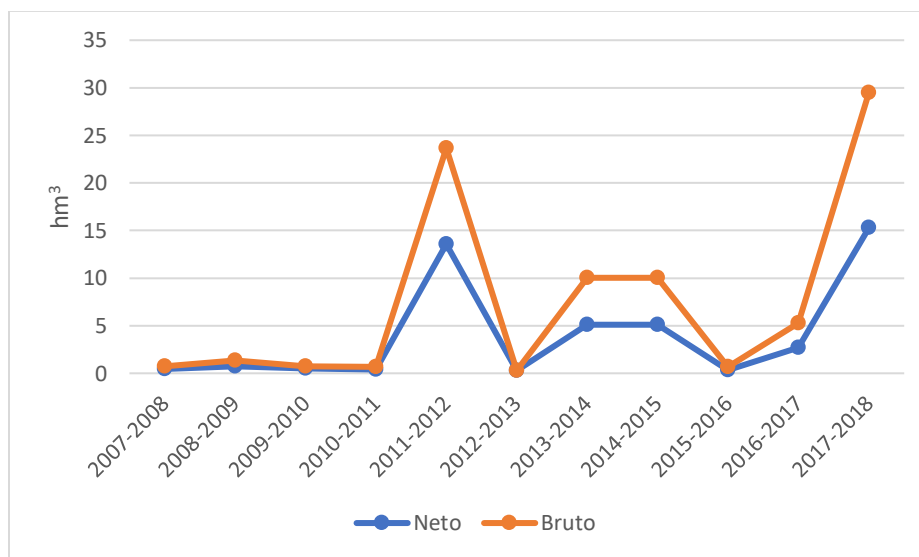


Figura 11.- Distribución temporal del abastecimiento para el maíz (2007-2018). Fuente Elaboración propia-

4.11 Suelo

De acuerdo a las características físicas que se encuentran en el Distrito de Riego se usó la información de INEGI en escala 1:250000. El módulo 1 se encuentra en un 98% al tipo de suelo arenoso (INEGI, 2013). A continuación, en la Tabla 116 se muestran las características para el desarrollo del cultivo en el suelo existente.

Tabla 16.- Características del suelo presente en el Módulo 1 del DR 020 Morelia-Queréndaro.

Características de la arena		
Humedad del suelo disponible total (CC-PM	80	mm/metro
Tasa máxima de infiltración de la precipitación	38	mm/día
Profundidad radicular máxima	900	cm
Agotamiento inicial de humedad del suelo como % de ADT	50	%
Humedad del suelo inicialmente disponible	40	mm/metro

5 Metodología

Para poder diseñar un sistema de riego eficiente que ha de tomar en cuenta varios datos y decisiones que lleven a al diseño más óptimo, para esto se tomó la decisión de diseñar una metodología como se puede observar en la siguiente Figura 12.

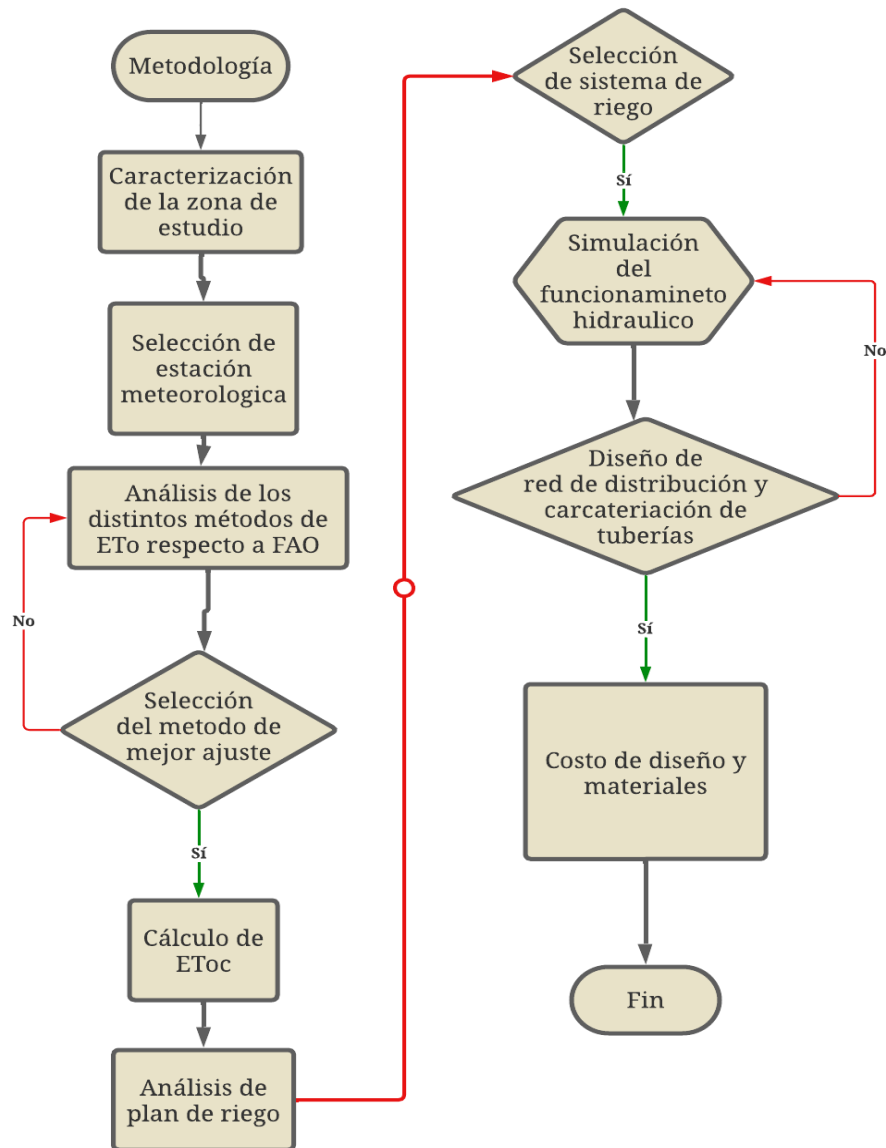


Figura 12.- Metodología diseñada para el diseño del nuevo sistema de riego

5.1 Análisis y selección del método de ETo de mejor ajuste

5.1.1 Método de FAO Penman-Monteith

En este sentido al existir múltiples métodos para calcular la ETo la FAO estandarizó un método modificado de la ecuación original de Penman-Monteith. En 1950, Penman combinaba un método de transferencia de masa y hacia un balance energético combinando variables como la velocidad de viento, la evaporación y las horas del sol. No es hasta 1990 que la FAO hace oficial una nueva modificación a la ecuación de Penman-Monteith. Sumado a lo anterior la FAO considerando coeficientes de ajuste que dependen del cultivo, la radiación neta en la superficie del cultivo, la radiación extraterrestre entre otras más (Allen R. et al., 2006).

A las conclusiones que se llegó es que la ecuación modificada de Penman-Monteith son las siguientes:

- ~ Se puede utilizar la ecuación para diferentes climas y países.
- ~ Se puede relacionar la evapotranspiración de otros cultivos (Allen R. et al., 2006).

Es por eso que al modificar la ecuación se estandarizó para que pueda ser aplicada en todo el mundo.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma[900/(T_{mean} + 273)]u_2(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

5.1.2 Métodos comparativos de evapotranspiración

Los métodos basados en temperatura son los más utilizados para estimar la ETo debido a su simplicidad y los requerimientos (Temperatura) que necesitan para ser desarrollados, estos métodos fueron desarrollados después de comparar la relación entre la precipitación, temperatura y cambio hídrico (Jensen et al., 1990; Thornthwaite, 1948; Xiang et al., 2020)

- ~ **Hargreaves and Samani** (Hargreaves et al., 1985), dicho método fue desarrollado en Davis, California y aplicado en diferentes regiones de los Estados Unidos de

América (EUA) como Lompoc, California; Seabrook, New Jersey y en países tal como Aspendale, Australia y Damin, Haití.

- ~ **Trajkovic** (Trajkovic, 2007). Este método revela las deficiencias de los métodos de la FAO y Hargreaves, aplicado originalmente en la región de Western Balkans en el sureste de Europa. Este método fue comparado para regiones principalmente de clima húmedo como son Varazdin, Croacia; Zagreb, Croacia; Bihac, Bosnia; Novi Sad, Serbia; Negotin, Serbia; Kragujevac, Serbia; Niš, Serbia y Vranje, Serbia.
- ~ **Tabari y Talaee-1** (Tabari & Talaee, 2011). Este método comparó los métodos de la FAO Tabari y Talaee-1 y de Hargreaves, Tabari y Talaee se aproximaron a los climas más parecidos a los dos métodos mencionados con anterioridad (árido y frío), desarrollado en las provincias de Kermán y Kordestán (Irán). Actualmente se han aplicado este método en climas contrarios (húmedos y cálidos) como en Colombia (Arteaga-Ramírez et al., 2015)
- ~ **Tabari y Talaee-2** (Tabari & Talaee, 2011). Debido a que este método fue desarrollado en Irán en climas secos y fríos la fórmula original fue variando en coeficientes constantes, variando en las zonas, pero determinando valores similares en cuando ETo. Se ha aplicado en países como Indonesia (Wayan S. et al., 2023) y Bangladesh (Salam et al., 2020).
- ~ **Droogers y Allen-1** (Droogers & Allen, 2002). Este método tuvo la finalidad de modificar el método original de Hargreaves y de la FAO. Este método utilizó datos globales de clima para así obtener mejores comparaciones con los dos métodos antes dichos. Este primer método se aplicó en climas similares a los de Davis, California como Hargreaves. Ha tenido aplicación en el norte de México (Ortiz-Gómez et al., 2022), en China (Peng et al., 2017).
- ~ **Droogers y Allen-2** (Droogers & Allen, 2002). Este segundo método no varía mucho ya que al comparar con el primero empleado en climas similares a los de Hargreaves, se notó que necesitaba una corrección en regiones húmedas (Majidi et al., 2015).
- ~ **Berti** (Berti et al., 2014). Antonio Berti observó que los métodos de la FAO y Hargreaves son aplicables siempre y cuando haya información de bases

meteorológicas; Berti decidió recalibrar la ecuación de Hargreaves y fue aplicada en la región del noreste de Italia, Véneto.

- ~ **Ugyen Dorji** (Dorji et al., 2016). El método de Dorji está aplicado originalmente en la región de Bhutan en Suiza, pero fue extrapolado para la región de los Himalayas con una elevación de 100-7550 m que es equivalente a la región de Bhutan.
- ~ **Robertson** (Robertson W. & Baier W., 1965). Este método compara la ETo en condiciones simples (EXPLICAR) del clima. Las principales ciudades donde se aplicó este método fueron Ottawa, Normandin, Swift Current, Lacombe, Beaverlodge y Fort Simpson, todas ciudades en Canadá.
- ~ **Ahooghalandari- 1**(Ahooghalandari et al., 2016). Es el primer método que empieza a considerar la radiación extraterrestre, la humedad relativa y la temperatura media. Tiene como origen de aplicación en el oeste de Australia.
- ~ **Ahooghalandari-2**(Ahooghalandari et al., 2016). La variación del coeficiente depende solamente de un reajuste que compite directamente con la ecuación de la FAO.

Los métodos basados en radiación solar son a aquellos que necesitan principalmente la temperatura máxima y mínima del aire, así como la radiación solar entrante (Celestin et al., 2020; Hargreaves & Allen, 2003; Tabari & Talaei, 2011; Xiang et al., 2020). Estos métodos son los más utilizados en escalas globales y regionales (Celestin et al., 2020)

- ~ **Makkink** (Singh Rawat et al., 2019). Este método está basado para climas áridos y se ha aplicado en regiones como Uzbekistán (López-Urrea et al., 2006)
- ~ **Priestley and Tayler** (Priestley & Taylor R. J., 1972). Tuvo como aplicabilidad la ciudad de Victoria en Australia; este método fue desarrollado para climas y tierras completamente secos (H. Wu et al., 2021)
- ~ **Jensen and Haise**. (Jensen & Haise, 1963). Los resultados de este estudio han determinado que la principal causa de ETo es la radiación solar, el origen del desarrollo de este método fue en el oeste de Estados Unidos de América en la Cuenca del Río de Columbia, Phoenix Arizona, Fresno California.

- ~ **Hargreaves.** (Hargreaves & Asae, 1975). Este método está especificado para climas con distinguible humedad como Venezuela, Nicaragua y Ecuador, sin embargo, ha tenido aplicaciones en regiones del Norte de Brasil y en México. De acuerdo a las variables necesarias para este método (precipitación, temperatura y radiación solar) puede ser aplicado en casi cualquier área que se desee aplicar (Hargreaves & Allen, 2003).
- ~ **Abtew- 1 y 2.** (Abtew2, 1996b) Este método fue aplicado al sureste de Florida, con clima húmedo. (Abtew, 2005b)
- ~ **Irmak 1 y 2.** (Irmak et al., 2003) Basados en los métodos de FAO y Priestley-Taylor este método desarrolló dos ecuaciones que son aplicables a climas húmedos, áridos y de costa. Se ha aplicado en lugares como Miami, Utah, Tifton, Tampa y Gainesville en Estados Unidos.
- ~ **Oudin.** (Robertson W. & Baier W., 1965) . - Este método se basa principalmente en la temperatura media y en la radiación solar, fue desarrollada en distintas ciudades de Canadá como: Ottawa, Normandin, Swift Current, Lacombe, Beaverlodge. Se ha aplicado que el método de Oudin se ha aplicado en regiones de África (Kodja et al., 2020).

Los métodos de transferencia de masa, también conocidos como “aerodinámicos”. Estos métodos se basan en la transferencia de vapor de agua de la superficie en evaporación hacia la atmosfera (Albrecht, 1950; Celestin et al., 2020; Dalton, 1802; Meyer, 1926; Tabari & Talaei, 2011; Xiang et al., 2020).

- ~ **Dalton** (1801).- Dalton menciona que las principales variables de mayor influencia para determinar la ETo son la velocidad del viento y la humedad. Realmente no hay una ubicación exacta de donde se haya desarrollado este método (Xiang et al., 2020).
- ~ **Meyer A.** (1926). – Ecuación desarrollada para climas secos, húmedos y desérticos con alta humedad relativa. (Meyer, 1926). Este método ha sido empleado en Malaysia peninsular (Muhammad et al., 2019)
- ~ **Rohwer** (1931). – Observó que, durante periodos constantes de viento, se encontraba una relación directa con la evaporación y la diferencia de presión de vapor. (Rohwer

& Rohwer, 1931). Es considerado como un método aerodinámico y que ha tenido un buen desarrollo en diferentes zonas climáticas en China (Yang et al., 2021).

- ~ **Albrecht** (1950). – Este método se desarrolló en el Indo-Pacífico, es decir, al lado del agua de la tierra. Para determinar la ETo se basó en el cálculo del balance térmico y a partir del gradiente de presión de vapor (Albrecht, 1950).
- ~ **WMO** (1966). – Este método está basado en el uso de artefactos que ayuden a medir la ETo de manera más precisa y confiable, distinguiendo métodos de tanques de evaporación y bandejas. (WMO, 1966).
- ~ **Trabert** (1896). – (Bormann, 2011). - Este método enfoca observaciones de velocidades de viento y evaporación. Actualmente este método solo sirve de referencia para el desarrollo de nuevas ecuaciones, en diferentes regiones donde se cuenten con las variables necesarias (Ghiat et al., 2023).
- ~ **Brockamp and Wenner** (1963). – Este método hace hincapié para desarrollar distintos estudios relacionados a coeficientes de calor que tienen una interzas de relación aire-agua en función de la velocidad del viento en zonas de los Países Bajos (Sweers, 1976). Este método ha tenido comparaciones con distintos métodos existentes aplicados en zonas de Irán (Rezaei et al., 2016).
- ~ **Mahringer** (1970). – Los estudios de Mahringer ha tenido aplicaciones principalmente en lagos, como es el estudio del lago de Neusield en Austria, en el Valle del río en Senegal (Djaman et al., 2015),
- ~ **Penman** (1948). – Este método fue el origen del método estandarizado de la FAO (Beven, 1979).
- ~ **Romanenko** (1961). – Aunque este método está basado en trasferencia de masa. En China, específicamente en la llanura del noreste, Romanenko ha sido un método de referencia con nuevas tecnologías de estudio; como es el método de aprendizaje profundo (Deep Learning) y en estudios de redes neuronales profundas (Deep Neuronal Network). (Chen et al., 2020)

Tabla 17.- Formulas para el cálculo de ETo contrastadas a los requerimientos del método de la FAO

Modelo/Autor	Ecuación	Latitud	Elevación	T mean	T max	T min	RH mean	RH max	RH min	U a 2m	Rs
Penman-Monteith	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[900/(T_{mean} + 273)]u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Métodos basados en temperatura		Latitud	Elevación	T mean	T max	T min	RH mean	RH max	RH min	U a 2m	Rs
Hargreaves-Samani (1985)	$ET_o = [0.0023Ra(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}] / \lambda$	✓		✓	✓	✓					
Trajkovic(2007)	$ET_o = [0.0023 \times Ra(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424}] / \lambda$	✓		✓	✓	✓					
Tabari - Talaei-1(2011)	$ET_o = [0.0031 \times Ra(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}] / \lambda$	✓		✓	✓	✓					
Tabari - Talaei-2(2011)	$ET_o = [0.0028 \times Ra(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}] / \lambda$	✓		✓	✓	✓					
Droogers - Allen-1 (2002)	$ET_o = [0.003 \times Ra(T_{mean} + 20)(T_{max} - T_{min})^{0.4}] / \lambda$	✓		✓	✓	✓					
Droogers - Allen-2 (2002)	$ET_o = [0.0025 \times Ra(T_{mean} + 16.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}] / \lambda$	✓		✓	✓	✓					
Berti et al. (2014)	$ET_o = [0.00193 \times Ra(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.517}] / \lambda$	✓		✓	✓	✓					
Dorji et al. (2016)	$ET_o = [0.002 \times Ra(T_{mean} + 33.9)(T_{max} - T_{min})^{0.296}] / \lambda$	✓		✓	✓	✓					
Baier and Robertson (1965)	$ET_o = 0.109 \times (Ra/\lambda) + 0.157 \times T_{max} + 0.158(T_{max} - T_{min}) - 5.39$	✓			✓	✓					
Ahooghalandari-1 (2016)	$ET_o = 0.252(Ra/\lambda) + 0.221 \times T_{mean}(1 - RH_{mean}/100)$	✓		✓			✓				
Ahooghalandari-2 (2016)	$ET_o = 0.29(Ra/\lambda) + 0.15 \times T_{max}(1 - RH_{mean}/100)$	✓			✓		✓				
Métodos basados en radiación solar		Latitud	Elevación	T mean	T max	T min	RH mean	RH max	RH min	U a 2m	Rs
Hargreaves-2	$ET_o = (0.408 \times 0.0025 \times (T_{mean} + 20) \times (T_{max} - T_{min})^{0.4} \times Ra)$			✓	✓	✓					
Hargreaves-3	$ET_o = (0.00193 \times Ra \times (T_{mean} + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.517})$			✓	✓	✓					
Hargreaves-4	$ET_o = (0.0135 \times (T_{mean} + 17.8) \times Rs) / \lambda$			✓							✓
Irmak-3	$ET_o = -0.478 + 0.156 \times Rs - 0.0112 \times T_{max} + 0.0733 \times T_{min}$				✓	✓					✓
Ravazani	$ET_o = (0.867 + 0.00022 \times elev) \times 0.0023 \times Ra \times (T_{mean} + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5}$			✓	✓	✓					
Hansen	$ET_o = 0.7 \times (\Delta / (\Delta + \gamma)) \times (Rs / \lambda)$										✓
Makkink (1957)	$ET_o = 0.7 \times (Rs/\lambda) \times [\Delta/\Delta + \gamma] - 0.12$		✓	✓							✓
Priestley-Taylor (1972)	$ET_o = 1.26(R_n - G) / [\Delta/\Delta + \gamma] / \lambda$		✓	✓							
Jensen-Haise(1963)	$ET_o = (0.025 \times T_{mean} + 0.08)Rs/\lambda$			✓							✓
Hargreaves (1975)	$ET_o = [0.0135(T_{mean} + 17.8)Rs] / \lambda$			✓							✓
Abtew-1(1996)	$ET_o = 0.52 \times T_{max} \times Rs/\lambda$				✓						✓
Abtew-2(1996)	$ET_o = (T_{max}/56) \times (Rs/\lambda)$				✓						✓
Irmak et al. (2003)-1	$ET_o = -0.611 + 0.149 \times Rs + 0.079 \times T_{mean}$			✓							✓
Irmak et al. (2003)-2	$ET_o = 0.469 + 0.289 \times R_n + 0.023 \times T_{mean}$			✓							
Tabari and Talaei (2011)	$ET_o = -0.642 + 0.174 \times Rs + 0.0353 \times T_{mean}$			✓							✓
Tabari and Talaei (2011)	$ET_o = -0.478 + 0.156 \times Rs - 0.0112 \times T_{max} + 0.0733 \times T_{min}$				✓						✓
CaprioT	$ET_o = (0.01092708 \times T_{mean} + 0.0060706) \times Rs$			✓							✓
Oudin (2004)	$ET_o = (Rs/\lambda) \times [T_{mean} + 5]/100$			✓							✓
Turc	$ET_o = 0.013 \times (23.88 \times (0.25 + 0.5 \times (n/N)) \times Ra + 50) \times T_{med} \times ((T_{med} + 15)^{-1})$			✓							
Métodos basados en transferencia de masa		Latitud	Elevación	T mean	T max	T min	RH mean	RH max	RH min	U a 2m	Rs
Dalton (1802)	$ET_o = (3.648 + 0.7223u_2)(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
Meyer (1926)	$ET_o = (3.75 + 0.503u_2)(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
Rohwer (1931)	$ET_o = (3.3 + 0.891u_2)(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
Albrecht (1950)	$ET_o = (1.005 + 2.97u_2)(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
WMO (1966)	$ET_o = (1.298 + 0.934u_2)(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
Trabert (1896)	$ET_o = 0.3075 \times u_2 \times 0.5(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
Brockamp and Wenner (1963)	$ET_o = 0.543 \times u_2 \times 0.456(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
Mahringer (1970)	$ET_o = 0.286 \times u_2 \times 0.5(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
Penman (1948)	$ET_o = (2.625 + 0.000479u_2)(e_s - e_a)$				✓	✓		✓	✓	✓	
Romanenko (1961)	$ET_o = 0.00006(100 - RH_{mean})(25 + T_{mean})^2$			✓			✓				

Eto: es la evapotranspiración de referencia; elev: elevación de la estación; Δ: pendiente de curvatura de presión; λ: calor latente de vaporación, 2.45 (MJ); γ: constante psicométrica; G: flujo de calor de suelo; Rn: radiación solar neta; u₂: velocidad media del viento; Tmean: temperatura media diaria; Tmax media máxima diaria; Tmin: temperatura media mínima diaria; Ra: radiación extraterrestre; Rs: radiación solar(MJ m⁻² día⁻¹): e⁰(T): Presión de saturación para una temperatura dada; es: presión de vapor real; ea: presión de vapor saturado; (es-ea): déficit de presión de vapor: n: duración real de insolación en un día; N: horas sol; Hrmedia: humedad relativa; Hrmax : humedad relativa máxima; Hrmin: Humedad relativa mínima.

5.2 Cálculo de la evapotranspiración de cultivo (ET_c)

Una vez conocida la ET_o se debe de estimar la evapotranspiración de cultivo y aquí es un ajuste para cada cultivo que se encuentre en la zona de estudio. Dichos ajustes dependen del tipo de cultivo. En la Figura 13 se presenta la metodología general para determinar la evapotranspiración la cual depende de los coeficientes de cultivo.

5.2.1 Determinación de los coeficientes de cultivo (K_c)

El coeficiente único de cultivo integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia (Allen Richard G. et al., 2006). Sin embargo, el coeficiente de cultivo presenta un incremento en la etapa de desarrollo del cultivo hasta su etapa de maduración posteriormente desciende en la etapa de cosecha del cultivo (Allen Richard G. et al., 2006). En las figuras 14 y 15 se presentan los coeficientes y duraciones de algunos cultivos.

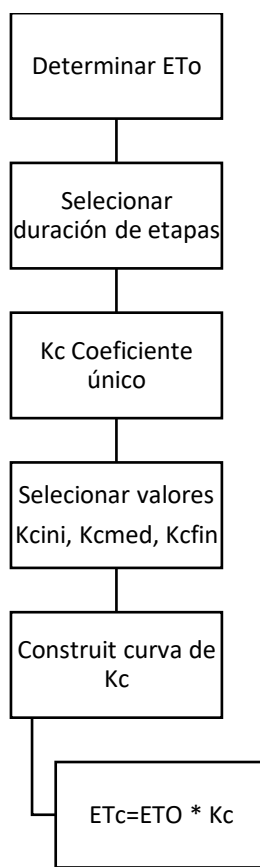


Figura 13.- Metodología para determinación de K_c según la FAO

Cultivo	Inic. (L _{in})	Des. (L _{des})	Med (L _{med})	Final (L _{fin})	Total	Fecha de Siembra	Región
a. Hortalizas Pequeñas							
Brécol (Brócoli)	35	45	40	15	135	Sept.	Calif. Desierto, EU
Repollo	40	60	50	15	165	Sept.	Calif. Desierto, EU
Zanahoria	20	30	50/30	20	100	Oct/Ene.	Clima Árido
	30	40	60	20	150	Feb/Mar.	Mediterráneo
	30	50	90	30	200	Oct.	Calif. Desierto, EU
Coliflor	35	50	40	15	140	Sept.	Calif. Desierto, EU
Apio (Céleri)	25	40	95	20	180	Oct.	(Semi)Árido
	25	40	45	15	125	Abril	Mediterráneo
	30	55	105	20	210	Ene.	(Semi)Árido
Crucíferas ¹	20	30	20	10	80	Abril	Mediterráneo
	25	35	25	10	95	Febrero	Mediterráneo
	30	35	90	40	195	Oct/Nov.	Mediterráneo
Lechuga	20	30	15	10	75	Abril.	Mediterráneo
	30	40	25	10	105	Nov/Ene.	Mediterráneo
	25	35	30	10	100	Oct/Nov.	Región Árida
	35	50	45	10	140	Feb.	Mediterráneo
Cebolla (seca)	15	25	70	40	150	Abril	Mediterráneo
	20	35	110	45	210	Oct; Ene.	Región Árida; Calif.
Cebolla (verde)	25	30	10	5	70	Abril/Mayo	Mediterráneo
	20	45	20	10	95	Octubre	Región Árida
	30	55	55	40	180	Marzo	Calif., EU
Cebolla (semilla)	20	45	165	45	275	Sept.	Calif. Desierto, EU
Espinaca	20	20	15/25	5	60/70	Abr; Sep/Oct	Mediterráneo
	20	30	40	10	100	Noviembre	Región Árida
Rábano	5	10	15	5	35	Mar/Abr.	Medit.; Europa
	10	10	15	5	40	Invierno	Región Árida

Figura 14.- Duración de las etapas de crecimiento para distintos periodos de siembra (Allen Richard G. et al., 2006)

Cultivo	K _{c, in} ¹	K _{c, med}	K _{c, fin}	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
a. Hortalizas Pequeñas				
Brécol (Brócoli)	0,7	1,05	0,95	
Col de Bruselas		1,05	0,95	0,3
Repollo		1,05	0,95	0,4
Zanahoria		1,05	0,95	0,3
Coliflor		1,05	0,95	0,4
Apio (Céleri)		1,05	1,00	0,6
Ajo		1,00	0,70	0,3
Lechuga		1,00	0,95	0,3
Cebolla – seca		1,05	0,75	0,4
– verde		1,00	1,00	0,3
– semilla		1,05	0,80	0,5
Espinaca		1,00	0,95	0,3
Rábano		0,90	0,85	0,3
b. Hortalizas– Familia de la Solanáceas				
Berenjena	0,6	1,15	0,80	
Pimiento Dulce (campana)		1,05 ²	0,90	0,8
Tomate		1,15 ²	0,70–0,90	0,7

Figura 15.- Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo, K_c y alturas medias máximas de las plantas (Allen Richard G. et al., 2006)

5.3 Descripción del Funcionamiento del software utilizado (CropWat)

CROPWAT es una herramienta desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), diseñada para apoyar la planificación y gestión del riego agrícola. Su principal función es estimar las necesidades hídricas de los cultivos, evaluar la eficiencia del uso del agua y determinar los requerimientos de riego y programación óptima en función de las condiciones climáticas, del suelo y de los cultivos.

El programa se basa en los principios metodológicos del Boletín FAO 56 (“Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”), y utiliza la ecuación de Penman-Monteith FAO para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Gracias a su estructura modular y su interfaz accesible, CROPWAT permite integrar datos climáticos, edáficos y agronómicos para ofrecer un diagnóstico completo del balance hídrico en sistemas de riego (Smith Martin, 1992).

El programa está organizado en varios módulos interconectados que facilitan el análisis integral del uso del agua en la agricultura (Figuras 16 y 17):

Módulo Climático. Permite ingresar y procesar datos meteorológicos como temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitación. A partir de esta información se calcula la evapotranspiración de referencia (ET_o), que constituye la base para estimar las necesidades de agua de los cultivos.

Módulo de Cultivos (Crop Data). Contiene información específica de cada cultivo, como el coeficiente de cultivo (K_c), la duración de cada etapa fenológica y la profundidad efectiva de las raíces. Estos parámetros permiten ajustar los cálculos de evapotranspiración del cultivo (ET_c) y estimar los requerimientos hídricos específicos.

Módulo de Suelo (Soil Data). Incluye propiedades físicas del suelo, tales como la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y la profundidad del perfil radicular. Estos datos son esenciales para determinar la capacidad de almacenamiento de agua y calcular la frecuencia óptima de riego.

Módulo de Precipitación Efectiva (Effective Rainfall). Estima la porción de la precipitación total que realmente está disponible para los cultivos. El programa ofrece diferentes métodos de cálculo (FAO, USDA, o fórmulas empíricas) para adaptarse a distintas condiciones climáticas.

Módulo de Balance Hídrico (Crop Water Requirements). Integra la información climática, del suelo y del cultivo para calcular las necesidades netas de riego, determinando cuánto agua debe aplicarse y cuándo, en función del déficit de humedad del suelo.

Módulo de Programación del Riego (Irrigation Scheduling). Permite elaborar calendarios de riego ajustados al ciclo del cultivo, la disponibilidad de agua y la eficiencia del sistema de riego. Este módulo ayuda a optimizar la aplicación del agua y a mejorar la productividad hídrica.

Módulo de Rendimiento (Yield Response to Water). Estima las posibles pérdidas de rendimiento debidas al déficit hídrico durante las distintas fases del cultivo, utilizando los coeficientes de respuesta al agua propuestos por la FAO (Smith Martin, 1992).

Aunque normalmente CROPWAT calcula los RAC y las programaciones para un cultivo, también puede calcular un esquema de suministro de agua, que es básicamente la combinación de los requerimientos de agua de varios cultivos, cada uno con su fecha de siembra individual (patrón de cultivo).

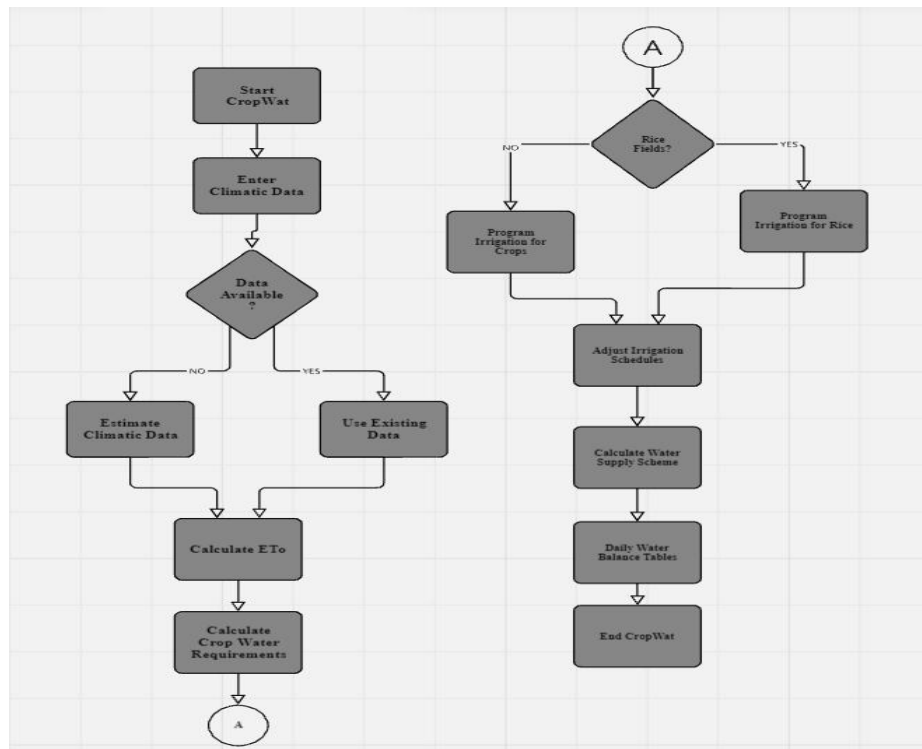


Figura 16.- Metodología del funcionamiento de CropWat



Figura 17.- Estructura de CropWat

Nótese que los módulos Clima/ETo y Precipitación se usan no sólo para la introducción de datos, sino que también calculan otros datos, como Radiación/ETo y precipitación efectiva respectivamente (Smith Martin, 1992).

Los módulos de cálculo de CROPWAT son:

- ~ RAC - para el cálculo de los Requerimientos de Agua de los Cultivos
- ~ Programación (cultivos no inundados o arroz) - para el cálculo de los calendarios de riego Esquema para el cálculo del régimen de la oferta de agua sobre la base de un patrón de cultivo.

Los componentes del software se presentan a continuación:

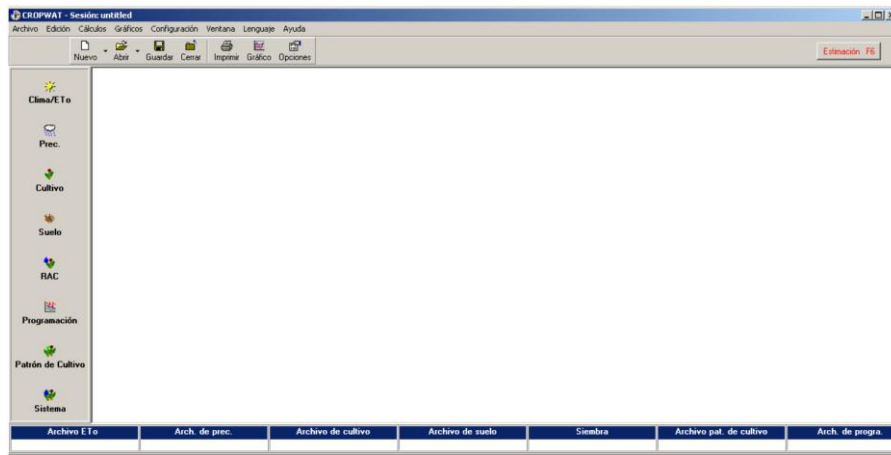


Figura 18.- Ventana principal al momento de iniciar CropWat

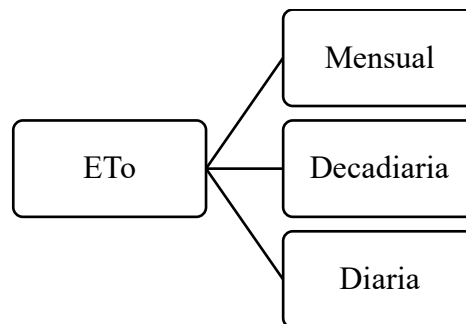


Figura 19.- Diferentes formas de datos de estrada para ETo

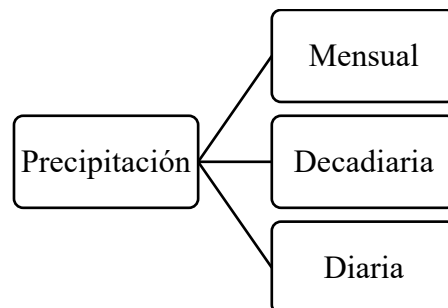


Figura 20.- Diferentes estradas para la precipitación

5.3.1 Precipitación Efectiva

El módulo de precipitación efectiva (Effective Rainfall) en el programa CROPWAT tiene como propósito estimar la fracción de la precipitación total que realmente está disponible para el uso de los cultivos, es decir, la parte de la lluvia que contribuye a satisfacer las necesidades hídricas, después de descontar las pérdidas por escorrentía superficial, percolación profunda y evaporación inmediata.

En los estudios de balance hídrico agrícola, la precipitación total registrada no puede asumirse como plenamente aprovechable, ya que factores como la intensidad de la lluvia, las características físicas del suelo, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal influyen en la eficiencia con que el agua infiltrada puede ser retenida en la zona radicular. Por esta razón, la estimación de la precipitación efectiva (P_e) constituye un componente esencial para determinar las necesidades netas de riego en el marco de la metodología propuesta por la FAO (Allen et al., 1998).

En CROPWAT, el módulo de precipitación efectiva permite al usuario seleccionar o calcular el valor de P_e mediante diferentes enfoques, según la disponibilidad de datos y el nivel de precisión requerido. Los métodos disponibles pueden agruparse en tres categorías principales: método empírico FAO, método USDA Soil Conservation Service (SCS) y método del porcentaje fijo. De estos 3 métodos el método de la USDA proporciona mejores resultados (Smith Martin, 1992).

El método desarrollado por el United States Department of Agriculture (USDA-SCS) propone una relación empírica que considera el efecto de la intensidad y frecuencia de la lluvia, así como las condiciones de drenaje del suelo. Este método utiliza una fórmula basada en la precipitación total (P), que establece una eficiencia decreciente de la precipitación a medida que aumenta su volumen:

Valores mensuales de precipitación:

$$P_{ef} = P_{mensual} * \frac{125 - 0.2 * P_{mensual}}{125} \quad \leftrightarrow \quad P_{mensual} \leq 250mm$$

$$P_{ef} = 125 + 0.1 * P_{mensual} \quad \leftrightarrow \quad P_{mensual} > 250mm$$

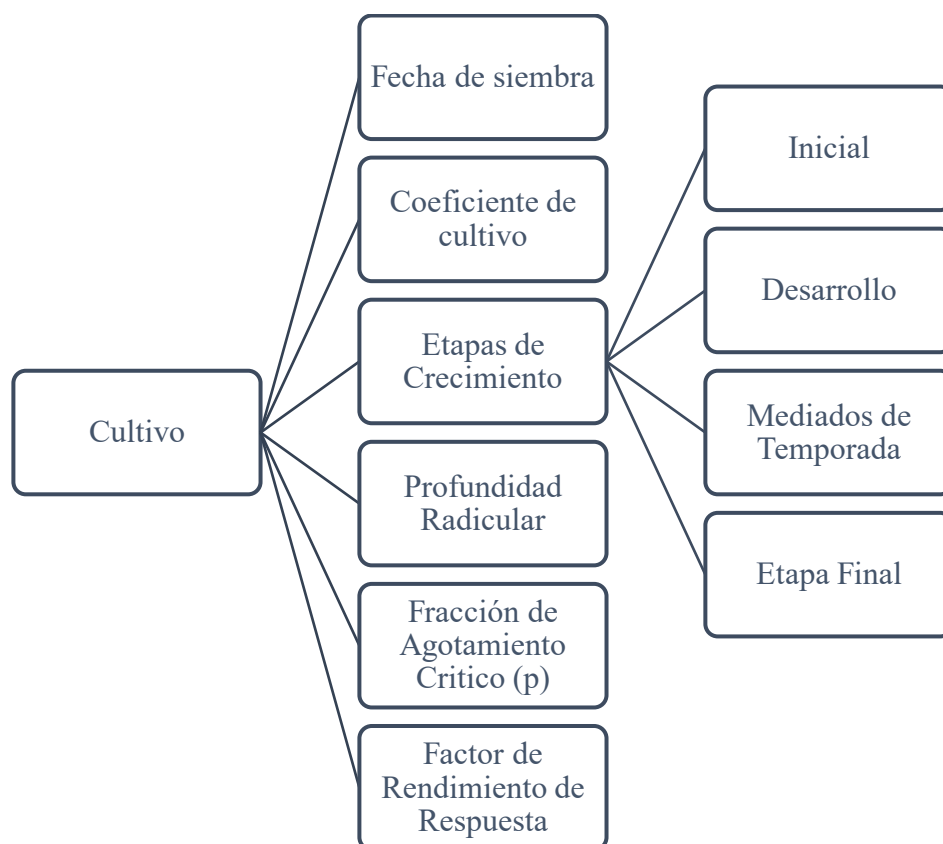


Figura 21.- Requerimientos de cultivo

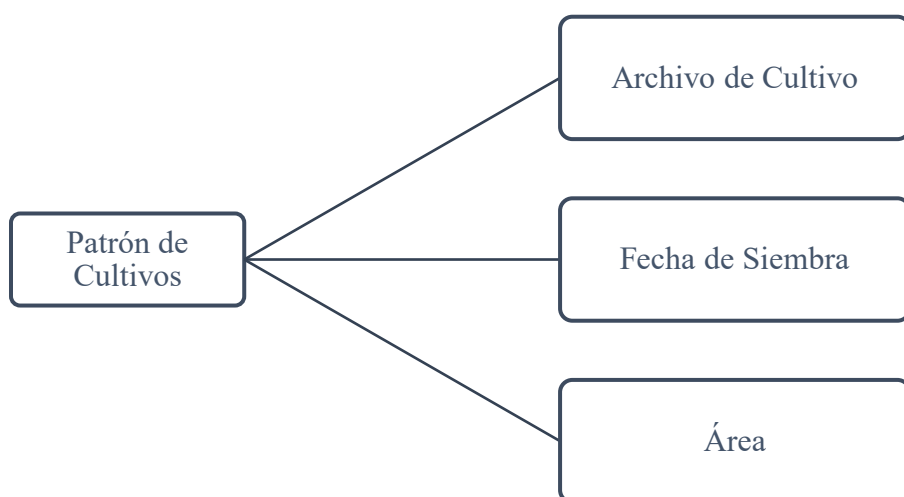


Figura 22.- Requerimiento de información de ciclos de cultivo de la zona de estudio

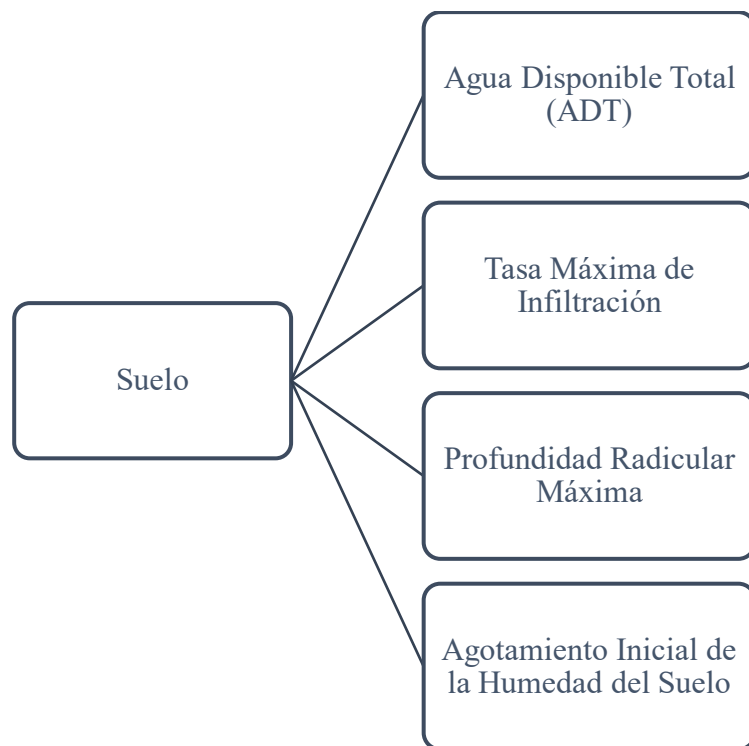


Figura 23.- Requerimientos del suelo

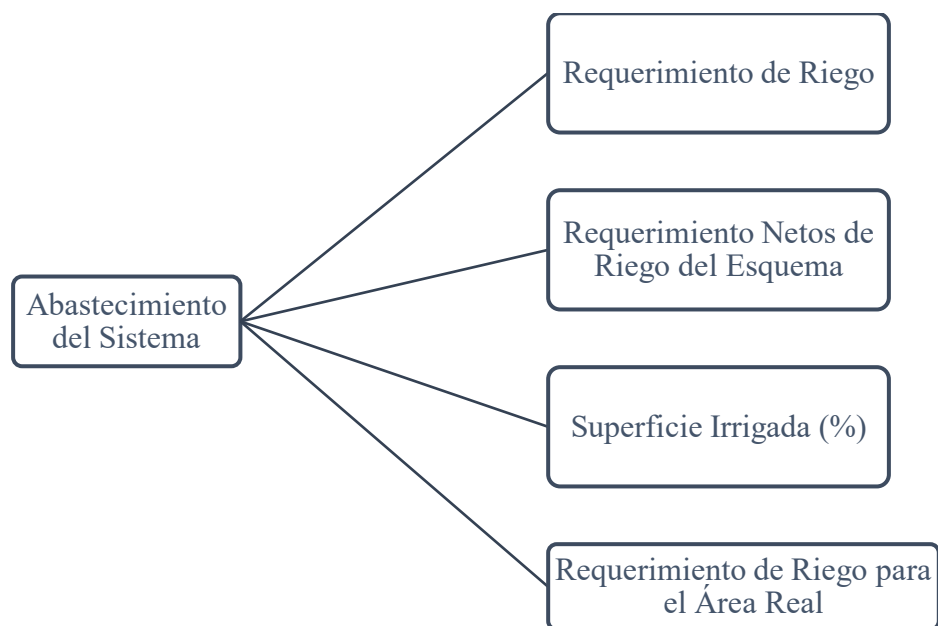


Figura 24.- Programación del mejor ajuste de abastecimiento de riego para la zona de estudio

5.4 Descripción del software EPANET

El software EPANET es una herramienta computacional desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA) con el propósito de modelar y analizar el comportamiento hidráulico y de calidad del agua en redes de distribución de abastecimiento. Su aplicación permite simular, en régimen permanente o no permanente, el flujo de agua, la presión en los nodos, el estado de funcionamiento de bombas y válvulas, así como la evolución de la concentración de sustancias químicas o trazadores dentro del sistema.(Rossman et al., 2000) .

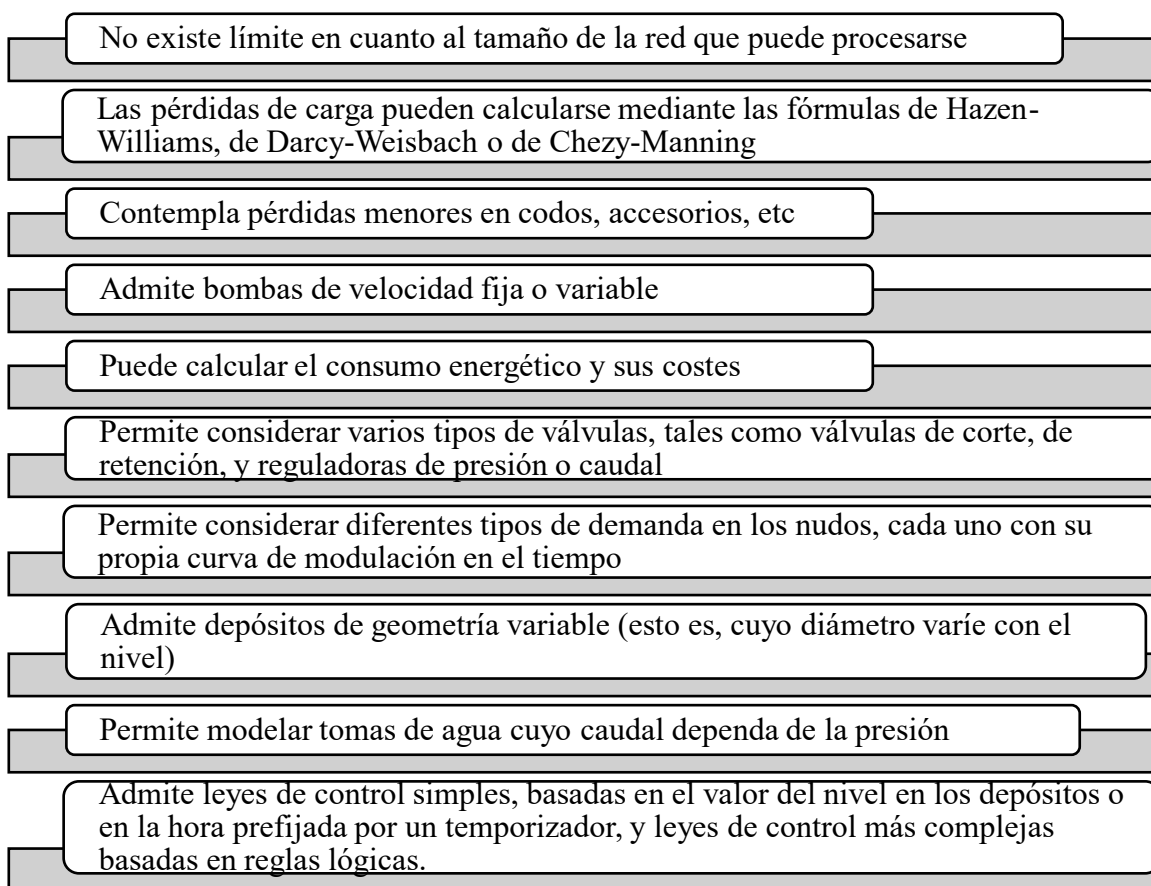


Figura 25.- Características principales del software EPANET- Fuente: Elaboración propia.

EPANET se ha consolidado como uno de los programas más utilizados a nivel mundial en el ámbito del diseño, evaluación y gestión de sistemas de agua potable, debido a su precisión, flexibilidad y carácter gratuito. Su estructura permite representar de forma detallada los componentes de una red de distribución como tuberías, depósitos, tanques, bombas, válvulas y nodos de consumo, lo que facilita el análisis integral del comportamiento hidráulico y la toma de decisiones para mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema.

El software está basado en un modelo de simulación de tipo determinístico y dinámico, capaz de calcular los caudales, presiones y concentraciones de contaminantes en intervalos de tiempo definidos por el usuario. De esta manera, EPANET proporciona una herramienta poderosa tanto para el diseño de nuevas infraestructuras hidráulicas, como para el diagnóstico y optimización de sistemas existentes.

5.4.1 Componentes de EPANET

EPANET presenta una interfaz gráfica intuitiva que permite al usuario construir y visualizar la red mediante un entorno de trabajo de tipo GIS simplificado, donde cada elemento se representa de forma simbólica. Entre sus principales características técnicas se destacan las siguientes:

Simulación hidráulica completa. EPANET realiza el análisis hidráulico de la red resolviendo de manera simultánea las ecuaciones de continuidad y energía en todos los nodos y conducciones, determinando los caudales, presiones y niveles piezométricos del sistema.

Análisis de calidad del agua: El programa permite simular el transporte y la mezcla de sustancias químicas (por ejemplo, cloro residual o contaminantes) a lo largo de la red, evaluando la concentración de trazadores y el tiempo de residencia del agua en distintos puntos del sistema.

Simulación en régimen dinámico. EPANET puede realizar simulaciones a lo largo del tiempo, considerando variaciones horarias o diarias en la demanda de consumo, así como en la operación de bombas y válvulas, lo que permite modelar condiciones reales de funcionamiento.

Modelación de componentes hidráulicos. El software incluye una amplia variedad de elementos de red, tales como tuberías, bombas centrífugas, válvulas de control, tanques de almacenamiento y nodos de demanda, los cuales pueden parametrizarse según las características físicas y operativas del sistema.

Resultados gráficos y numéricos. Los resultados del análisis pueden visualizarse mediante tablas, gráficas o mapas temáticos de presión, caudal y concentración, lo que facilita la interpretación y la comunicación de los resultados del modelado.

Compatibilidad y extensibilidad. EPANET se distribuye como software de código abierto, lo que permite su integración con otros entornos de programación y sistemas de información geográfica (GIS), además de servir como base para el desarrollo de aplicaciones especializadas en gestión de redes hidráulicas.

EPANET está estructurado en módulos funcionales (Figura 26) que permiten abordar las diferentes fases del modelado hidráulico y de calidad del agua:

Módulo de entrada de datos. En este módulo se definen las características físicas y operativas de los componentes de la red, incluyendo la longitud, diámetro y rugosidad de las tuberías; las cotas y demandas de los nodos; las curvas de bombeo; los volúmenes de los tanques; y las condiciones de operación de válvulas y reservorios.

Módulo de simulación hidráulica. Este módulo resuelve las ecuaciones de flujo y energía aplicadas a cada elemento del sistema. Mediante un procedimiento iterativo basado en el método de Newton-Raphson, EPANET determina las presiones en los nodos, los caudales en las tuberías y los niveles en los tanques, garantizando el cumplimiento de las condiciones de continuidad y conservación de la energía.

Módulo de control y operación. EPANET incorpora un sistema de control que permite programar la operación de bombas y válvulas de acuerdo con niveles de tanque, presiones, tiempos o condiciones de caudal. Esto posibilita la simulación de estrategias operativas reales y el análisis de alternativas de manejo energético y de presión.

Módulo de calidad del agua. Permite modelar el transporte, mezcla y decaimiento de sustancias químicas a lo largo de la red. El programa considera procesos como la advección, dispersión, reacción en las paredes de las tuberías y degradación en el volumen del agua. Este

módulo es de gran utilidad para la evaluación de la calidad del agua distribuida y para el diseño de estrategias de desinfección y monitoreo.

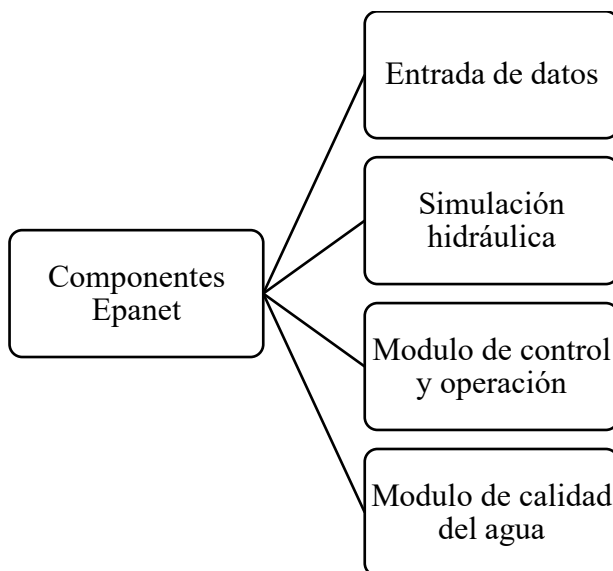


Figura 26.- Estructura del software EPANET. Fuente Elaboración propia.

5.5 Construcción del modelo de simulación del funcionamiento hidráulico

La construcción y simulación de un modelo hidráulico constituye una herramienta fundamental en la planificación, diseño y gestión de los sistemas de distribución de agua potable. A través de este proceso, es posible representar de forma matemática y gráfica el comportamiento físico del sistema, permitiendo analizar variables como el caudal, la presión, las pérdidas de carga, los niveles de servicio y la eficiencia operativa.

El desarrollo de un modelo hidráulico tiene como propósito principal reproducir el funcionamiento real de la red de distribución, de modo que pueda ser utilizada para evaluar su desempeño, identificar deficiencias y probar alternativas de mejora sin necesidad de intervenir físicamente en el sistema.

El proceso de construcción y simulación comprende diversas etapas secuenciales que abarcan la recolección de datos, la digitalización del sistema, la definición de parámetros hidráulicos, la calibración del modelo y, finalmente, la simulación bajo distintos escenarios operativos.

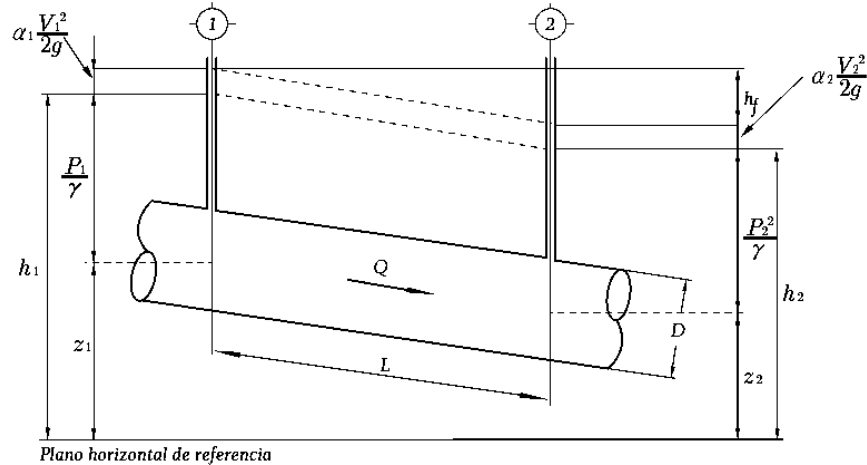


Figura 27.- Conceptualización del funcionamiento de EPANET. Fuente Elaboración propia.

En la 4 se muestra una tubería de longitud L funcionando a presión. Al aplicar la ecuación de la conservación de la energía entre dos secciones cualesquiera 1 y 2, se tiene:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

donde z , P y V son la elevación respecto a un plano horizontal de referencia, la presión y la velocidad media, respectivamente, en el punto del centro de la sección; α es el coeficiente de Coriolis (con un valor cercano a 1) γ y g son el peso específico del agua y la aceleración de la gravedad; h_f es la pérdida de carga debido al rozamiento en las paredes del conducto. Los subíndices 1 y 2 indican de que sección se trata.

Esta expresión se puede presentar de la siguiente forma si agrupamos la carga de posición y la carga de presiones en términos de h , para cada sección.

$$h_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

Para una tubería con área de sección transversal constante ($A_1 = A_2$). Así, al aplicar el principio de continuidad $A_1 V_1 = A_2 V_2$, resulta que $V_1 = V_2 = V$. Si se acepta que $a_1 = a_2 = 1$, la ecuación resulta:

$$h_f = h_1 - h_2$$

La pérdida de carga en tuberías a presión se calcula a través de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{LV^2}{D2g}$$

Donde:

f = Coeficiente de perdidas (adimensional)

L = Longitud de la tubería, en m

D = diámetro de la tubería, en m

V = velocidad media del flujo en m/s

g = aceleración gravitacional, en m/s²

h_f = pérdida de energía por fricción, en m

El coeficiente de pérdidas está en función de la rugosidad de las paredes de la tubería, sin embargo, ésta no es homogénea a lo largo de la conducción, por lo que para fines del diseño se establece un valor medio equivalente. La rugosidad absoluta de diversos materiales, se presentan en la referencia siguiente: (Sotelo Gilberto, 2002).

6 Resultados

Al desarrollar un sistema de riego presurizado no solamente existe un ahorro significativo del recurso hídrico, sino que a la vez es modernizar el riego convencional adaptándose a nuevas demandas (FAO | *Land & Water*, 2023). Al tener un sistema presurizado las únicas pérdidas que puede haber son por fricción y accesorios (Lapo Pauta et al., 2020), a diferencia de lo encontrado en el DR en el módulo 1 que cuenta con sistema de canales a cielo abierto, la cual es una infraestructura con demasiado uso continuo y que lamentablemente ha sufrido alteraciones por parte de los usuarios y el mismo paso del tiempo, lo que genera una pérdida realmente significativa del recurso hídrico; ya sea por evaporación, filtración o incluso tomas clandestinas de fácil acceso (FAO, 2023).

La precipitación y evapotranspiración son dos fenómenos que deben de ocurrir para permitir sin interrupciones el ciclo hidrológico de manera natural. Como se sabe la precipitación es la principal fuente de agua para el suelo y las plantas. La lluvia y otras formas de precipitación (nieve, granizo) suministran el agua que se infiltra en el suelo, recarga los acuíferos y abastece los cuerpos de agua superficiales como ríos y lagos (Pratap & Markonis, 2022)

Por otro lado, la evapotranspiración es el proceso por el cual el agua se transfiere desde la superficie terrestre a la atmósfera. Incluye la evaporación y la transpiración (Allen R. et al., 2006).

La evapotranspiración es un componente crítico del balance hídrico, que determina cuánta agua permanece en el suelo y está disponible para las plantas. Cuando la precipitación es mayor que la evapotranspiración, se produce una acumulación de agua en el suelo, lo que puede llevar a la recarga de acuíferos y el flujo hacia cuerpos de agua superficiales. Cuando la evapotranspiración es mayor que la precipitación, el suelo puede secarse, lo que afecta negativamente el crecimiento de las plantas y puede llevar a situaciones de déficit hídrico o sequía (Clemenzi et al., 2023).

En la agricultura, conocer la relación entre precipitación y evapotranspiración es crucial para el manejo del riego. La evapotranspiración es utilizada para calcular la cantidad de agua que deben recibir los cultivos a través del riego (ET_c , Evapotranspiración del cultivo), ajustando la ET de referencia (ET_o) con coeficientes de cultivo (K_c) (Allen R. et al., 2006).

Comprender esta relación ayuda en la planificación y gestión sostenible del agua, especialmente en áreas propensas a sequías. Optimizar el uso del agua en función de la evapotranspiración y la precipitación puede ayudar a conservar recursos hídricos y mejorar la resiliencia ante el cambio climático (Hakala et al., 2020a)

Todo el plan de riego se basa de acuerdo a la Ley de Aguas Nacionales, de acuerdo a los artículos 67 – 68 los cuales mencionan lo siguiente:

Las razones de cambio de cultivos pueden ser múltiples, pero se destacará la producción agrícola y del sector que se encarga en observar la producción general económica (CONAGUA, 2019)

Los cambios de cultivos se deben a diferentes demandas, por ejemplo, la nueva tendencia en un cultivo específico como son las huertas de aguacate, las berrys o incluso los magueyes. Se ha analizado que el cambio climático ha empezado a obligar hacer cambio de cultivos ya que por alteraciones los cultivos ya no se pueden adaptar por diversas razones, las cuales pueden ser: estrés hídrico, temperaturas elevadas, cambio de uso de suelo y plagas (Zhao et al., 2015), (Hakala et al., 2020b)

6.1 Caracterización de la zona de estudio

En la caracterización de la zona de estudio que es el Módulo I, se encontraron diferentes cultivos, entre ellos cultivos de forraje y cultivos de granos. Actualmente se tienen datos de los diferentes cultivos que son los siguientes: avena forrajera, garbanzo forrajero, maíz, sorgo, alfalfa, frutales asociados, cebada forrajera, janamargo, trigo, chile, cártamo, frijol, pastos y forrajes. En las que se muestran los cultivos con más valores documentados dentro la serie de datos registrada, cabe destacar que estos datos fueron obtenidos gracias a las oficinas del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, no se cuenta con la totalidad de datos debido a diferentes cambios administrativos o solamente existen temporadas donde los usuarios no hayan sembrado el mismo cultivo durante años consecutivos. En modo de resumen el módulo I cuenta con un total de 272 usuarios registrados, una superficie física de 1, 510 ha de la cual solamente 914.62 ha han sido de superficie para riego (Figura 29). Se encontraron 2 estaciones climáticas con información disponible de las variables climáticas a escala diaria para estimar la evapotranspiración diaria por el método de la FAO (Figura 30).

Tabla 18.- Volúmenes brutos y netos por año agrícola para el DR 020 Morelia-Queréndaro.,

Año Agrícola	Volúmenes entregados	
	Volumen (hm ³)	
	Neto	Bruto
2007-2008	3.52	5.90
2008-2009	2.48	4.74
2009-2010	1.71	2.67
2010-2011	2.34	4.25
2011-2012	54.28	92.31
2012-2013	3.17	3.17
2013-2014	1.75	4.04
2014-2015	34.28	67.21
2015-2016	1.88	3.69
2016-2017	0.00	0.00
2017-2018	55.15	107.17
2018-2019	0.00	0.00
2019-2020	0.00	0.00
2020-2021	39.76	65.56
2021-2022	55.18	91.82

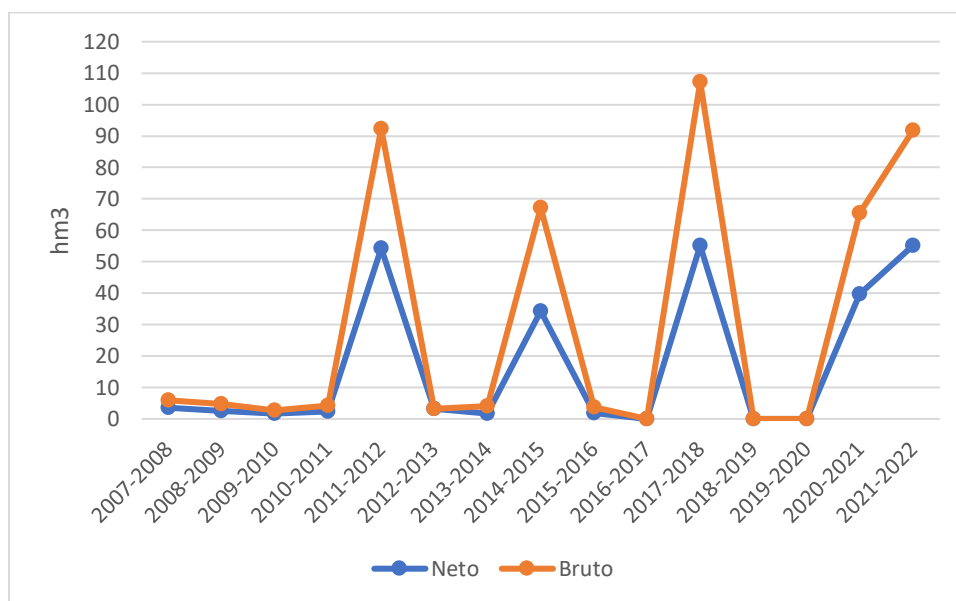


Figura 28.- Volúmenes bruto y netos entregados al Distrito de Riego 020 Morelia Queréndaro.

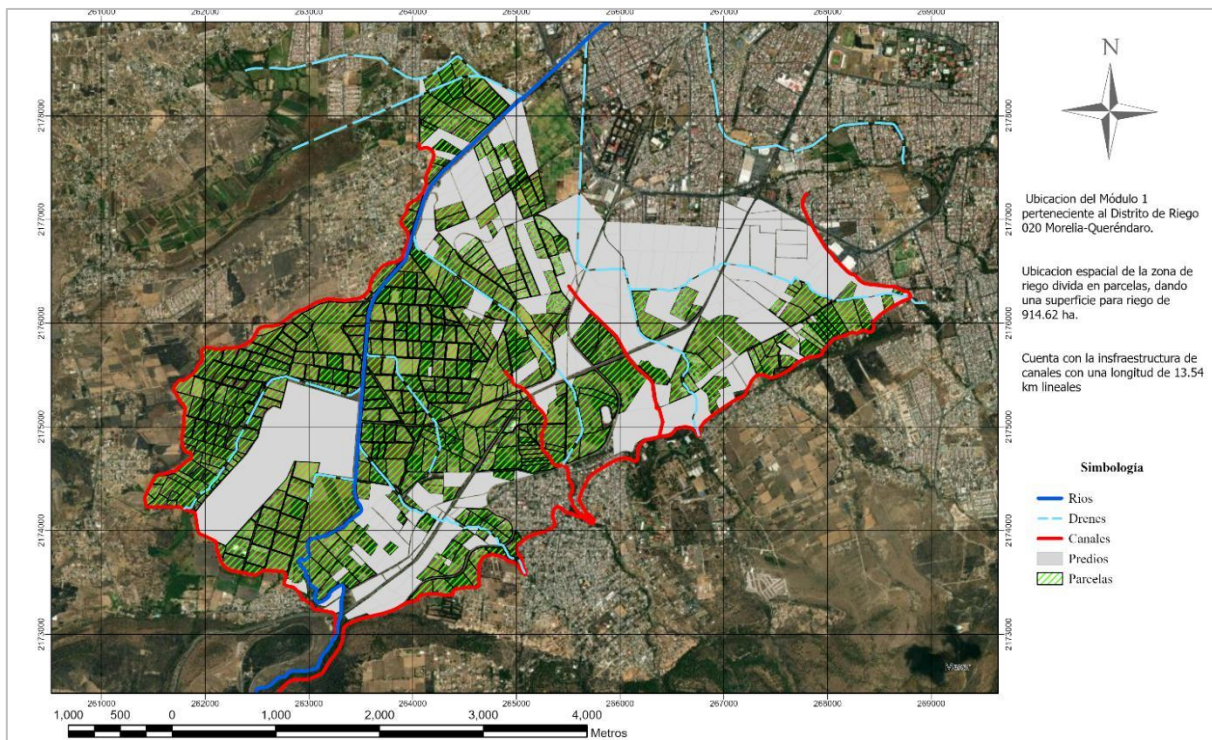


Figura 29.- Modulo 1 DR 020 Morelia-Queréndaro.

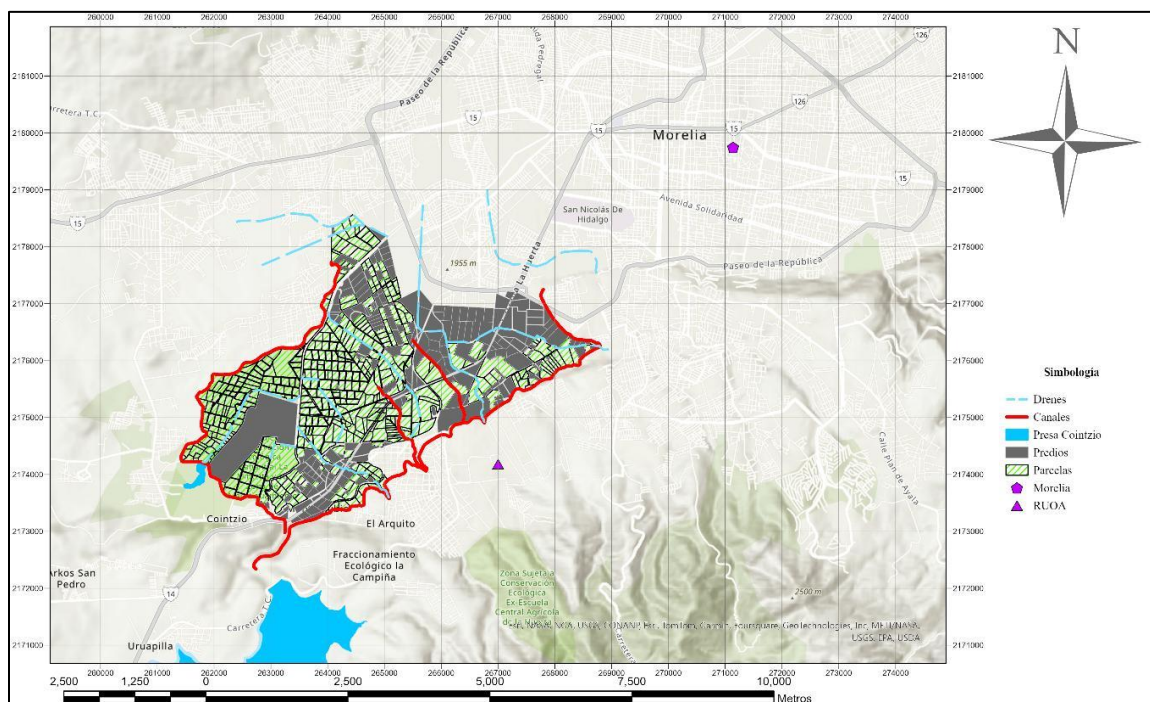


Figura 30.- Estaciones climáticas cercanas al Modulo1 del DR 020 Morelia-Queréndaro.

Para este estudio se optó por tomar datos de una Estación Meteorológica Automática (EMA) ya que al revisar datos cuenta con un almacén de datos diarios recientes a diferencia de demás estaciones que cuentan con más datos, pero lamentablemente no con años “actuales” esto es porque la ETo que se pueda calcular depende mucho de las variables climáticas más recientes y como bien se ha observado existe un cambio climático que afecta a estas estas mismas (Tabla 19).

Tabla 19.- Variables climáticas recopiladas para las 2 estaciones en estudio.

Datos de Destaciones				Variables Climaticas medias anauales						
Nombre	Latitud	Longitud	Periodo	T mean (C°)	T max (C°)	T min (C°)	RH mean (%)	RH max (%)	RH min (%)	U (m/s)
Morelia, Michoacán	19.72138	-101.18277	2010-2022	18.79	27.97	11.40	66.87	89.96	39.13	1.06
Red Universitaria de Observatorios Atmosfericos (RUOA)	19.6493	-101.222	2016-2022	17.40	23.33	11.58	61.23	83.45	35.37	1.70

La zona de estudio en el apartado de la caracterización se ubicarán la red de conducción y suministro que muchas veces por medio de canales suele ser la misma, en este apartado se analizará si la actual red tiene condiciones de seguir funcionando o si es necesario que pueda ser modificada de manera estratégica para que el nuevo sistema de riego pueda funcionar de manera óptima.

6.2 Resultados comparativos de la FAO Penman-Monteith con respecto a métodos alternativos

Al considerarse el método de la FAO como el mejor para calcular la evapotranspiración de referencia (ETo) en cualquier zona del mundo siempre y cuando disponibles todas las variables climáticas será el de mejor ajuste, no siempre es así, como es el caso de Morelia que la estación utilizada no contaba con todas las variables que necesita el método de la FAO, se pueden estimar pero a veces los proyectos necesitan eficiencia en tiempo y si existen demás métodos debe de existir alguno que sea lo más aproximado a los valores reales (comparados con FAO) que coincidan con las variables existentes en las estaciones de la zona de estudio. continuación, las se muestran los distintos métodos en correlación con el método de la FAO sin tener una recalibración regional.

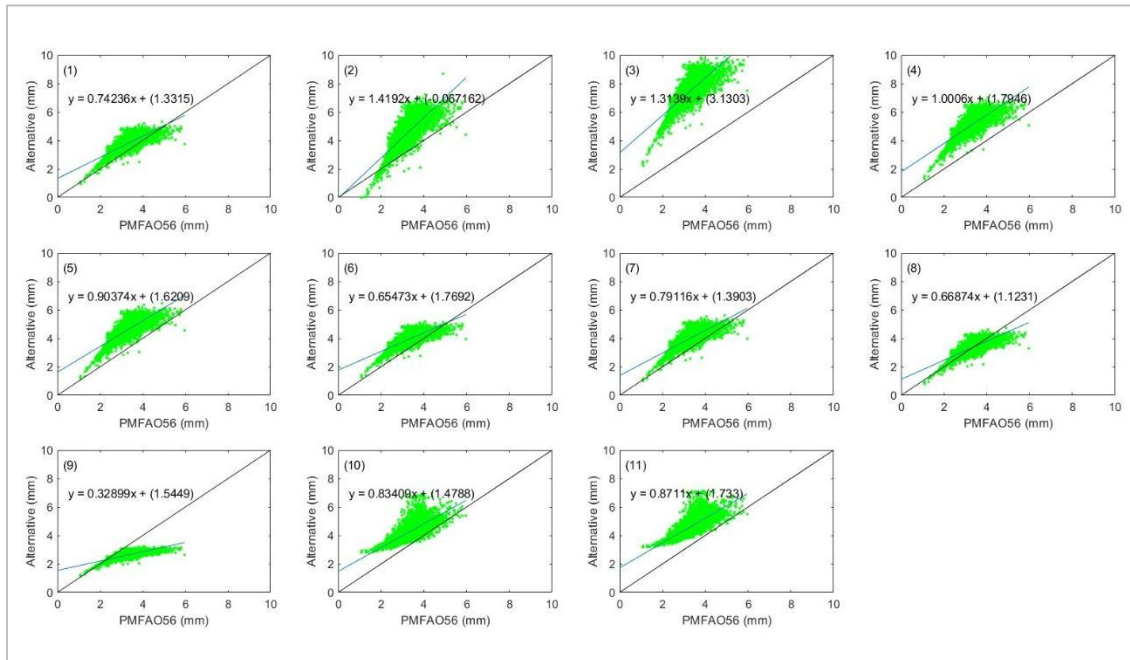


Figura 31.- Sin correlacion metodos de temperatura

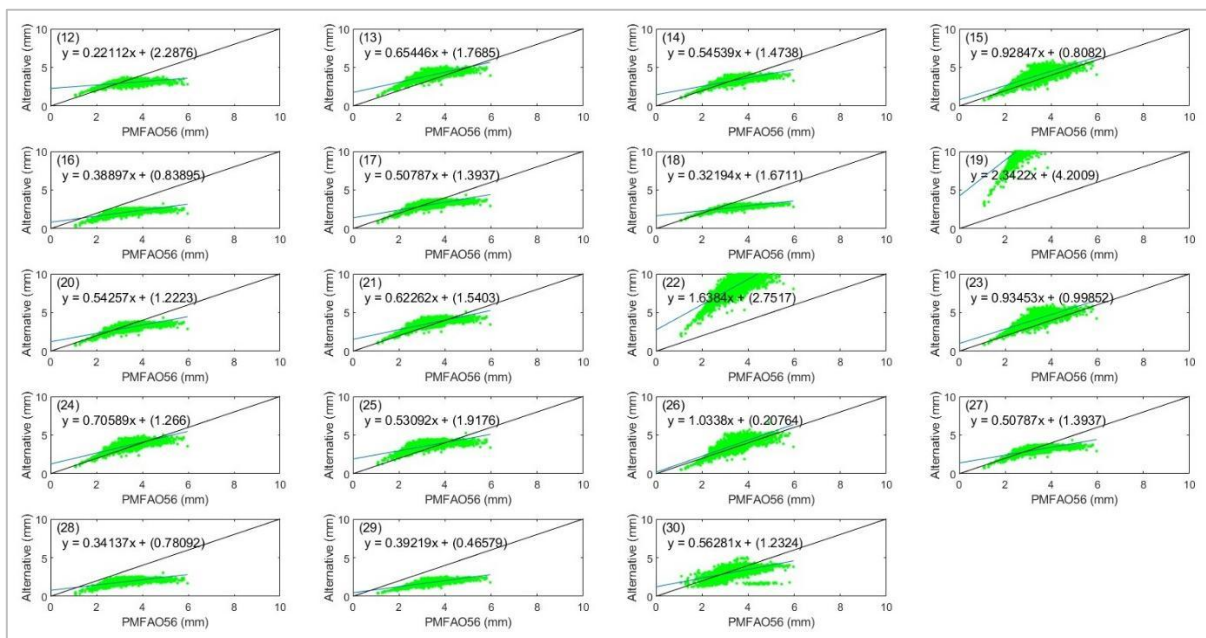


Figura 32.- Sin correlación métodos de radiación

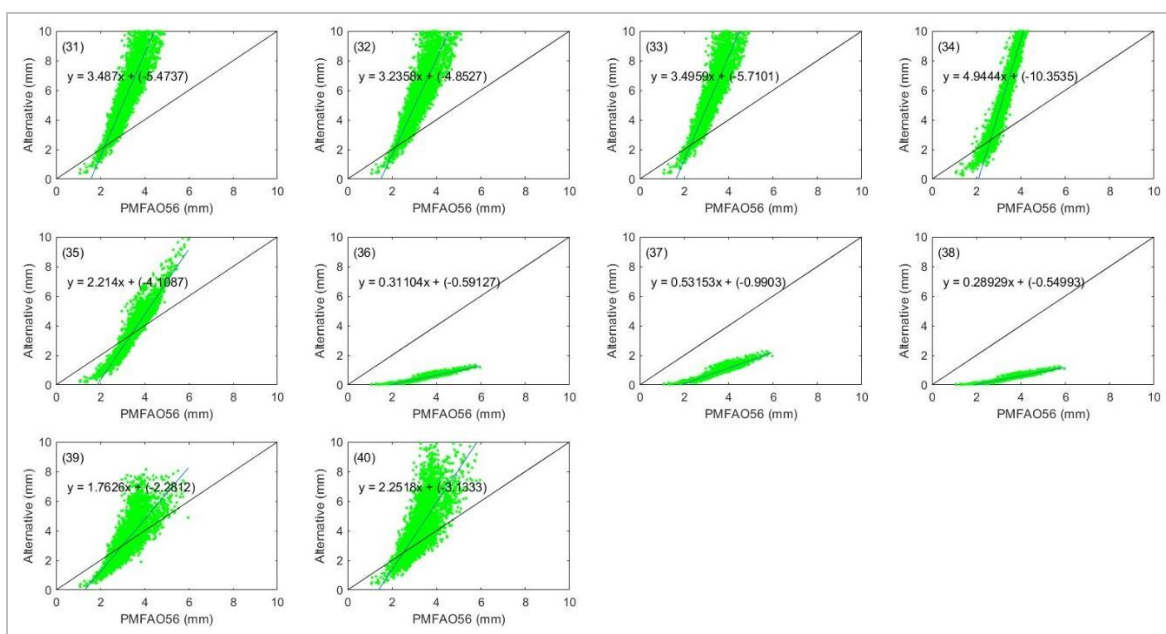


Figura 33.- Sin correlación métodos de trasferencia de masa

Tabla 20.- Análisis estadístico de los diferentes métodos de ETo aplicados a la estación
Morelia

Metodo basado en temperatura	Error en la media (mm/día)	Error en la desviación estándar (mm/día)	Coefficiente de correlación (adimensional)	RMSE (adimensional)	MAE (adimensional)	PE
PMFAO56	0	0	1	0	0	0
Hargreaves	-0.0003	-0.1350	0.8130	0.4238	0.3256	0.0001
Baier Robertson	0.0000	-0.1411	0.8078	0.4326	0.3366	0.0000
Trajovic	-0.0005	-0.1356	0.8116	0.4256	0.3243	0.0001
Tabari Tale	-0.0003	-0.1350	0.8130	0.4238	0.3256	0.0001
Tabari Tale2	-0.0003	-0.1350	0.8130	0.4238	0.3256	0.0001
Droogers Allen	-0.0006	-0.1354	0.8113	0.4257	0.3244	0.0002
Droogers Allen2	-0.0003	-0.1349	0.8131	0.4236	0.3250	0.0001
Berti	-0.0003	-0.1352	0.8129	0.4240	0.3265	0.0001
Dorji	-0.0011	-0.1343	0.8102	0.4263	0.3247	0.0003
Ahooghalandari	0.0000	-0.1962	0.7514	0.5206	0.3678	0.0000
Ahooghalandari2	0.0000	-0.1792	0.7679	0.4945	0.3539	0.0000
Metodo basado en radiación solar	Error en la media (mm/día)	Error en la desviación estándar (mm/día)	Coefficiente de correlación (adimensional)	RMSE (adimensional)	MAE (adimensional)	PE
PMFAO56	0	0	1	0	0	0
Priestley	-0.0136	-0.4542	0.5300	0.8888	0.6947	4.27E-03
Hargreaves1	-0.0006	-0.1354	0.8113	0.4257	0.3244	1.79E-04
Hargreaves2	-0.0006	-0.1354	0.8113	0.4257	0.3244	1.79E-04
CaprioT	0.0000	-0.1626	0.7846	0.4684	0.3520	7.60E-06
Imark1	-0.0013	-0.2196	0.7244	0.5600	0.4552	4.10E-04
Imark2	-0.0012	-0.1641	0.7778	0.4758	0.3791	3.85E-04
Imark3	-0.0028	-0.1496	0.7862	0.4589	0.3471	8.83E-04
Ravazani	-0.0003	-0.1350	0.8130	0.4238	0.3256	1.02E-04
Makk	-0.0007	-0.1530	0.7919	0.4555	0.3604	2.05E-04
Hansen	-0.0007	-0.1530	0.7919	0.4555	0.3604	2.05E-04
Hargreaves3	-0.0003	-0.1352	0.8129	0.4240	0.3265	9.32E-05
Jensen Haise	-0.0001	-0.1518	0.7958	0.4509	0.3395	2.30E-05
Harves 4	-0.0003	-0.1350	0.8130	0.4238	0.3256	1.02E-04
Abtew 1	-0.0014	-0.2491	0.6988	0.6022	0.4922	4.29E-04
Abtew 2	0.0000	-0.1367	0.8126	0.4252	0.3279	8.37E-16
Tabaritalae	-0.0012	-0.1641	0.7778	0.4758	0.3791	3.85E-04
Tabaritalae_2	-0.0017	-0.3077	0.6523	0.6826	0.5609	5.29E-04
OUTDIN	-0.0001	-0.1465	0.8013	0.4423	0.3337	3.45E-05
TURC	0.0000	-0.4777	0.5538	0.8913	0.6669	4.04E-06
Metodo basado entrasferencia de masa	Error en la media (mm/día)	Error en la desviación estándar (mm/día)	Coefficiente de correlación (adimensional)	RMSE (adimensional)	MAE (adimensional)	PE
PMFAO56	0	0	1	0	0	0
Dalton	0.0000	-0.0729	0.8905	0.3029	0.2155	1.39E-16
Meyer	0.0000	-0.0889	0.8697	0.3365	0.2406	4.18E-16
Rohnwer	0.0000	-0.0602	0.9078	0.2739	0.1941	1.39E-16
Albrecht	0.0000	-0.0252	0.9592	0.1748	0.1251	4.18E-16
WMO	0.0000	-0.0301	0.9516	0.1914	0.1354	6.97E-16
Trabert	0.0000	-0.0279	0.9551	0.1840	0.1293	4.18E-16
Brockamp Wenner	0.0000	-0.0308	0.9506	0.1936	0.1355	0.00E+00
Mahringer	0.0000	-0.0279	0.9551	0.1840	0.1293	2.79E-16
Penman	0.0000	-0.1459	0.8025	0.4408	0.3189	5.58E-16
Romanenko	0.0000	-0.1955	0.7521	0.5196	0.3687	4.18E-16

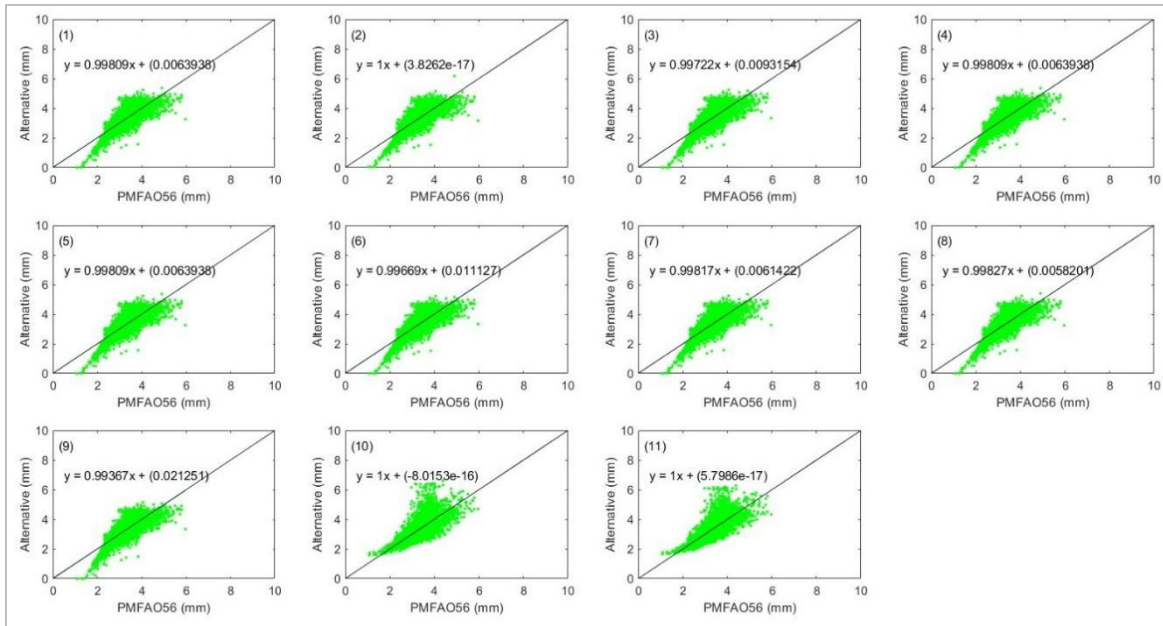


Figura 34.- Con correlación temperatura

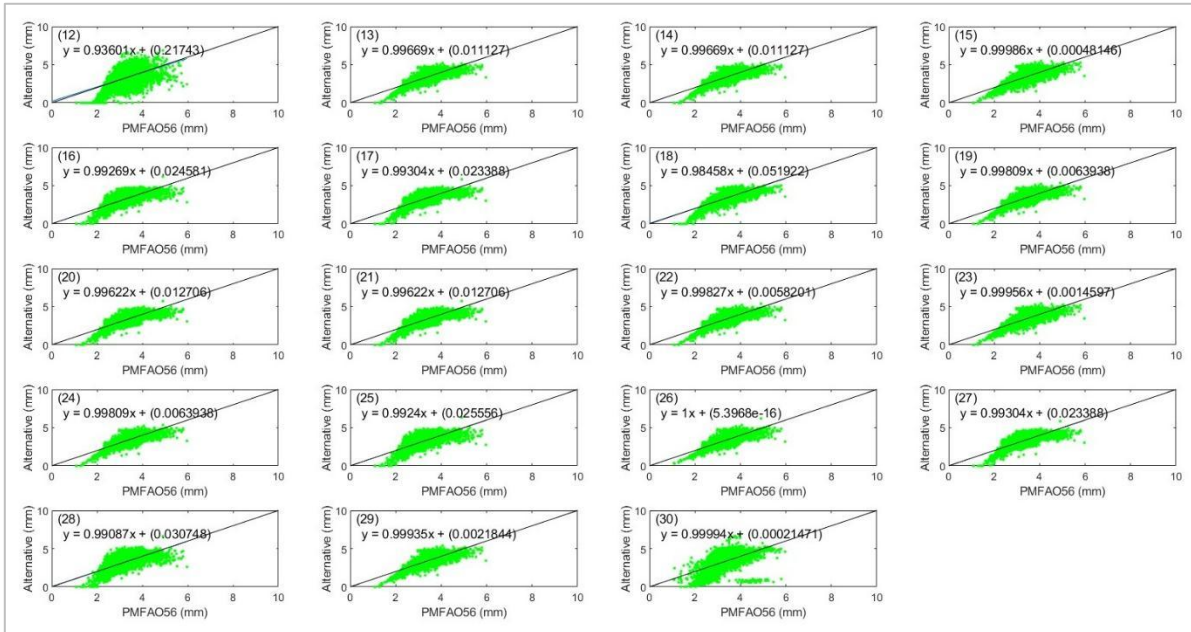


Figura 35.- Con correlación radiación

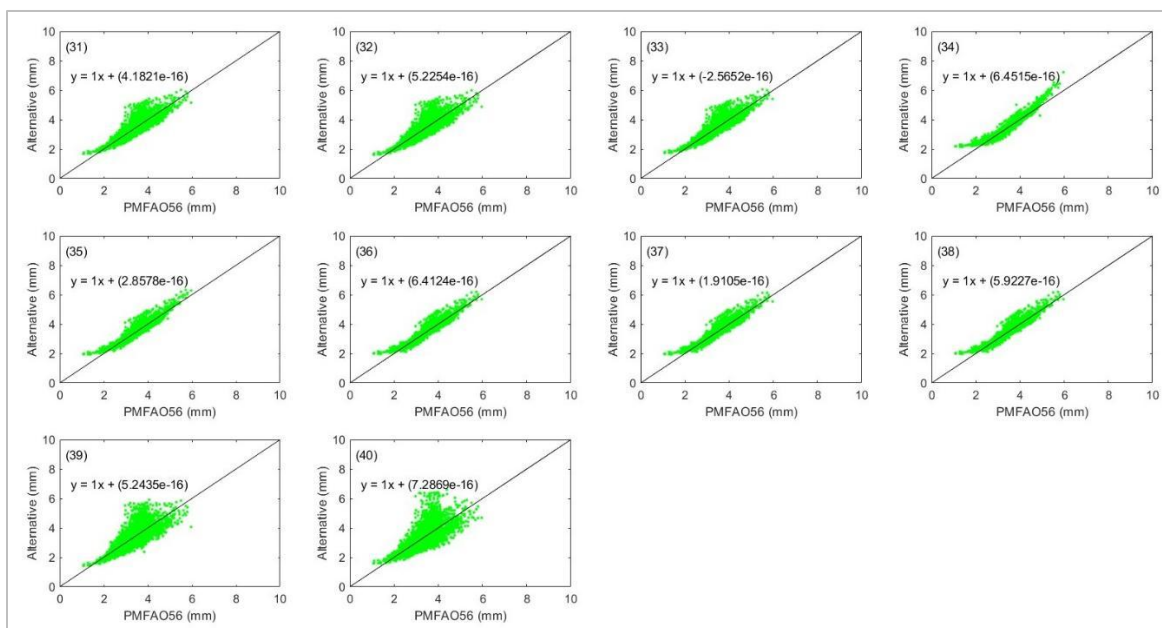


Figura 36.- Con correlación transferencia de masa

6.3 Obtención de la evapotranspiración de cultivo

Para la determinación de la evapotranspiración se utilizaron los coeficiente de cultivo para cada uno de los cultivos que se encuentran en el módulo I se utilizaron las guías que maneja la FAO en su libro oficial de riego y drenaje (PMFAO56) las cuales mencionan los distintos Kcs y los tiempos de crecimiento de distintos cultivos alrededor del mundo, actualmente se encuentran ahí los cultivos del distrito de riego, por otro lado, manejan una metodología definitiva para la determinación del Kc.

En resultado a todo esto se determinaron las curvas de cultivo de los cultivos del módulo I, estos se presentan en las Figuras 37 a 45. El cultivo con los mayores coeficientes de desarrollo es el maíz el cual abarca el 40% de la totalidad de los cultivos presentes en el modulo I.

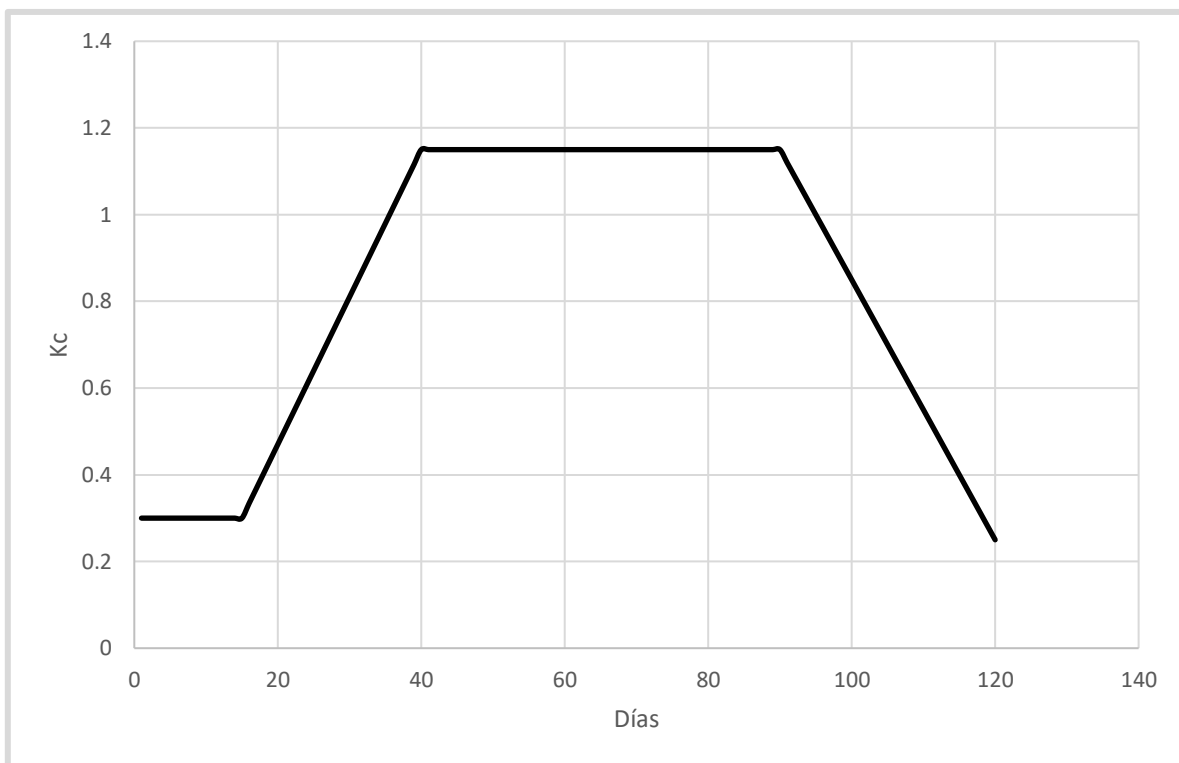


Figura 37.- Curva de cultivo (K_c) para la avena

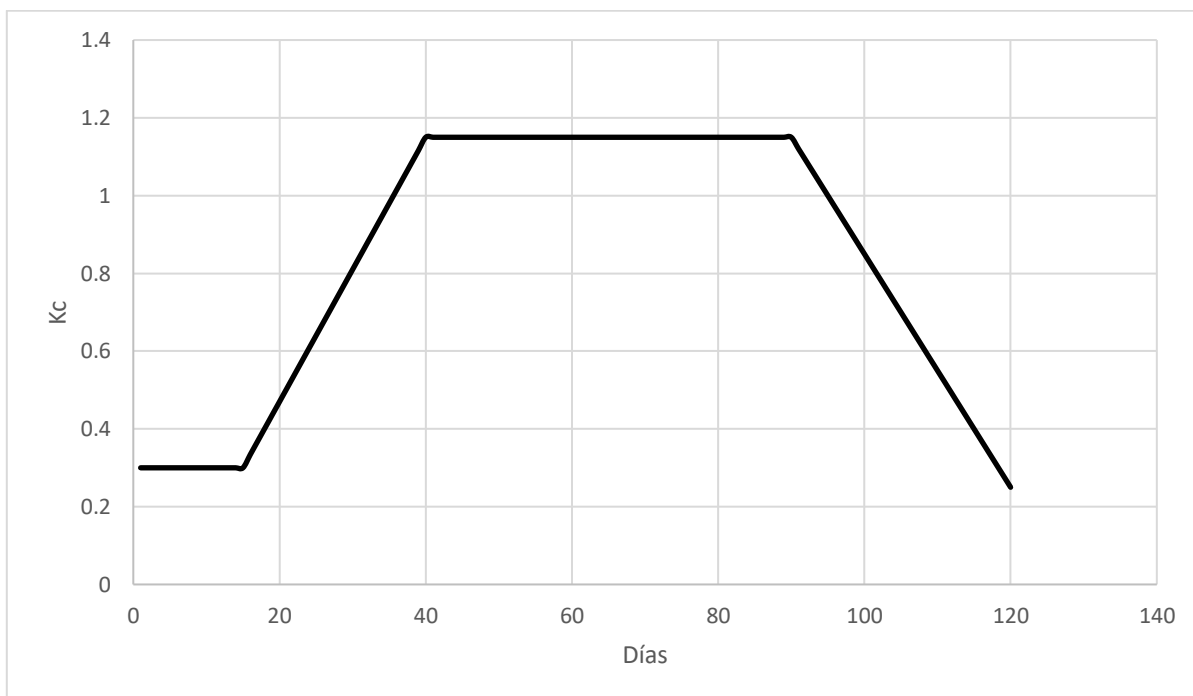


Figura 38.- Curva de cultivo (K_c) para la cebada

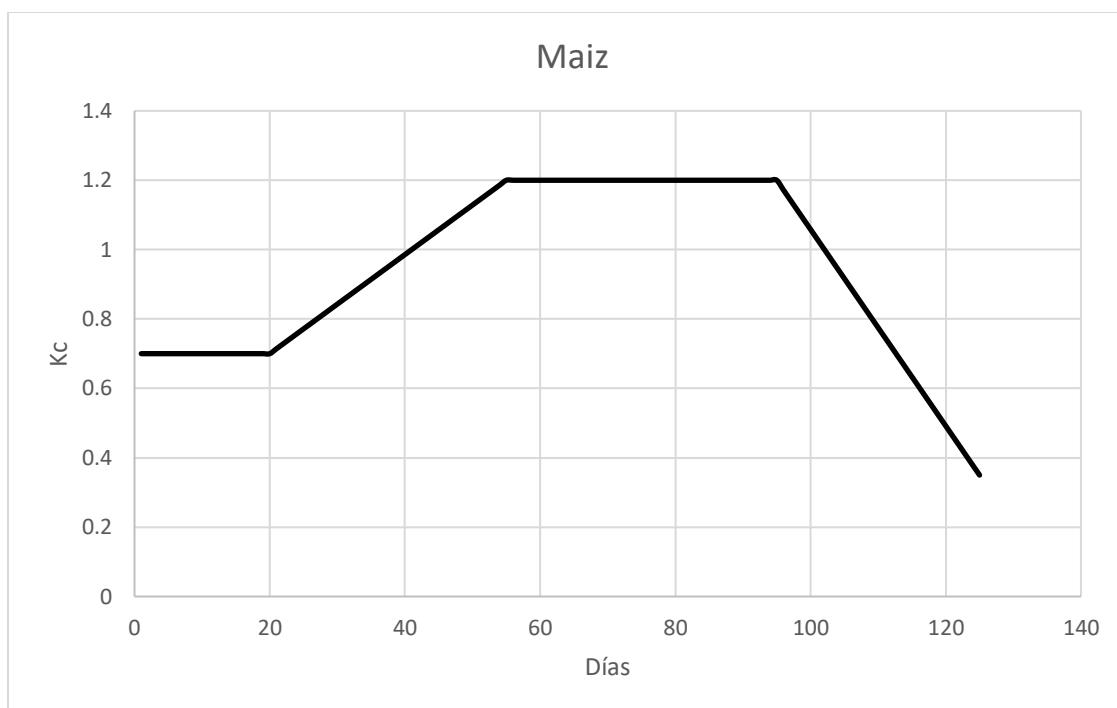


Figura 39.- Curva de cultivo (Kc) para el maíz

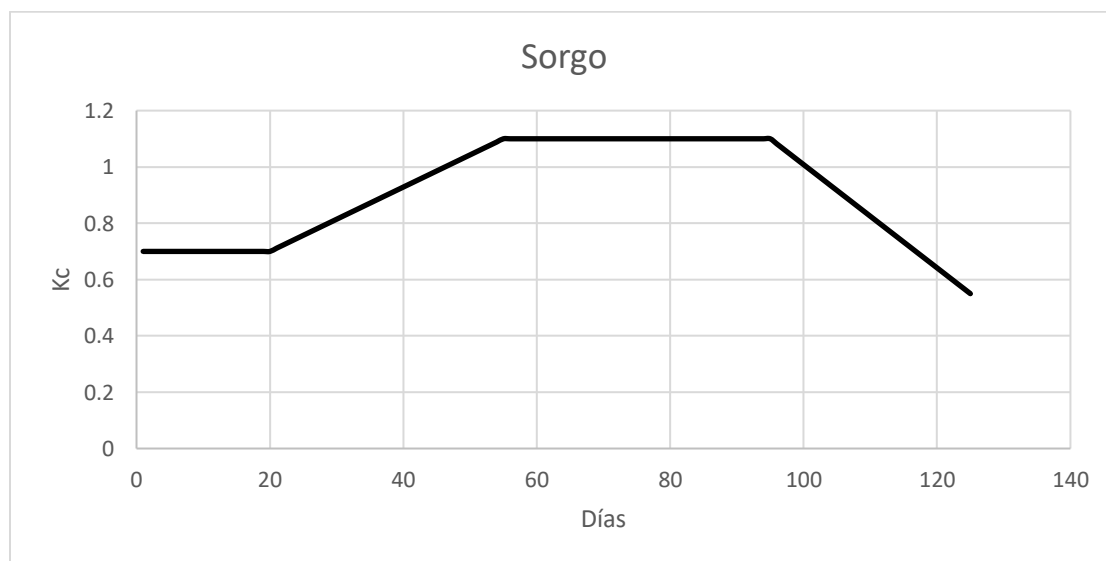


Figura 40.- Curva de cultivo (Kc) para el sorgo

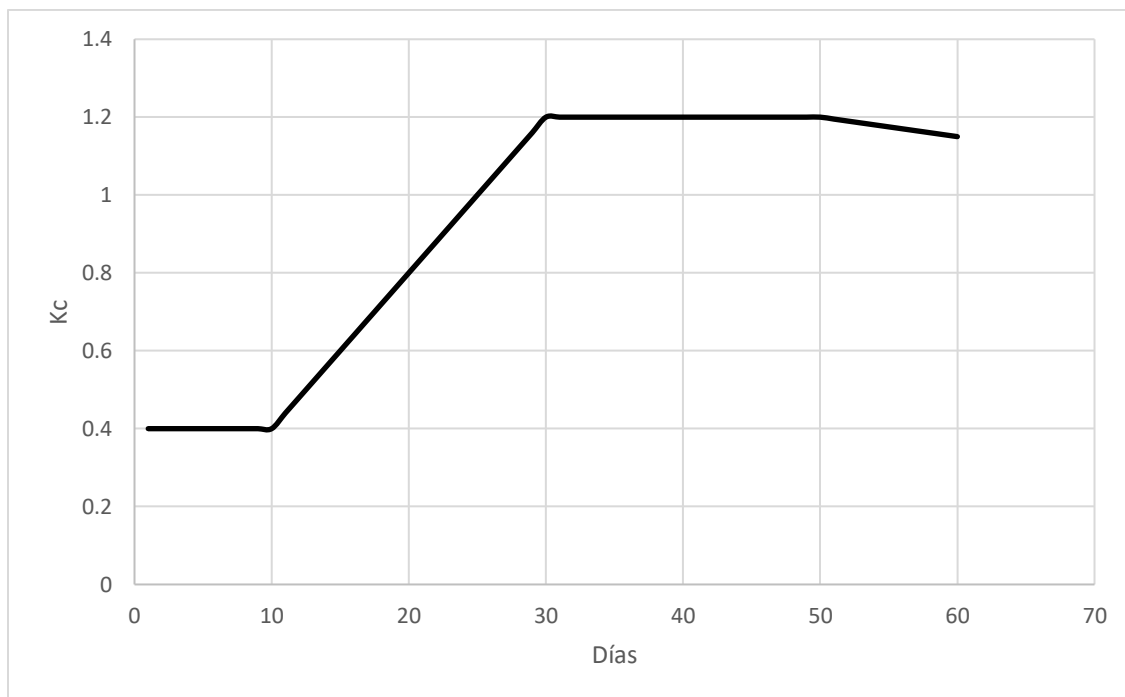


Figura 41.- Curva de cultivo (K_c) para la alfalfa

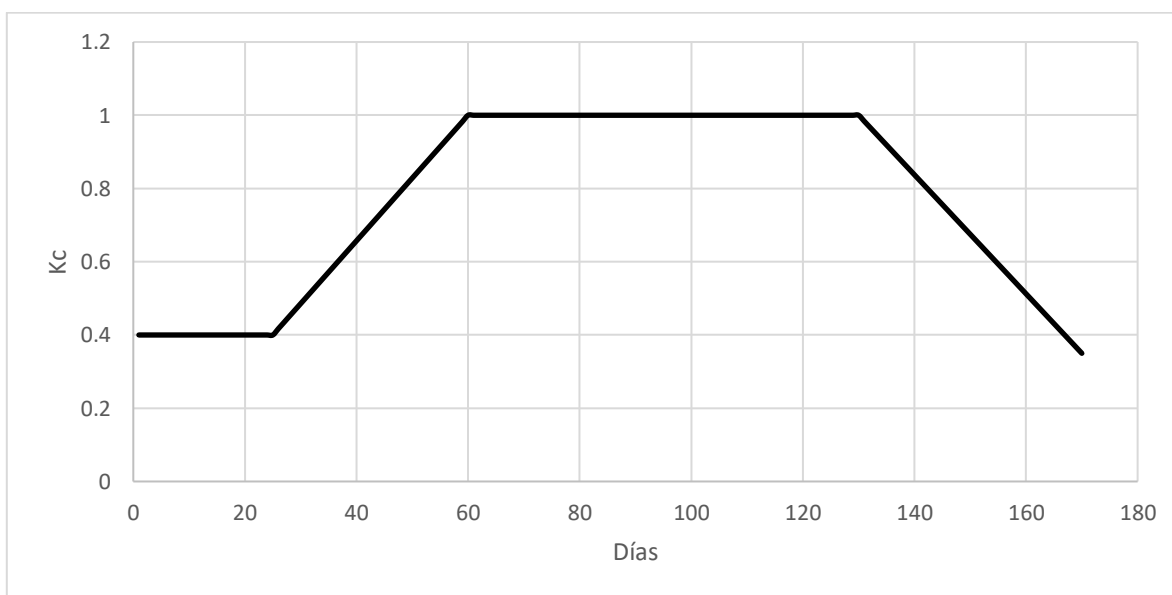


Figura 42.- Curva de cultivo (K_c) para el garbanzo

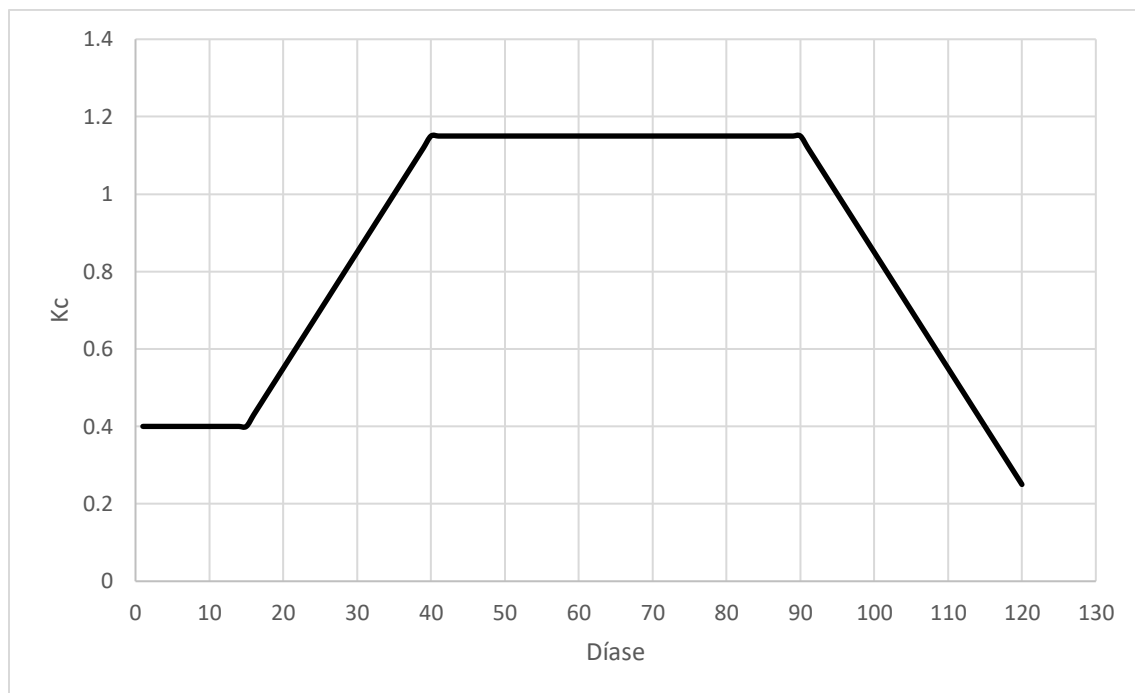


Figura 43.- Curva de cultivo (K_c) para el trigo

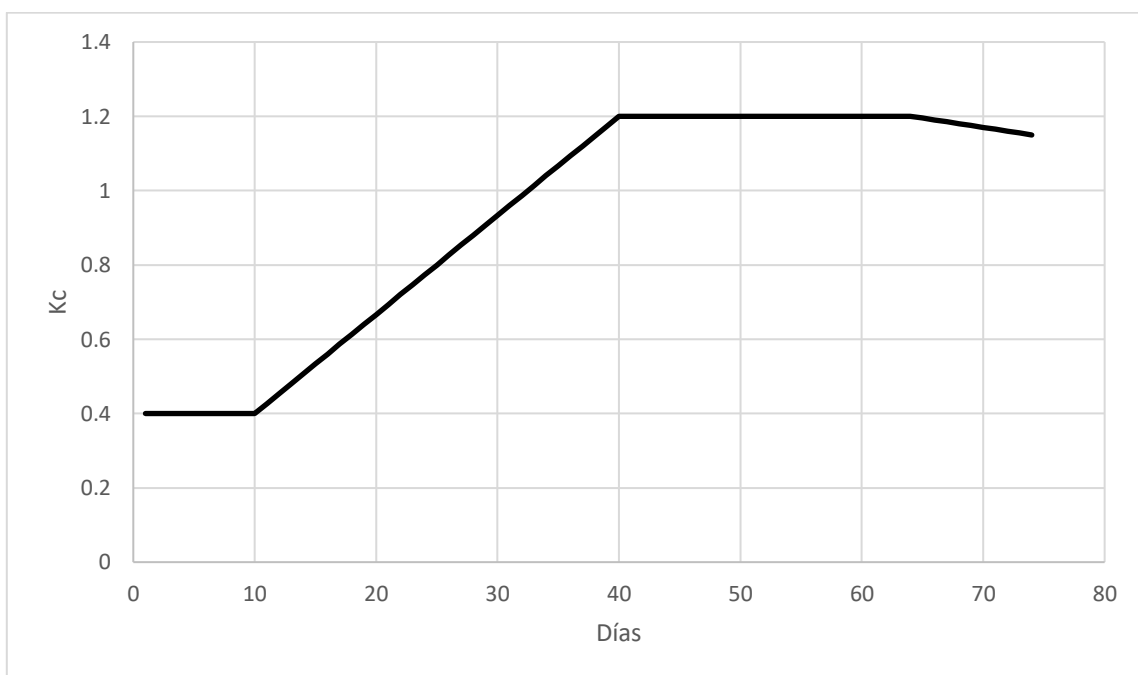


Figura 44.- Curva de cultivo (K_c) para el Ebo/Vaz/Janamargo

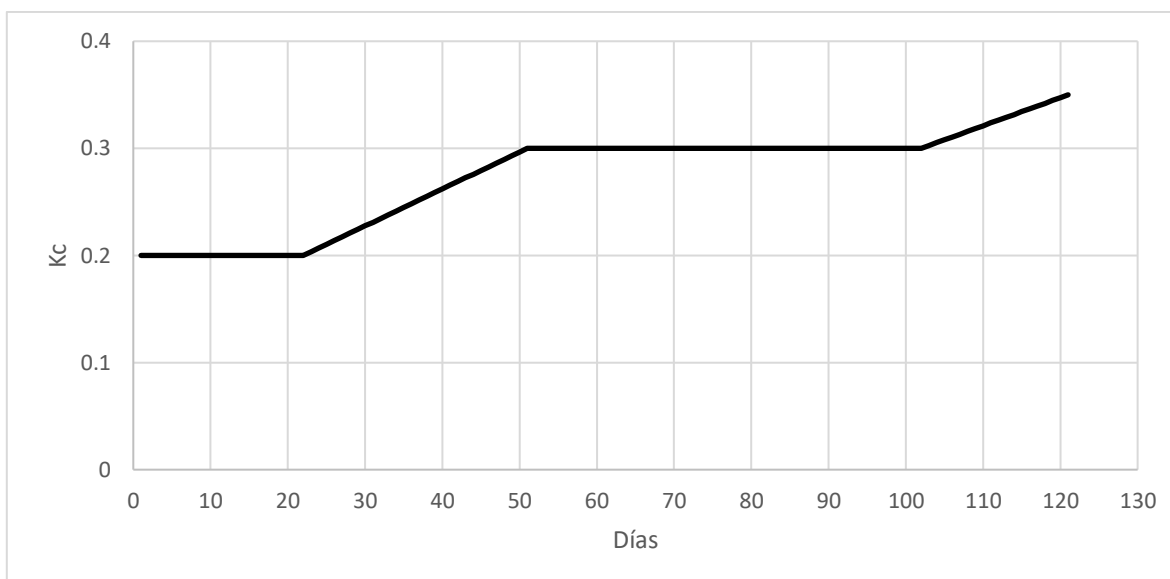


Figura 45.- Curva de cultivo (K_c) para el Chile

6.4 Resultados de los requerimientos de riego

El Módulo 1 del distrito de riego presenta la estimación mensual del déficit de precipitación y los requerimientos de riego para diversos cultivos establecidos en la zona de estudio. Este análisis permite determinar la disponibilidad hídrica natural frente a las necesidades de cada cultivo, así como cuantificar la demanda de riego requerida para suplir la falta de humedad durante el ciclo agrícola.

De acuerdo con la tabla 21, se observa que los cultivos de avena, cebada y trigo presentan un comportamiento similar, con déficits significativos durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, alcanzando valores máximos de 117.2 mm, 115.9 mm y 118.1 mm, respectivamente. Este patrón refleja su establecimiento en el ciclo otoño–invierno, cuando la precipitación resulta insuficiente para cubrir las necesidades hídricas de la planta.

Por su parte, el maíz y el sorgo muestran un déficit concentrado en los meses de marzo a julio, con máximos de 219.0 mm y 201.9 mm, respectivamente. Dichos valores evidencian la alta demanda del cultivo y el incremento de la temperatura en el periodo primavera–verano, característico de cultivos de ciclo largo y elevada exigencia hídrica.

El garbanzo manifiesta déficit en los primeros meses del año (enero a marzo), con un máximo de 99.6 mm en enero, mientras que el chile presenta requerimientos relativamente bajos, con valores entre 18.2 y 34.0 mm concentrados en los meses de menor precipitación. En contraste, el janamargo (forrajero) exhibe déficit elevado en los meses de octubre y noviembre, alcanzando 98.1 mm y 121.2 mm, lo que indica una dependencia del riego en el periodo de cosecha o rebrote.

En general, el análisis mensual revela que los mayores déficits hídricos se concentran en el último trimestre del año, mientras que los menores se presentan entre abril y agosto, coincidiendo con la temporada de lluvias y la menor demanda de riego.

Tabla 21.- Requerimientos de riego para el ciclo de cultivo existentes en el módulo 1

Déficit de Precipitación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1. Avena	27.4	0	0	0	0	0	0	0	11.1	81.3	117.2	95.4
2. alfalfa	0	0	0	0	0	0	0	0	15.1	114.2	81.8	0
3. cebada	27.2	0	0	0	0	0	0	0	11.1	80.6	115.9	94.3
4. chile	18.2	0	0	0	0	0	0	0	7	27.4	34	28.2
5. garbanzo	99.6	69.6	17.5	0	0	0	0	0	15.1	55.1	90.6	88.2
6. janamargo	0	0	0	0	0	0	0	0	15.1	98.1	121.2	12.2
7. maíz	0	0	40.7	115.9	219	79.7	13.5	0	0	0	0	0
8. sorgo	0	0	40.7	112	201.9	66.3	16.3	0	0	0	0	0
9. trigo	27.6	0	0	0	0	0	0	0	15.1	88.2	118.1	96.1
Req. Netos sistema												
en mm/día	0.3	0.1	0.8	2.2	3.9	1.4	0.3	0	0.2	1.2	1.5	0.9
en mm/mes	10.1	2.1	23.7	65.4	121.9	43.1	8.2	0	5.9	37.4	43.8	26.8
en l/s/h	0.04	0.01	0.09	0.25	0.46	0.17	0.03	0	0.02	0.14	0.17	0.1
Area Irrigada												
(% del area total)	30	3	60	57	57	57	57	0	43	43	43	33
Req.de riego area real												
(l/s/h)	0.13	0.29	0.15	0.44	0.8	0.29	0.05	0	0.05	0.32	0.39	0.3

Debido a que el maíz abarca la mayor cantidad de la demanda se describirán sus resultados con mayor detalle los cuales se presentan a continuación.

El cultivo presenta cuatro etapas fenológicas principales: inicial (Inic), desarrollo (Des), media (Med) y final (Fin), las cuales muestran una evolución progresiva del coeficiente de cultivo (K_c) conforme avanza el crecimiento vegetativo y el desarrollo foliar.

Durante la etapa inicial (agosto), el valor de $K_c = 0.7$ refleja una baja cobertura vegetal y limitada transpiración, mientras que en la etapa de desarrollo (septiembre) los valores aumentan gradualmente hasta 1.1, evidenciando una mayor demanda hídrica asociada al incremento del área foliar.

En la etapa media (octubre), el coeficiente alcanza su máximo valor ($K_c = 1.3$), lo que indica el periodo de mayor consumo de agua, coincidente con la máxima tasa de evapotranspiración. Finalmente, durante la etapa final (noviembre a diciembre), el valor de K_c desciende hasta 0.5, reflejando el proceso de maduración y senescencia del cultivo, cuando la demanda hídrica disminuye significativamente.

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) expresa la pérdida combinada de agua por evaporación del suelo y transpiración del cultivo. En la etapa inicial, los valores diarios de ET_c se mantienen relativamente bajos (≈ 3.1 mm/día), acumulando entre 15.5 y 34.7 mm por década. Durante la etapa de desarrollo, se observa un incremento progresivo de ET_c , alcanzando un máximo de 49.8 mm/dec en la última década de septiembre, mientras que en la etapa media (octubre), los valores permanecen elevados, entre 48.2 y 51.6 mm/dec, indicando el periodo de máxima exigencia hídrica. Hacia la etapa final (noviembre y diciembre), la evapotranspiración disminuye gradualmente desde 44.7 mm/dec hasta 10.4 mm/dec, en correspondencia con la reducción de la actividad fisiológica del cultivo. El valor total acumulado de ET_c a lo largo del ciclo es de 470 mm, lo que representa la demanda hídrica total del cultivo bajo condiciones climáticas locales.

El requerimiento de riego corresponde al volumen de agua que debe suministrarse artificialmente para compensar el déficit hídrico, es decir, la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva.

En agosto, los requerimientos son mínimos (entre 1.2 y 3.8 mm/dec), gracias al aporte de las lluvias. Sin embargo, a partir de septiembre se incrementan de forma sostenida, alcanzando 48.8 mm/dec a finales de ese mes y manteniéndose elevados durante todo octubre, con valores cercanos a 50 mm/dec. En noviembre, el requerimiento de riego disminuye paulatinamente hasta 21.4 mm/dec, y finalmente alcanza 7.6 mm/dec en diciembre, coincidiendo con el cierre del ciclo vegetativo. El total acumulado de requerimiento de riego asciende a 356.9 mm, lo que representa aproximadamente el 76 % de la demanda total de evapotranspiración (ETc), confirmando la dependencia del cultivo respecto al riego suplementario durante gran parte de su ciclo.

Tabla 22.- Características hídricas para el maíz

Mes	Etap	Kc	ETc (mm/día)	ETc (mm/dec)	Prec. Efec (mm/dec)	Req.Riego (mm/dec)
Ago (10)	Inic	0.7	3.11	15.5	14.3	1.3
Ago(20)	Inic	0.7	3.08	30.8	27	3.8
Ago(30)	Des	0.7	3.16	34.7	33.5	1.2
Sep(10)	Des	0.9	3.68	36.8	27.3	9.5
Sep(20)	Des	1.1	4.18	41.8	7.2	34.6
Sep(30)	Med	1.2	4.98	49.8	1	48.8
Oct(10)	Med	1.3	4.93	49.3	0	49.3
Oct(20)	Med	1.3	4.82	48.2	0	48.2
Oct(30)	Med	1.3	4.69	51.6	0	51.6
Nov(10)	Fin	1.3	4.47	44.7	0	44.7
Nov(20)	Fin	1.1	3.49	34.9	0	34.9
Nov(30)	Fin	0.8	2.14	21.4	0	21.4
Dic(10)	Fin	0.5	1.3	10.4	2.2	7.6
			Total	470	112.5	356.9

Tabla 23.- Ciclo de cultivo para el maíz

Fecha	Día	Etap	Precipit. mm	Ks fracc.	ETa %	Agot. %	Lám.Neta mm	Déficit mm	Pérdida mm	Lam.Br. mm	Caudal l/s/ha
08-ago	3	Ini	0	1	100	66	6.5	0	0	9.3	0.36
11-ago	6	Ini	0	1	100	66	9.2	0	0	13.1	0.51
15-sep	41	Des	0	1	100	61	36.5	0	0	52.1	0.17
26-sep	52	Des	0	1	100	56	41.4	0	0	59.1	0.62
05-oct	61	Med	0	1	100	59	45.7	0	0	65.3	0.84
14-oct	70	Med	0	1	100	58	44.9	0	0	64.1	0.82
24-oct	80	Med	0	1	100	59	45.9	0	0	65.6	0.76
03-nov	90	Med	0	1	100	60	46.7	0	0	66.7	0.77
13-nov	100	Fin	0	1	100	56	44	0	0	62.8	0.73
30-nov	117	Fin	0	1	100	56	43.6	0	0	62.3	0.42
08-dic	Fin	Fin	0	1	0	12					

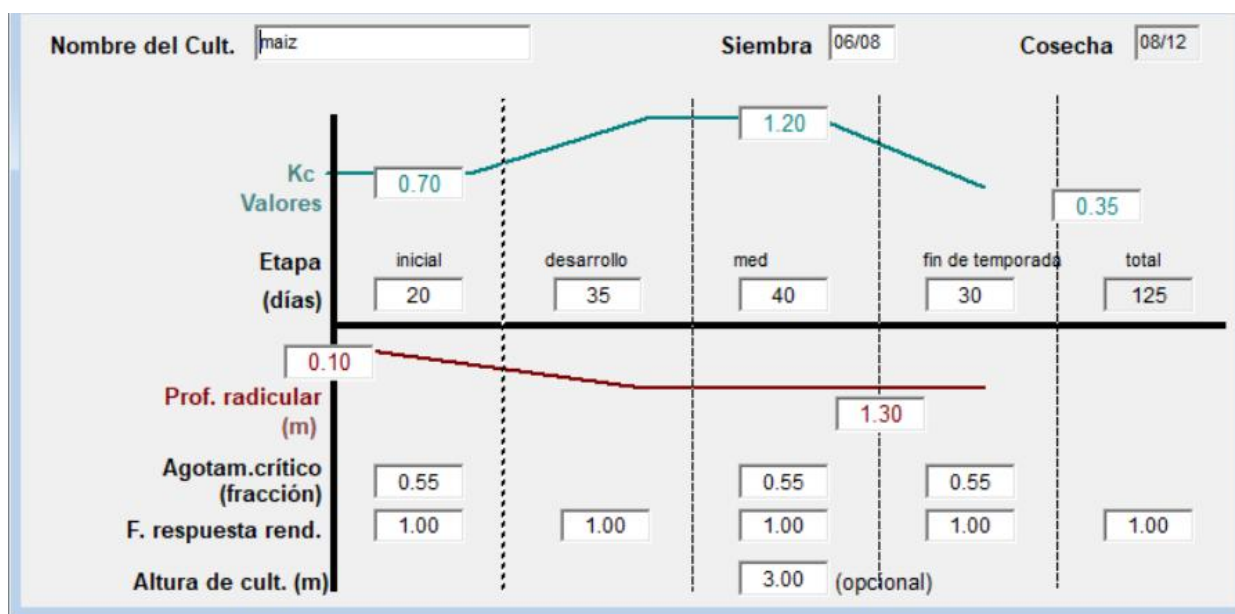


Figura 46.- Entrada de valores para el apartado de cultivo del maíz

Requerimiento de Agua del Cultivo							
Estación ETo		TEC Morelia		Cultivo		maiz	
Est. de lluvia		TEC Morelia		Fecha de siembra		06/08	
Mes	Decada	Etap	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req.Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Ago	1	Inic	0.70	3.11	15.5	14.3	1.3
Ago	2	Inic	0.70	3.08	30.8	27.0	3.8
Ago	3	Des	0.73	3.16	34.7	33.5	1.2
Sep	1	Des	0.90	3.68	36.8	27.3	9.5
Sep	2	Des	1.07	4.18	41.8	7.2	34.6
Sep	3	Med	1.24	4.98	49.8	1.0	48.8
Oct	1	Med	1.30	4.93	49.3	0.0	49.3
Oct	2	Med	1.30	4.82	48.2	0.0	48.2
Oct	3	Med	1.30	4.69	51.6	0.0	51.6
Nov	1	Fin	1.29	4.47	44.7	0.0	44.7
Nov	2	Fin	1.06	3.49	34.9	0.0	34.9
Nov	3	Fin	0.75	2.14	21.4	0.0	21.4
Dic	1	Fin	0.46	1.30	10.4	2.2	7.6
					470.0	112.5	356.9

Figura 47.- Requerimiento de agua de cultivo al considerar todas las variables para el maíz

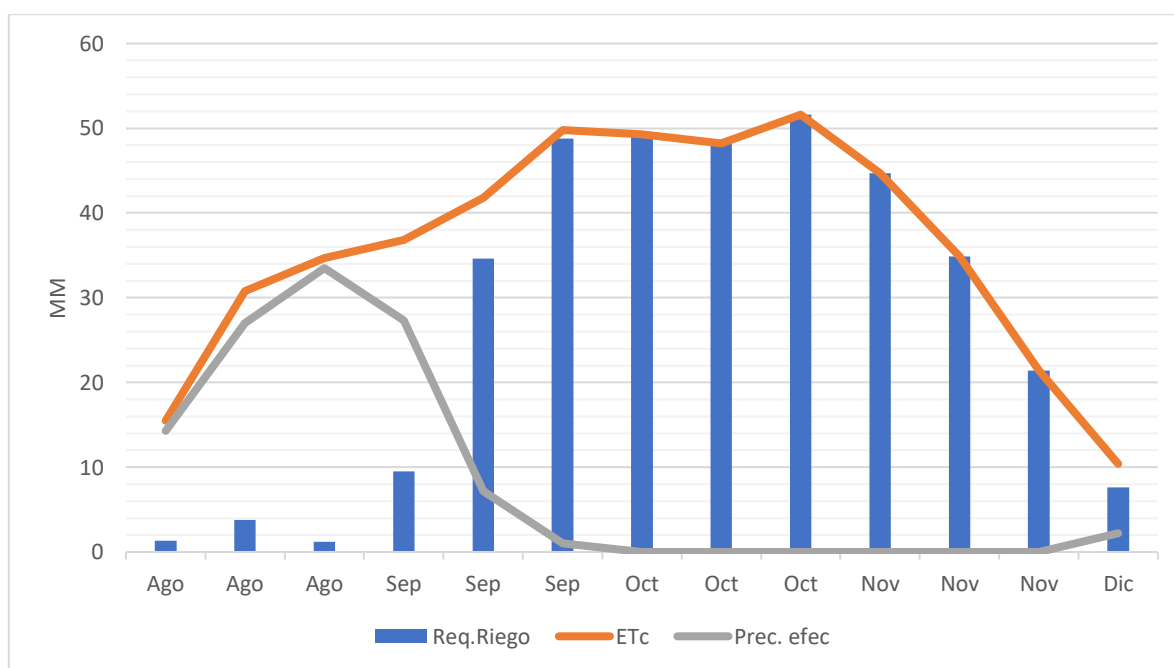


Figura 48.- Comparación de los requerimientos de agua respecto a los ciclos de cultivo del maíz

ETo estación	TEC Morelia	Cultivo	maíz	Siembra	06/08	Red. Rend.	
Est. de lluvia	TEC Morelia	Suelo	Light (sand)	Cosecha	08/12		0.0 %

Formato de Tabla

☒ Program. de riego

☐ Bal. diario de agua de suelo

Momento: Regar a agotamiento crítico

Aplicación: Reponer a capacidad de campo

Ef. campo 70 %

Fecha	Día	Etap	Precipit.	Ks	ETa	Agot.	Lám.Neta	Déficit	Pérdida	Lam.Br.	Caudal
			mm	fracc.	%	%	mm	mm	mm	mm	l/s/ha
8 Ago	3	Ini	0.0	1.00	100	66	6.5	0.0	0.0	9.3	0.36
11 Ago	6	Ini	0.0	1.00	100	66	9.2	0.0	0.0	13.1	0.51
15 Sep	41	Des	0.0	1.00	100	61	36.5	0.0	0.0	52.1	0.17
26 Sep	52	Des	0.0	1.00	100	56	41.4	0.0	0.0	59.1	0.62
5 Oct	61	Med	0.0	1.00	100	59	45.7	0.0	0.0	65.3	0.84
14 Oct	70	Med	0.0	1.00	100	58	44.9	0.0	0.0	64.1	0.82
24 Oct	80	Med	0.0	1.00	100	59	45.9	0.0	0.0	65.6	0.76
3 Nov	90	Med	0.0	1.00	100	60	46.7	0.0	0.0	66.7	0.77
13 Nov	100	Fin	0.0	1.00	100	56	44.0	0.0	0.0	62.8	0.73

Totales			
Lámina bruta total	520.3	mm	
Lámina neta total	364.2	mm	
Pérdida total de riego	0.0	mm	
Uso real de agua del cultivo	469.0	mm	
Uso pot. de agua del cultivo	469.0	mm	
Efic. de programación de riego	100.0	%	
Deficiencia de programación de riego	0.0	%	
Precipitación total	133.5	mm	
Precipitación Efectiva	95.4	mm	
Pérdida tot.prec.	38.1	mm	
Def. de hum. en cosecha	9.4	mm	
Requer. reales de riego	373.6	mm	
Efic. de precipitación	71.4	%	

Reducción de rendimiento					
Stagelabel	A	B	C	D	Estación

Figura 49.- Programación de riego para el maíz

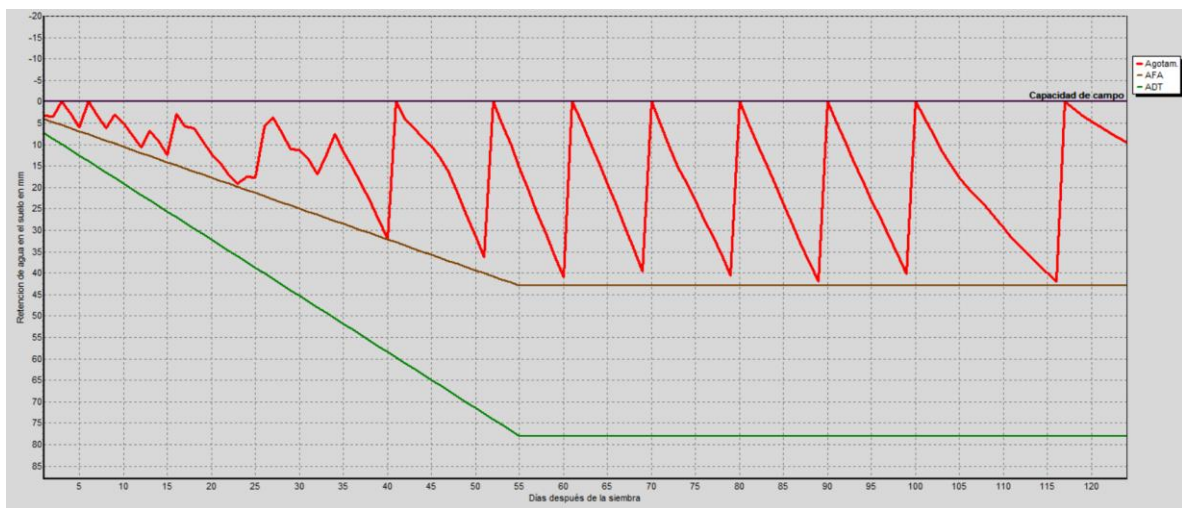


Figura 50.- Agotamiento crítico y agua aprovechable para el maíz

Eto estación	TEC Morela											Patrón de cultivo	Modulo1
Est. de lluvia	TEC Morela												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Déficit de Precipitación													
1. Avena	27.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	81.3	117.2	95.4	
2. alfalfa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	114.2	81.8	0.0	
3. cebada	27.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	80.6	115.9	94.3	
4. chile	18.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	27.4	34.0	28.2	
5. garbanzo	99.6	69.6	17.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	55.1	90.6	88.2	
6. janamargo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	98.1	121.2	12.2	
7. maiz	0.0	0.0	40.7	115.9	219.0	79.7	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8. sorgo	0.0	0.0	40.7	112.0	201.9	66.3	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9. trigo	27.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	88.2	118.1	96.1	
Req. Netos sistema													
en mm/día	0.3	0.1	0.8	2.2	3.9	1.4	0.3	0.0	0.2	1.2	1.5	0.9	
en mm/mes	10.1	2.1	23.7	65.4	121.9	43.1	8.2	0.0	5.9	37.4	43.8	26.8	
en l/s/h	0.04	0.01	0.09	0.25	0.46	0.17	0.03	0.00	0.02	0.14	0.17	0.10	
Area Irrigada	30.0	3.0	60.0	57.0	57.0	57.0	57.0	0.0	43.0	43.0	43.0	33.0	
(% del area total)													
Req.de riego area real	0.13	0.29	0.15	0.44	0.80	0.29	0.05	0.00	0.05	0.32	0.39	0.30	
(l/s/h)													

Figura 51.- Programación de riego para todos los cultivos existentes en el módulo 1

6.5 Análisis de plan de riego y selección del tipo de sistema de riego

Toda zona de riego perteneciente a un Distrito de Riego cuenta con ciertas concesiones específicas, desde zonas de pasto cerril a zonas dedicadas especialmente a la agricultura, de ahí parte el plan de riego ya que dependiendo a la zona se da un estimado de despacho de agua necesaria ya que se tiene medios controlados. Una vez estudiado el plan de riego se confirmará (o no) si el plan vigente sigue funcionando en cuanto la relación área/riego y realmente satisface las necesidades hídricas de los cultivos o si existe un déficit o sobre explotación. Al tener toda esta información conjunta se podrá tomar una decisión y escoger el mejor método de riego que se adapte al plan de riego existente o en su defecto que haya alguna modificación al plan debido a las condiciones reales actuales.

6.6 Propuesta de trazo de red de distribución

6.6.1 Diseño de la red

Para la nueva red de tuberías que se ha propuesto para el módulo I por cuestiones de comendación se apegó en su mayoría en el diseño actual de los canales ya que esta zona esta aplicada en zona federal para evitar problemas con permisos de construcción con el estado, municipio y juntas ejidales.

La Figura 40 presenta la distribución espacial del sistema de conducción principal y las áreas agrícolas localizadas en la zona de influencia de la Presa Cointzio, así como los elementos hidrográficos y urbanos más relevantes del territorio analizado. Tubería principal (línea naranja): representa la infraestructura hidráulica de conducción que transporta el agua desde la fuente principal de abastecimiento hacia las diferentes zonas de riego. Esta línea sigue un recorrido que atraviesa la parte central del área agrícola y conecta las principales parcelas productivas. Río Grande de Morelia (línea azul): indica el cauce natural el cuerpo de agua superficial que cruzan la región, los cuales contribuyen al drenaje natural y en algunos casos al aprovechamiento complementario para riego. Presa Cointzio (azul): corresponde al embalse principal de almacenamiento, ubicado en la parte suroeste del mapa. Este cuerpo de agua constituye la fuente primaria de abastecimiento para el sistema de riego y, en algunos sectores, para el suministro urbano. Parcelas agrícolas (polígonos verdes): delimitan las superficies cultivadas dentro del área de estudio. Se observa una distribución concentrada principalmente al norte y centro del mapa, con una extensión que abarca diversas comunidades rurales.

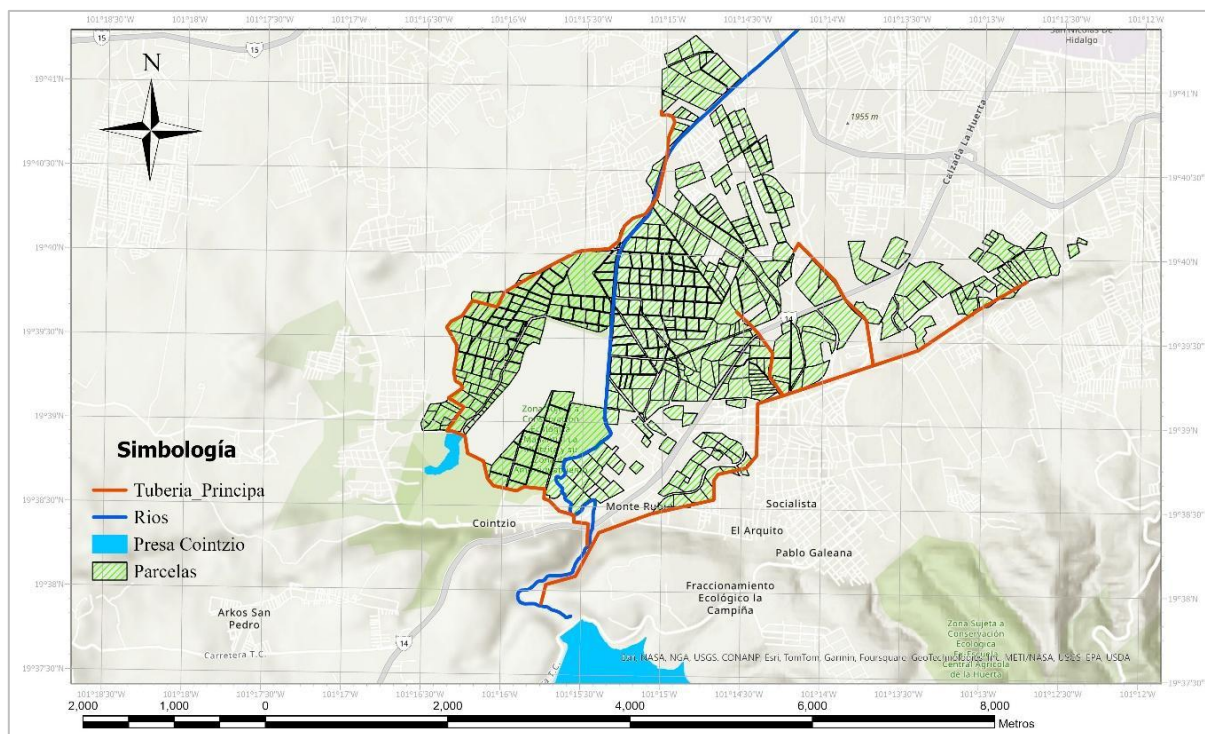


Figura 52.- Diseño propuesto para la red de tuberías.

La Tabla 24 presenta los resultados del análisis hidráulico de las tuberías que conforman el sistema de distribución de agua, incluyendo los parámetros de diámetro, rugosidad, caudal, velocidad del flujo y pérdida unitaria de carga. Estos valores fueron obtenidos a partir de la simulación realizada con el modelo hidráulico desarrollado, con el propósito de evaluar el comportamiento del flujo a lo largo de la red principal. Los diámetros nominales de las tuberías varían entre 200 mm y 600 mm, reflejando una jerarquía hidráulica en el sistema donde las conducciones de mayor capacidad (600 mm) se localizan en los tramos principales de distribución, mientras que las de menor diámetro corresponden a derivaciones o ramales secundarios. El coeficiente de rugosidad, expresado en milímetros, se mantuvo constante con un valor de 0.0015 mm, correspondiente a una tubería de material PVC lo cual minimiza las pérdidas por fricción y mejora la eficiencia del transporte de agua. El caudal conducido por cada línea varía significativamente entre 35.7 L/s (Tubería 6) y 304.7 L/s (Tubería 17), evidenciando diferencias en la demanda hidráulica de los distintos sectores abastecidos.

Tabla 24.- Diseño hidráulico de las tuberías del Módulo 1 del DR 020 Morelia-Queréndaro.
Fuente Elaboración propia.

ID Línea	Diámetro	Rugosidad	Caudal	Velocidad	Pérdida Unit.
	mm	mm	LPS	m/s	m/km
Tubería 1	600	0.0015	289.5	1.02	1.13
Tubería 2	600	0.0015	272.9	0.97	1.02
Tubería 3	450	0.0015	264.4	1.66	3.85
Tubería 4	450	0.0015	85.22	0.54	0.49
Tubería 5	450	0.0015	56.01	0.35	0.23
Tubería 6	450	0.0015	35.7	0.22	0.1
Tubería 7	450	0.0015	179.2	1.13	1.89
Tubería 8	250	0.0015	52.97	1.08	3.51
Tubería 9	250	0.0015	42.18	0.86	2.32
Tubería 10	250	0.0015	58.91	1.2	4.26
Tubería 11	250	0.0015	33.35	0.68	1.52
Tubería 12	250	0.0015	25.18	0.51	0.92
Tubería 14	500	0.0015	264.1	1.34	2.31
Tubería 15	450	0.0015	230.8	1.45	3
Tubería 18	250	0.0015	32.58	0.66	1.46
Tubería 19	250	0.0015	30.47	0.62	1.29
Tubería 16	450	0.0015	-118.3	0.74	0.89
Tubería 20	450	0.0015	175.7	1.1	1.82
Tubería 21	450	0.0015	175.7	1.1	1.82
Tubería 17	500	0.0015	304.7	1.55	3

Las tuberías de mayor diámetro (600 mm) transportan los mayores caudales, con valores promedio de 281 L/s, lo que confirma su función como conductos principales del sistema. En contraste, las tuberías de 200 a 250 mm presentan caudales menores, inferiores a 60 L/s, correspondientes a los ramales de distribución local. Las velocidades del flujo oscilan entre 0.54 m/s (Tubería 4) y 1.73 m/s (Tubería 15), encontrándose dentro del rango recomendado por la normativa técnica de diseño de redes hidráulicas (0.3–2.5 m/s). Estas velocidades aseguran un régimen de flujo eficiente, evitando tanto pérdidas excesivas por fricción como sedimentación de partículas en el interior de las conducciones.

6.6.2 Propuestas de ubicación de hidrantes

La Tabla 25 presenta los resultados del análisis nodal del modelo hidráulico correspondiente al sistema de distribución, mostrando los valores de demanda, altura topográfica y presión disponible en cada nodo de la red. Estos parámetros fueron obtenidos mediante la simulación hidráulica desarrollada en el software EPANET, con el objetivo de evaluar la eficiencia en la entrega del caudal y la capacidad de presión en los puntos de consumo. La columna de demanda expresa el caudal requerido por cada nodo en litros por segundo (L/s), el cual representa el volumen de agua necesario para satisfacer las necesidades de los sectores conectados a cada punto de distribución. Los valores de demanda varían entre 2.11 L/s (Nudo 17) y 85.72 L/s (Nudo 16), evidenciando diferencias en las condiciones de consumo o riego asociadas a cada zona. En términos generales, los nodos 6, 12, 13, 15 y 16 presentan las demandas más elevadas, lo cual indica que se ubican en áreas de mayor requerimiento hídrico o concentración de usuarios. Por otro lado, los nodos 2, 7, 10 y 17 muestran demandas menores, asociadas a ramales secundarios o zonas de menor cobertura. La columna de altura indica la cota topográfica de cada nodo, expresada en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Los valores registrados oscilan entre 1952.8 m (Nudo 8) y 1970 m (Embalse S2), reflejando una ligera variación altitudinal de aproximadamente 17 metros a lo largo del sistema. La presión disponible en los nodos, expresada en metros de columna de agua (m), es uno de los indicadores más importantes del desempeño hidráulico del sistema. Los valores obtenidos fluctúan entre 22.76 m (Nudo 2) y 77.48 m (Nudo 13), lo que evidencia una

distribución de presiones adecuada dentro de los límites técnicos recomendados para redes de distribución presurizadas. Se observa que los nodos 12, 13, 14, 15 y 16 presentan las presiones más altas, lo cual coincide con su localización en zonas de menor altitud, mientras que los nodos 1 y 2, ubicados a cotas más elevadas, registran presiones más bajas. Estas condiciones aseguran un suministro eficiente y continuo en todos los sectores del sistema, sin riesgo de deficiencias por baja presión ni fallas estructurales por sobrepresión.

Tabla 25.- Diseño hidráulico de las tuberías del Módulo 1 del DR 020 Morelia-Queréndaro.
Fuente Elaboración propia.

ID Nodos	Demand a	Altura	Presión
	LPS	m	m
Embalse S1	289.48	1967	0
Embalse S2	304.66	1970	0
Nudo 1	16.61	1965.1	26.09
Nudo 2	8.43	1963.8	22.76
Nudo 3	29.21	1959.7	58.66
Nudo 4	20.31	1959.6	64.55
Nudo 5	35.7	1959.5	65.54
Nudo 6	67.34	1957.8	40.13
Nudo 7	10.79	1954.9	54.86
Nudo 8	42.18	1952.8	53.75
Nudo 9	25.56	1955.6	31.61
Nudo 10	8.17	1954.4	43.39
Nudo 11	25.18	1953.8	34.48
Nudo 12	40.6	1968.6	76.62
Nudo 13	33.25	1967.5	77.48
Nudo 14	55.16	1960.9	72.87
Nudo 15	57.35	1957	57.99
Nudo 16	85.72	1955.6	75.61
Nudo 17	2.11	1954.9	73.92
Nudo 18	30.47	1954.1	59.14

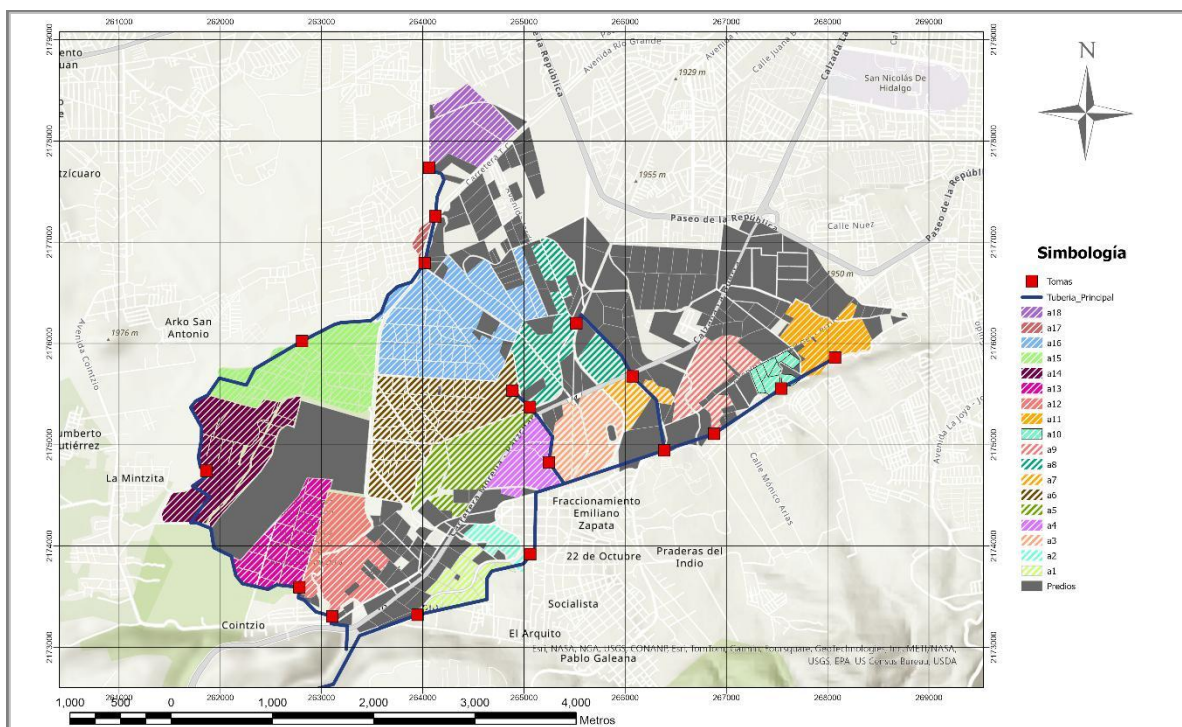


Figura 53.- Ubicación de hidrantes para las distintas áreas de riego

7 Presupuesto Básico de la Red

7.1 Costos de diseño y materiales

7.1.1 Presupuesto General para Excavación, Instalación de Tubería e Hidrantes

7.1.1.1 1. Excavación de la zanja

- **Longitud de la zanja:** 13,000 metros
- **Profundidad de la zanja:** 1 metro
- **Ancho de la zanja:** 0.5 metros
- **Rendimiento de la retroexcavadora:** 100 metros por hora
- **Costo por hora de retroexcavadora:** \$700
- **Total de horas necesarias:** 130 horas
- **Costo total de la excavación:** \$91,000

7.1.1.2 2. Mano de obra (cuadrilla de trabajadores)

- **Número de trabajadores:** 5
- **Costo diario por trabajador:** \$300
- **Total de días requeridos:** 16.25 días

- **Costo total de la cuadrilla: \$24,375**

7.1.1.3 3. Tubería

- **Longitud total de tubería:** 13,000 metros
- **Longitud por tramo:** 6 metros
- **Costo por tramo:** \$760
- **Número de tramos necesarios:** 2,167
- **Costo total de la tubería: \$1,646,920**

7.1.1.4 4. Uniones de la tubería

- **Número de uniones necesarias:** 2,166
- **Costo por unión:** \$670
- **Costo total de las uniones: \$1,451,220**

7.1.1.5 5. Relleno y compactación de la zanja

- **Volumen de zanja:** Volumen=13,000 m×0.5 m×1 m=6,500 m³
- **Costo por m³:** \$357
- **Costo total de relleno y compactación: \$2,320,500**

7.1.1.6 6. Instalación de hidrantes

- **Número de hidrantes:** 13
- **Costo por hidrante:** \$800
- **Costo total de los hidrantes: \$10,400**

Concepto	Costo
Excavación con retroexcavadora	\$91,000
Mano de obra (cuadrilla)	\$24,375
Tubería	\$1,646,920
Uniones de tubería	\$1,451,220
Relleno y compactación	\$2,320,500
Instalación de hidrantes	\$10,400

Costo total estimado: \$5,544,415 pesos

8 Conclusiones y recomendaciones

El presente proyecto permitió caracterizar las necesidades hídricas del módulo de riego utilizando el método estandarizado de evapotranspiración (FAO), complementado con un análisis de diferentes métodos, como los de radiación, temperatura y transferencia de masa. Dado el acceso y la calidad de la información disponible de las estaciones meteorológicas, se seleccionaron los métodos basados en temperatura como los más adecuados para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos.

La evaluación del sistema actual reveló importantes deficiencias en la infraestructura de riego existente, que dependía de canales a cielo abierto. Estas deficiencias incluían altas pérdidas de agua por robo, filtración y evaporación, así como problemas derivados del deterioro de la infraestructura. En respuesta, se diseñó e implementó una red de riego tecnificada basada en tuberías, optimizando los trazos y garantizando una distribución eficiente del agua.

El diseño propuesto no solo mejora la eficiencia del uso del agua al minimizar pérdidas, sino que también asegura el abastecimiento adecuado para las necesidades de los cultivos en el módulo de riego. Además, se desarrolló un presupuesto básico para la implementación de esta nueva red, asegurando que el proyecto sea económicamente viable.

Con la nueva infraestructura, el módulo de riego queda mejor preparado para satisfacer las demandas hídricas de los cultivos, promoviendo un uso sostenible y eficiente del recurso, reduciendo pérdidas y contribuyendo al desarrollo agrícola de la región.

El uso de tuberías permite minimizar las pérdidas por infiltración, evaporación y filtraciones laterales, que son inherentes a los canales abiertos. De esta forma, se optimiza el aprovechamiento del recurso hídrico, alcanzando eficiencias globales superiores al 90 %, frente a valores que difícilmente superan el 60–70 % en sistemas de canales.

Los sistemas presurizados permiten mantener presiones constantes y regular los caudales de manera precisa en cada punto de entrega, garantizando una distribución homogénea del agua en las parcelas o áreas de servicio. En cambio, los canales dependen de pendientes topográficas y compuertas manuales, lo que genera variaciones en el flujo y pérdidas de control operativo.

Las tuberías evitan el anegamiento del terreno, la erosión y el crecimiento de vegetación acuática, problemas comunes en canales. Asimismo, el mantenimiento se limita a inspecciones periódicas, mientras que en los canales es frecuente la necesidad de desazolve, limpieza y reparación de bordes erosionados, incrementando los costos de operación.

A diferencia de los canales, que requieren pendientes uniformes y amplias franjas de terreno, las tuberías pueden adaptarse al relieve natural mediante variaciones en presión o instalación de válvulas reductoras. Esto permite maximizar el uso agrícola o urbano del suelo y reducir la afectación ambiental por movimientos de tierra.

Los sistemas por tuberías son totalmente compatibles con sistemas de riego tecnificado (por aspersión, goteo o pivote central), lo cual no es viable con canales abiertos. Esta compatibilidad permite automatizar el control del caudal y la presión, mejorando la eficiencia energética y la gestión del agua a largo plazo.

Al ser sistemas cerrados, las tuberías reducen la contaminación del agua por residuos, escurrimientos superficiales o crecimiento biológico, garantizando una mejor calidad del recurso para usos agrícolas, industriales o de abastecimiento urbano.

9 Referencias

- Abtew, W. (2005a). Evapotranspiration in the Everglades: Comparison of Bowen Ratio Measurements and Model Estimations. *2005 ASAE Annual International Meeting*, 1-. <https://doi.org/10.13031/2013.19812>
- Abtew, W. (2005b). Evapotranspiration in the Everglades: Comparison of Bowen Ratio Measurements and Model Estimations. *2005 ASAE Annual International Meeting*, 1-. <https://doi.org/10.13031/2013.19812>
- Abtew2, W. (1996a). *EVAPOTRANSPIRATION MEASUREMENTS AND MODELING FOR THREE WETLAND SYSTEMS IN SOUTH FLORIDA*’.
- Abtew2, W. (1996b). *WATER RESOURCES BULLETIN EVAPOTRANSPIRATION MEASUREMENTS AND MODELING FOR THREE WETLAND SYSTEMS IN SOUTH FLORIDA*’.
- AGROVOC: AGROVOC: *Zonas climáticas*. (2023, August 2). https://agrovoc.fao.org/browse/agrovoc/en/page/?clang=es&uri=c_1669
- Ahooghalandari, M., Khiadani, M., & Jahromi, M. E. (2016). Developing Equations for Estimating Reference Evapotranspiration in Australia. *Water Resources Management*, 30(11), 3815–3828. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1386-7>
- Albrecht, F. (1950). Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche. *Archiv Für Meteorologie, Geophysik Und Bioklimatologie Serie B*, 2(1–2), 1–38. <https://doi.org/10.1007/BF02242718/METRICS>
- Ali, A., Hussain, T., Tantashutikun, N., Hussain, N., & Cocetta, G. (2023). Application of Smart Techniques, Internet of Things and Data Mining for Resource Use Efficient and Sustainable Crop Production. *Agriculture (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/agriculture13020397>
- Allen R., Pereira L., Raes D., & Smith M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en cultivos*. (1st ed., Vol. 56). 2006. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2015). Agrociencia. Escuela Nacional de Agricultura (Mexico). Colegio de Postgraduados., A. María. In *Agrociencia* (Vol. 49, Issue 8). Colegio de Postgraduados. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000800001&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F., & Borin, M. (2014). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agricultural Water Management*, 140, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.03.015>
- Beven, K. (1979). A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 44(3–4). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90130-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90130-6)
- Bormann, H. (2011). Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations. *Climatic Change*, 104(3–4), 729–753. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9869-7>
- Cámara de Diputados. (2023). Ley de Aguas Nacionales. In *08 de mayo*. 1992.
- Carrazón Alocén Julián. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego*. www.pesacentroamerica.org
- Celestin, S., Qi, F., Li, R., Yu, T., & Cheng, W. (2020). Evaluation of 32 simple equations against the penman–monteith method to estimate the reference evapotranspiration in the hexi corridor, northwest china. *Water (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102772>
- Chen, Z., Zhu, Z., Jiang, H., & Sun, S. (2020). Estimating daily reference evapotranspiration based on limited meteorological data using deep learning and classical machine learning methods. *Journal of Hydrology*, 591. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125286>
- Clemenzi, I., Quinlan, E., Mansanarez, V., Jansson, P., Jarsjö, J., & Manzoni, S. (2023). Annual water balance and hydrological trends in the glacierised Tarfala Catchment, Sweden. *Journal of Hydrology*, 626, 130028. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.130028>
- CONAGUA. (2009). *CONAGUA 2009b. Desarrollo de un modelo de un modelo de sistema de información geográfica y revisar e identificar las parcelas que requieren actualización en el padrón de usuarios del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro. CONAGUA Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola Gerencia de Distritos de Riego. Michoacán México. b.*
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas Agrícolas de las Unidades de Riego Comisión Nacional del Agua. Año Agrícola 2017-2018 (Vol. 1).* 2019.
- CONAGUA. (2023). *Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.*
- Dalton, J. (1802). Experimental essays, on the constitution of mixed gases. *Manchester, The Society*, 1785-1879, 5(2), 535–602.
- Djaman, K., Balde, A. B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M. K., Manneh, B., Moukoumbi, Y. D., Futakuchi, K., & Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference

- evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.002>
- Djaman, K., Koudahe, K., Sall, M., Kabenge, I., Rudnick, D., & Irmak, S. (2017). Performance of Twelve Mass Transfer Based Reference Evapotranspiration Models under Humid Climate. *Journal of Water Resource and Protection*, 09(12), 1347–1363. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.912086>
- Dorji, U., Olesen, J. E., & Seidenkrantz, M. S. (2016). Water balance in the complex mountainous terrain of Bhutan and linkages to land use. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 7, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.001>
- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. In *Irrigation and Drainage Systems* (Vol. 16).
- FAO. (2023, November 24). *Irrigation Management | Land & Water*. <https://www.fao.org/land-water/water/water-management/irrigation-management/en/>
- FAO. (2024). *Agriculture Water Management*. <https://www.fao.org/land-water/water/water-management/agriculture-water-management/en/>
- FAO | *Land & Water*. (2023, December 6). <https://www.fao.org/land-water/water/water-management/irrigation-management/en/>
- Gafurov, Z., Eltazarov, S., Akramov, B., Yuldashev, T., Djumaboev, K., & Anarbekov, O. (2018). Modifying Hargreaves-Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Dryland Regions of Amudarya River Basin. *Agricultural Sciences*, 09(10), 1354–1368. <https://doi.org/10.4236/as.2018.910094>
- Ghiat, I., Govindan, R., & Al-Ansari, T. (2023). Evaluation of evapotranspiration models for cucumbers grown under CO₂ enriched and HVAC driven greenhouses: A step towards precision irrigation in hyper-arid regions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1155443>
- González Edmundo, & Hinojosa Gustavo. (2013). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego* (Barrón Oscar & Martínez Gema, Eds.; 1ra ed., Vol. 1). 2013.
- Hakala, K., Jauhiainen, L., Rajala, A. A., Jalli, M., Kujala, M., & Laine, A. (2020a). Different responses to weather events may change the cultivation balance of spring barley and oats in the future. *Field Crops Research*, 259, 107956. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2020.107956>
- Hakala, K., Jauhiainen, L., Rajala, A. A., Jalli, M., Kujala, M., & Laine, A. (2020b). Different responses to weather events may change the cultivation balance of spring barley and oats in the future. *Field Crops Research*, 259, 107956. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2020.107956>

- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2003)129:1(53))
- Hargreaves, G. H., & Asae, M. (1975). *Moisture Availability and Crop Production*.
- Hargreaves, G. H., Samani, Z. A., & Abstract, A. (1985). *Reference Crop Evapotranspiration from Temperature*.
- Hernández Joel. (2011). *Evaluacion del cambio climatico en la gestion de sistemas de recursos hidricos*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Hoekstra, A. Y. (2014). Water scarcity challenges to business. *Nature Climate Change* 2014 4:5, 4(5), 318–320. <https://doi.org/10.1038/nclimate2214>
- INEGI. (2013, August 4). *Uso de suelo y vegetación*. Cartas de Uso y Suelo. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568580>
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., & Jones, J. W. (2003). Solar and Net Radiation-Based Equations to Estimate Reference Evapotranspiration in Humid Climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5), 336–347. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2003\)129:5\(336\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2003)129:5(336))
- Jensen, M. E., Burmann, R. D., & Allen, R. G. (1990). Evaporation and irrigation water requirements. *ASCE Manual and Reports on Engineering Practice*, No. 70(70), 332.
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89(4), 15–41. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000287>
- Kodja, D. J., Akognongbé, A. J. S., Amoussou, E., Mahé, G., Vissin, E. W., Paturel, J. E., & Houndénou, C. (2020). Calibration of the hydrological model GR4J from potential evapotranspiration estimates by the Penman-Monteith and Oudin methods in the Ouémé watershed (West Africa). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 383. <https://doi.org/10.5194/piahs-383-163-2020>
- Lapo Pauta, C. M., Pérez García, R., Aliod Sebastián, R., & Martínez Solano, F. (2020). Diseño óptimo de redes de riego a turnos y caracterización de su flexibilidad / Optimal design of irrigation network shifts and characterization of their flexibility. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(1).
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., Hanasaki, N., Wada, Y., Zhang, X., Zheng, C., Alcamo, J., & Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*, 5(6), 545–559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>
- Liu, W., Antonelli, M., Kummu, M., Zhao, X., Wu, P., Liu, J., Zhuo, L., & Yang, H. (2019). Savings and losses of global water resources in food-related virtual water

- trade. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(1), e1320.
<https://doi.org/10.1002/WAT2.1320>
- López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., & Moratalla, A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 85(1–2), 15–26.
<https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2006.03.014>
- Ma, J., & González, F. (2012). *Determinación de las necesidades de riego de los cultivos*.
- Majidi, M., Alizadeh, A., Vazifedoust, M., Farid, A., & Ahmadi, T. (2015). Analysis of the Effect of Missing Weather Data on Estimating Daily Reference Evapotranspiration Under Different Climatic Conditions. *Water Resources Management*, 29(7).
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0782-0>
- Meyer, A. (1926). *Ueber einige Zusammenhänge zwischen Klima und Boden in Europa*.
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000092038>
- Muhammad, M. K. I., Nashwan, M. S., Shahid, S., Ismail, T. bin, Song, Y. H., & Chung, E. S. (2019). Evaluation of empirical reference evapotranspiration models using compromise programming: A case study of Peninsular Malaysia. *Sustainability (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/su11164267>
- Ortiz-Gómez, R., Flowers-Cano, R. S., & Medina-García, G. (2022). Sensitivity of the RDI and SPEI Drought Indices to Different Models for Estimating Evapotranspiration Potential in Semiarid Regions. *Water Resources Management*, 36(7).
<https://doi.org/10.1007/s11269-022-03154-9>
- Palerm Viqueira, J. (2020). Caracterización de los módulos de los distritos de riego y presencia de organizaciones locales. *Región y Sociedad*, 32, e1335.
<https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1335>
- Pedrozo Acuña, A. (2022). Escasez de agua, disponibilidad y agricultura. *Perspectivas IMTA*, 3(22). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2022-22>
- Peng, L., Li, Y., & Feng, H. (2017). The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China. *Scientific Reports*, 7(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-05660-y>
- Pratap, S., & Markonis, Y. (2022). The response of the hydrological cycle to temperature changes in recent and distant climatic history. *Progress in Earth and Planetary Science* 2022 9:1, 9(1), 1–37. <https://doi.org/10.1186/S40645-022-00489-0>
- Priestley, C. H. B., & Taylor R. J. (1972). *On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters*.
- Ramón, L. V., & Nazario, A. G. (2017). *INFRASTRUCTURE MAINTENANCE IN THE IRRIGATION DISTRICTS OF MEXICO*. <https://doi.org/10.2495/ECO170011>

- Rezaei, M., Valipour, M., & Valipour, M. (2016). Modelling Evapotranspiration to Increase the Accuracy of the Estimations Based on the Climatic Parameters. *Water Conservation Science and Engineering*, 1(3). <https://doi.org/10.1007/s41101-016-0013-z>
- Robertson W., & Baier W. (1965). Estimation of Latente Evaporation from Simple Weather Observations. In *Ont. Can. j. Plant Sci* (Vol. 45).
- Rohwer, C., & Rohwer, G. (1931). *EVAPORATION FROM FREE WATER SURFACES*.
- Romero, R. G. M., Aguilar, G. R., & López, S. J. A. (2020). Impact of automatization of irrigation: Case study. *Computacion y Sistemas*, 24(2), 911–920. <https://doi.org/10.13053/CyS-24-2-3412>
- Rossman, L. A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., & Janke, R. (2000). *Manual del usuario de EPANET 2.2*.
- Salam, R., Islam, A. R. M. T., Pham, Q. B., Dehghani, M., Al-Ansari, N., & Linh, N. T. T. (2020). The optimal alternative for quantifying reference evapotranspiration in climatic sub-regions of Bangladesh. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77183-y>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023, November 24). *Hablemos de... la agricultura en México (Parte 1)*. 29 de Junio. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/hablemos-de-la-agricultura-en-mexico-parte-1>
- Singh Rawat, K., Kumar Singh, S., Bala, A., & Szabó, S. (2019). Estimation of crop evapotranspiration through spatial distributed crop coefficient in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.002>
- Smith Martin. (1992). CROPWAT. *Irrigation and Drainage Paper* 46.
- Sotelo Gilberto. (2002). *Hidráulica General - Gilberto Sotelo Ávila, Vol. 1* (Vol. 1).
- Sweers, H. E. (1976). A nomogram to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *Journal of Hydrology*, 30(4), 375–401. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(76\)90120-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90120-7)
- Tabari, H., & Talaei, P. H. (2011). Local Calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor Equations for Estimating Reference Evapotranspiration in Arid and Cold Climates of Iran Based on the Penman-Monteith Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(10), 837–845. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000366](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000366)
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. <https://doi.org/10.2307/210739>

- Trajkovic, S. (2007). *Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions*.
<https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94372007133:138>
- Waller, P., & Yitayew, M. (2016). *Irrigation and Drainage Engineering*. 2016.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-05699-9>
- Wayan S., Saparuddin, Arafat, Y., Lipu, S., Rustiati, N. B., & Putu Hendra Adi Pratama, I. (2023). The Performance of Thirty-Eight Evapotraspiration Methods against the Penman Montieth Method. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, 11(1).
<https://doi.org/10.36909/jer.13251>
- WMO. (1966). *Measurement and Estimation of Evaporation and evapotranspiration*.
- Wu, F., Guan, Z., & Huang, K.-M. (2022). Protected Agriculture in Mexico. *EDIS*, 2022(6). <https://doi.org/10.32473/edis-fe1124-2022>
- Wu, H., Zhu, W., & Huang, B. (2021). Seasonal variation of evapotranspiration, Priestley-Taylor coefficient and crop coefficient in diverse landscapes. *Geography and Sustainability*, 2(3). <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.09.002>
- Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. In *Agricultural Water Management* (Vol. 232). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>
- Xu, C.-Y., & Singh, V. P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. In *HYDROLOGICAL PROCESSES Hydrol. Process* (Vol. 15).
- Yang, Y., Chen, R., Han, C., & Liu, Z. (2021). Evaluation of 18 models for calculating potential evapotranspiration in different climatic zones of China. *Agricultural Water Management*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106545>
- Zhao, J., Guo, J., Xu, Y., & Mu, J. (2015). Effects of climate change on cultivation patterns of spring maize and its climatic suitability in Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202, 178–187.
<https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2015.01.013>
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2013). Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad. *EDIS*, 2013(2).
<https://doi.org/10.32473/edis-ae496-2013>

Tariácuri Márquez Álvarez

Diseño de sistema de riego presurizado para el Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:522250063

Fecha de entrega

3 nov 2025, 9:37 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

3 nov 2025, 9:45 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Diseño de sistema de riego presurizado para el Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queré....pdf

Tamaño del archivo

4.0 MB

92 páginas

21.925 palabras

112.741 caracteres

18% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 11%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	MAESTRIA EN INGENIERIA DE LOS RECURSOS HIDRICOS	
Título del trabajo	Diseño de sistema de riego presurizado para el Módulo 1 del Distrito de Riego 020 (Morelia-Queréndaro)	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	ING. TARIÁCURI MÁRQUEZ ÁLVAREZ	1612621a@umich.mx
Director	DR. CONSTANTINO DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ	dsanchez@umich.mx
Codirector	DR JOEL HERNANDEZ BEDOLLA	joel.hernandez@umich.mx
Coordinador del programa	DRA SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE	quispe@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	TARIÁCURI MÁRQUEZ ÁLVAREZ 
Lugar y fecha	MORELIA MICHOACÁN A 7 DE NOVIEMBRE DEL 2025