



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Tendencia de la evapotranspiración en
Cuautilán Izcalli, México y su importancia en
las actividades agrícolas**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRÍCOLA**

P R E S E N T A:

MIGUEL MEJIA MUÑOZ

ASESOR: Dr. GUSTAVO MERCADO MANCERA

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN



ASUNTO: VOTO APROBATORIO

UNAM
CUAUTITLÁN
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de: **Tesis**

Tendencia de la evapotranspiración en Cuautitlán Izcalli, México y su importancia en las actividades agrícolas

Que presenta el pasante: **Miguel Mejía Muñoz**

Con número de cuenta: **078338023** para obtener el Título de: **Ingeniero Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 22 de agosto de 2023.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Gustavo Mercado Mancera	
VOCAL	Dr. Julio Cesar Corzo Sosa	
SECRETARIO	Dra. Martha Elena Domínguez Hernández	
1er. SUPLENTE	Ing. Israel Arteaga Escamilla	
2do. SUPLENTE	M. en C. Nancy Berenice Martínez Valles	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

MCVB/ntm*

*Si nuestro paso por esta vida,
no deja huellas positivas en las personas
que coincidieron en nuestro existir,
triste y vano ha sido nuestro vivir,
pues al final,
no hay mayor satisfacción
que aquellos que han caminado a tu lado
te recuerden;
con cariño, respeto y admiración,
pues nuestro paso por la vida es efímero
y las riquezas y los títulos obtenidos no son nada,
comparados con la amistad, el amor, el cariño
y el respeto sinceros
de aquellos que te rodean.*

Miguel Mejia Muñoz

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios, dador de la vida, la inteligencia, la sabiduría y todo lo que existe. Por regalarme el don del existir.

A mis profesores de todos los grados, desde la primaria hasta la Universidad, pues cada uno de ellos contribuyeron con sus conocimientos para construir las bases para mi formación académica.

A mi Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme cobijado en sus aulas y proporcionarme los conocimientos que hoy hacen posible este trabajo.

A los profesores; Ma. Elena Quintana Sierra, José Luz Hernández Castillo, Abel Bonfil Campos, Juan Manuel Arrijoja Guerrero, Celia Elena Valencia Islas, por su apoyo y motivación en esta última etapa de mi carrera.

Al Dr. Gustavo Mercado Mancera por creer en mí y aceptar ser mi asesor de tesis, así como por proporcionarme su apoyo incondicional y el material estadístico de la estación meteorológica utilizado en este estudio.

A mis compañeros de carrera, que de una o de otra manera, me motivaron para continuar en la lucha por terminar mis estudios ; en especial a: Luz Domínguez, Carmen Zaragoza, Alicia Cortez, Dora Alicia, Juan Carlos Rodríguez, Cesar Viñas, Oscar Peralta, Luis Clemente, Hvacuc Hernández, José Luis Venegas, (zapata), Arturo, Gerardo Cisneros, Alejandro Moreno, Raymundo Juárez, Silvino, Juan S. Alcocer, Mario Hernández, Martin Valencia, Jimmy Valencia, Isidro Rencillas y tantos otros más que escapan de mi memoria. Por sus consejos y motivación para la realización de esta tesis.

A mis hermanos; Amalia, David, Clemente, Pedro, Ignacio[†], Salvador, Guadalupe y Enrique, por su amor, cariño y confianza en mí, así como por su apoyo. Gracias por sus consejos, por existir, por ser mis hermanos y por compartir sus vivencias conmigo.

DEDICATORIA

A mis padres: Ma. Elena Muñoz Camargo y Sostenes Mejía Gonzales⁺ que, con su inmenso amor, cariño, dedicación y ejemplo, supieron sembrar en mí el respeto y el amor a Dios, a las personas y a toda la creación; y que a pesar de las limitaciones económicas con un gran esfuerzo me dieron la oportunidad del estudio, haciéndome saber que todo es posible, con trabajo, esfuerzo y dedicación.

A mi esposa: Rosa María Santiago Hernández, que siempre me ha apoyado en todos mis proyectos y que sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible.

A mis hijos: Miguel Ángel, Maribel y Sostenes Abraham Mejía Santiago. Como una muestra de amor, Pues ellos son mi más grande tesoro y mi razón de existir. Recuerden que la vida nos presenta obstáculos y el reto es superarlos.

En memoria de mi padre⁺

SOSTENES MEJIA GONZALEZ

Gracias, papá por hacer de mí una persona de bien.

Dios te bendiga ahí donde estas.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>i</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>ii</i>
RESUMEN	<i>iii</i>
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.1.1. Objetivos particulares	2
1.2. Hipótesis	2
II. ANTECEDENTES	3
2.1. Definición de evapotranspiración y su importancia agronómica	3
2.1.1. Evapotranspiración potencial	5
2.1.2. Evapotranspiración de referencia	6
2.1.3. Evapotranspiración real, actual o efectiva	7
2.1.4. Métodos de cálculo de la evapotranspiración	9
2.2. Balance hídrico	18
2.3. Aplicaciones de la evapotranspiración en la agricultura	22
2.4. Investigaciones previas del tema	24
2.5. Localización del área de estudio	30
2.6. Descripción edafoclimática del área de estudio	31
III. MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1. Metodología	32
3.1.1. Variables evaluadas	32

	Página
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1. Evapotranspiración potencial	33
4.2. Balance hídrico	37
4.3. Importancia de la ETP en la agricultura	38
V. CONCLUSIONES	43
VI. LITERATURA CITADA	44
ANEXOS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Tanque de evaporación Tipo Clase A (Archivo personal)	11
Figura 2.	Localización del municipio de Cuautitlán Izcalli. México (Infoabe, 2022)	30
Figura 3.	Vista de la estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM (Archivo personal)	31
Figura 4.	ETP (cm) mensual por varios métodos. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM	34
Figura 5.	ETP (mm) total anual obtenida por el método del Tanque. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM	36
Figura 6.	Balance hídrico (mm) promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM	38

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Métodos para la estimación de la evapotranspiración (Aguilera y Martínez, 1990)	9
Tabla 2.	Coefficiente de ajuste C para estimar la evapotranspiración potencial en función de la evaporación medida del tanque tipo A (Cisneros, 2003)	13
Tabla 3.	Cálculo de la ETP mensual promedio por los diferentes métodos evaluados	33
Tabla 4.	ETP (mm) total anual. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM	35
Tabla 5.	Balance hídrico (mm) promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM	37

RESUMEN

La evapotranspiración es una variable de suma importancia dentro de las prácticas agrícolas, ya que permite definir las necesidades hídricas que tienen los cultivos para un óptimo desarrollo e involucra dos procesos que suceden de forma simultánea, la evaporación y la transpiración. El objetivo de este trabajo fue calcular la ETP para el área de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Para el cálculo de la evapotranspiración, se utilizaron los datos del periodo de julio de 1988 a diciembre del 2022 obtenidos en la estación meteorológica Almaraz, de la FES- Cuautitlán; en particular se consideraron los datos promedio mensual de temperatura media, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, evaporación, presión atmosférica y precipitación mensual; asimismo, se emplearon los métodos de Penman, Penman-Monteith, Thornthwaite y el Tanque de evaporación. Los resultados permitieron observar que la ETP calculada a partir del método del Tanque, presenta una curva con gran similitud en relación con los métodos de Penman y Penman-Monteith, sin embargo, los valores calculados por estos últimos fueron los más altos; mientras que con el método de Thornthwaite se obtuvieron los menores valores de ETP, lo que permite señalar que subestima este valor. El método del Tanque de evaporación proporcionó valores en un rango intermedio entre los cuatro métodos empleados en esta investigación, datos que se acercan más a lo observado en campo, por lo cual, el método del Tanque se considera un procedimiento confiable para obtener la ETP bajo las condiciones ambientales del área de estudio.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los problemas a nivel mundial que preocupa a la comunidad científica es la creciente escasez de recursos hídricos ocasionada entre otros factores por una variación considerable en los últimos años de los ciclos pluviales, lo que afecta directamente los rendimientos de los cultivos agrícolas y como consecuencia la producción de alimentos necesarios para una población en constante crecimiento. En México, la problemática no es menor, ya que se considera que el 61% de la superficie está clasificada como zonas áridas o semiáridas, estas zonas están caracterizadas por una baja precipitación, con la consecuente baja productividad en sus áreas agrícolas (Mercado, 2006).

Es por esta razón es que surge la necesidad de encontrar métodos y técnicas adecuadas para el aprovechamiento óptimo de este recursos; sobre todo en aquellas regiones donde la precipitación es baja.

Uno de los datos importantes para el manejo del agua con fines de riego y para conocer la respuesta fenológica de las plantas al déficit hídrico, es el conocimiento de la evapotranspiración (ET) definida como la cantidad de agua perdida por evaporación del suelo y la traspiración de las plantas (FAO, 1990). La escasez de agua limita la productividad de los ecosistemas naturales y agrícolas. Ya que el agua es el solvente y transporte universal de las células, que ejerce un efecto refrigerante en todas las plantas y que además es el donador de electrones en la reacción de Hill. Por lo tanto, es de esperar que el estrés por falta de agua afecte a cualquiera de estos niveles, de modo que se puede pensar que las plantas están capacitadas para percibir el estrés, transformarlo en una señal y luego responderla (Mercado, 2006).

En este sentido, determinar el balance de agua disponible para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, es de vital importancia para obtener el rendimiento óptimo de las plantas, por lo tanto, el estudio de la tendencia de la evapotranspiración en una región o área específica apoyará para establecer este balance hídrico, que, a su vez, permitirá el uso adecuado y la aplicación del riego agrícola. Por lo tanto, se plantearon los siguientes objetivos.

1.1. Objetivo general

- Analizar la tendencia de la evapotranspiración en Cuautitlán Izcalli, Estado de México y su importancia en las actividades agrícolas.

1.1.1. Objetivos particulares

- Aplicar cuatro métodos para determinar la evapotranspiración potencial en el área de Cuautitlán Izcalli, México, con datos climáticos de 1988 a 2022.
- Comparar los resultados de evapotranspiración obtenidos por cuatro métodos de cálculo en el área de estudio.
- Calcular el balance hídrico en función de la relación de precipitación y evapotranspiración.
- Señalar la importancia y aplicación de los datos de evapotranspiración en las actividades agrícolas.

1.2. Hipótesis

- El cálculo de la evapotranspiración es un apoyo para la planeación de las actividades agrícolas.

II. ANTECEDENTES

A continuación, se enunciarán las definiciones de evapotranspiración (ET) y su importancia en las actividades agrícolas, además de puntualizar algunas investigaciones realizadas con relación al uso de este parámetro agroclimático.

2.1. Definición de evapotranspiración y su importancia agronómica

Se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (FAO, 1990).

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada (*Ídem*). También el agua en estado sólido (nieve, hielo, etc.) puede pasar directamente a vapor y el fenómeno se llama sublimación (Custodio y LLamas, 1976, citados por Hammerly, 2001).

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera, por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (SMEAP, 2023).

En la evapotranspiración (ET), la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie de este. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el terreno. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando éste lo cubre totalmente, la transpiración se convierte en el proceso

principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (FAO, 1990).

La transferencia de vapor de agua a través del proceso de evapotranspiración (ET) es un proceso clave dentro del balance hídrico y energético de la superficie terrestre. Una estimación cuantitativa adecuada del flujo de ET a través del continuo suelo-cultivo, es además un requisito previo para la programación del riego, la previsión del rendimiento de los cultivos y la modelización hidrológica y de la circulación global. Recientemente se ha avanzado considerablemente en el conocimiento de los procesos físicos y biológicos que determinan la tasa de evaporación. Sin embargo, la estimación cuantitativa de la ET, especialmente a gran escala regional, sigue siendo una tarea difícil (Itier y Brunet, 1996, citado por Hupet y Vanclouster, 2001). Para estimar la ET se adoptan enfoques empíricos (Doorenbos y Pruitt, 1977) y otros enfoques más bien basados en la física (Shuttleworth y Wallace, 1985, citados por Hupet y Vanclouster, 2001).

Los factores que intervienen en el proceso de evapotranspiración (ET) son diversos, variables en el tiempo y en el espacio y se pueden agrupar en aquellos de orden climático, los relativos a la planta y los asociados al suelo (Vargas, 1963; Salgado, 1966; Manríquez, 1971; Tosso, 1972; Rojas, 1994). Esta diversidad de factores, por una parte, ha dado lugar a distintas orientaciones al abordar el complejo fenómeno y diferentes respuestas ante su estimación; ha favorecido, por otro lado, el desarrollo de una serie de conceptos tendientes a lograr una mayor precisión de ideas al referirse al fenómeno y surgen como un intento de considerar las distintas condiciones de clima, suelo y cultivo prevalecientes en el momento en que el fenómeno ocurre. Estas definiciones o conceptos, entre otros, son: uso consuntivo, evapotranspiración potencial, evapotranspiración de referencia o del cultivo de referencia, evapotranspiración real y cultivo de referencia.

Los primeros estudios que abordaron el tema del riego hablaron de utilización consuntiva, cantidad de agua que se expresaba en metros cúbicos por hectárea regada. Luego, en 1941, la División de Riego del ministerio de agricultura de los Estados Unidos y la Oficina Planificadora de Recursos Nacionales, definieron el concepto de uso consuntivo o evapotranspiración como la suma de los volúmenes del agua utilizada para el crecimiento

vegetativo de las plantas en una superficie dada, tanto en la transpiración como en la formación de tejidos vegetales y de la evaporada por el terreno adyacente, ya sea proveniente de la nieve o de las precipitaciones caídas en un tiempo dado (Salgado, 1966, citados por Parra (2012). Blaney y Criddle (1952) citados por Parra (2012), definieron al uso, consumo o evapotranspiración, en términos muy similares a los anteriores como la suma de los volúmenes de agua usados por el crecimiento vegetativo de una cierta área, por conceptos de transpiración y formación de tejidos vegetales y evaporada desde el suelo adyacente, proveniente de la nieve o precipitación interceptada en el área en cualquier tiempo dado, dividido por la superficie del área (Vargas, 1963; Salgado, 1966; Blogspot.com, 2013).

2.1.1. Evapotranspiración potencial

Existe acuerdo entre los diversos autores al definir la evapotranspiración potencial (ETP), concepto introducido de manera paralela tanto por Charles Thornthwaite como por Penman en 1948, desde entonces este concepto es ampliamente utilizado y ha tomado gran importancia para los estudios geográficos sobre climatología mundial, y en general en investigaciones hidrológicas y en la predicción de necesidades de agua para la agricultura, tanto en condiciones de temporal, como de riego. Así, es frecuente ver clasificaciones de índices de aridez en función de la P_p/ETP . También se usa como variable en correlaciones para estimar el rendimiento de los cultivos, incluso se considera para definir la aridez en los estudios de recarga (Domingo (2003) citado por Mercado, 2006).

La ETP se define como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación (pasto corto que ensombrece totalmente el suelo), que se desarrolla en óptimas condiciones, y en el supuesto caso de no existir limitaciones en la disponibilidad de agua, suelo a capacidad de campo (Vargas, 1963; Salgado, 1966; Millar, 1972; Manríquez, 1971; Rovira, 1976; Sánchez, 2001).

La ETP no puede ser nunca superior a la de una superficie libre de agua en las mismas condiciones meteorológicas. Pruitt y Lawrence (1968) citados por Tuñón (2000), midieron en cultivos de centeno en Davis, California, USA, que la cantidad de agua utilizada era del 80% de la evaporada por el tanque de evaporación, excepto cuando los vientos eran fuertes y el aire seco y cálido, aunque en ese caso las plantas consumen relativamente menor cantidad

de agua, debido aparentemente a una mayor resistencia de los estomas (Mercado, 2006). En las grandes planicies de los Estados Unidos y en muchas otras regiones áridas, los cultivos regados adecuadamente que ejercen una débil cubierta resistente pueden consumir más energía y transpirar más agua que la evaporada por una superficie libre de agua. Según esta definición, la magnitud de la ETP está regulada solamente por las condiciones meteorológicas o climáticas, según el caso, del momento o período para el cual se realiza la estimación.

El concepto de ETP es ampliamente utilizado y desde su introducción ha tenido gran influencia en los estudios geográficos del clima mundial; de hecho, su diferencia respecto de las precipitaciones (Pp-ETP) ha sido frecuentemente usada como un indicador de humedad o aridez climática. También ha influido sobre la investigación hidrológica (Rosenberg *et al.*, 1983) y ha significado el mayor avance en las técnicas de estimación de la evapotranspiración (Sánchez, 1992).

2.1.2. Evapotranspiración de referencia

La cuantificación de la evapotranspiración de referencia de los pastos (ET_o) es necesaria para la producción de cultivos, la gestión de los recursos hídricos, la programación del riego, la evaluación de los efectos del cambio de uso de la tierra en el rendimiento hídrico y la evaluación ambiental. Dado que la medición directa de la ET_o es difícil, lenta y costosa, el procedimiento más común consiste en estimarla a partir de variables climáticas como la radiación solar, la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa (Irmak, 2003).

La evapotranspiración de referencia es un parámetro muy importante en los estudios hidrológicos, agrícolas y ambientales y se estima con precisión mediante la ecuación FAO Penman-Monteith (FAO-PM) en diferentes condiciones climáticas (Hargreaves, y Allen, 2003).

La noción de evapotranspiración de referencia (ET_o), ha sido establecida para reducir las ambigüedades de interpretación a que da lugar el amplio concepto de evapotranspiración y para relacionarla de forma más directa con los requerimientos de agua de los cultivos. Es

similar al de ETP, ya que igualmente depende exclusivamente de las condiciones climáticas, incluso en algunos estudios son considerados equivalentes (McKenney y Rosenberg, 1993), pero se diferencian en que la ETo es aplicada a un cultivo específico, estándar o de referencia. Doorenbos y Pruitt (1976) citados por Martínez (2005), introdujeron el término de evapotranspiración de referencia (ETo) como la tasa de evapotranspiración (ET) de una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 centímetros de altura, uniforme, de crecimiento activo, que sombrea totalmente el suelo y que no escasea de agua.

2.1.3. Evapotranspiración real, actual o efectiva

Aunque, las mayores precisiones alcanzadas con la incorporación de algunos de los conceptos anteriores, las condiciones establecidas por ellos no siempre se dan en la realidad, y aquella evapotranspiración que ocurre en la situación real en que se encuentra el cultivo en el campo, difiere de los límites máximos o potenciales establecidos. Para referirse a la cantidad de agua que efectivamente es utilizada por la evapotranspiración, se debe utilizar el concepto de evapotranspiración actual o efectiva, o bien, más adecuadamente, el de evapotranspiración real (ETr).

La ETr es más difícil de calcular que la ETP o ETo, ya que además de las condiciones atmosféricas que influyen en ellas, interviene la magnitud de las reservas de humedad del suelo y los requerimientos de los cultivos. Para determinar la (ETr) se debe corregir la ETP o ETo con un factor Kc (coeficiente de cultivo) dependiente del nivel de humedad del suelo y de las características de cada cultivo (Rovira, 1976; Rojas, 1994; Ortega *et al.*, 2000; Molina *et al.*, 2003).

El Kc es un coeficiente de ajuste que permite calcular la ETr a partir de la ETP o ETo. Estos coeficientes dependen fundamentalmente de las características propias de cada cultivo, por tanto, son específicos para cada uno de ellos y dependen de su estado de desarrollo y de sus etapas fenológicas, por ello, son variables a lo largo del tiempo. A partir de la curva del coeficiente del cultivo se puede determinar el valor de Kc para cualquier período en forma gráfica o numérica. Una vez determinados los valores de Kc, la evapotranspiración del cultivo ETc puede ser calculada multiplicando los valores de Kc por los valores correspondientes de ETo (Allen *et al.*, 2006). Dependen también de las características del

suelo y su humedad (Rovira, 1976; Rojas, 1994; Ortega *et al.*, 2000; Sánchez, 2001) así como de las prácticas agrícolas y del riego (Novoa, 1998 y 1999).

Se hace alusión a estos Kc en numerosas publicaciones, puesto que permiten conocer la ETr a partir de la ETP o ETo evitando el uso de métodos más precisos, pero de más difícil aplicación. Pueden encontrarse en literatura especializada o bien derivarse de acuerdo con los lineamientos establecidos por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977).

2.1.4. Métodos de cálculo de la evapotranspiración

Existe una diversidad de métodos utilizados para el cálculo de la ET, algunos de los cuales se consignan en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos para la estimación de la evapotranspiración (Aguilera y Martínez, 1990).

Año	Autor	Factores usados
1928	Hedke	Calor disponible
1942	Lowry y Jhonson	Calor efectivo
1942	Blaney y Morin	Temperatura, humedad relativa y duración del día.
1948	Thorntwaite	Temperatura y latitud.
1950	Blaney y Criddle	Temperatura y porcentaje de hora luz
1953	Turc	Temperatura y radiación.
1956	Hargreaves	Temperatura, humedad relativa y duración del día
1957	Makkink	Temperatura y radiación.
1963	Jensen y Haise	Radiación solar.
1964	Grassi y Christiansen	Temperatura, radiación y nubosidad.
1965	Brutsaert	Evaporación.
1966	Hargreaves	Temperatura, altitud, humedad relativa y horas Luz.
1970	Penman (combinada)	Temperatura, radiación y viento.
1971	Hargreaves	Temperatura, radiación, humedad relativa altitud y velocidad de viento.
1972	García y López	Temperatura y humedad relativa.
1976	Norero A.	Evaporación y precipitación

A continuación, se describen los métodos empleados en esta investigación.

- Método del tanque. El tanque evaporimétrico o tanque de evaporación mide la evaporación efectiva, es decir, la cantidad de agua que una masa líquida al aire libre pierde a través de su superficie por haberse convertido en vapor, durante un cierto periodo de tiempo.

Es uno de los métodos más utilizados a nivel mundial para la estimación de la evapotranspiración potencial (Rodríguez, 2017).

La ETo se puede estimar también de la evaporación del tanque evaporímetro Clase A. Los tanques han probado su valor práctico y han sido utilizados con éxito para estimar ETo observando la evaporación del tanque y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con la ETo. Sin embargo, para la aplicación de este método se deben tomar ciertas precauciones y debe estar garantizado un buen manejo del tanque (Allen, 2006).

El tanque de evaporación, propiamente dicho, es el tanque Clase A, adoptado por el INM (Instituto Nacional de Meteorología Española), dado que en los fenómenos de evaporación influyen entre otros, principalmente, el recorrido del viento, la temperatura, la humedad, la insolación, entre otras. Un tanque debe instalarse en una estación al lado de un anemómetro de recorrido y un pluviómetro y, considerar dentro del tanque un termómetro de extremas.

El tanque de evaporación es un recipiente circular de chapa galvanizada o de acero inoxidable, colocado sobre una tarima de madera que tenga aberturas para una buena ventilación. Le acompañan, como accesorios principales: el sistema medidor compuesto de un pozo tranquilizante y un tornillo con gancho (tornillo micrométrico), enroscado en su armadura y apoyado sobre el cilindro de reposo. Su diámetro es de 1.20 m y su altura de 25 cm. Una vez elegida la ubicación del tanque, se coloca en su interior el cilindro de reposo y se le llena de agua limpia hasta el nivel que lleva marcada el tanque, a 5 cm y 7.5 cm de su borde superior. En la superficie del agua se coloca un termómetro de extremas, provisto de un flotador para que no se hunda, pero de tal modo que haya al menos un centímetro de agua entre el termómetro y el nivel del agua. El pluviómetro se instalará al lado del tanque, a 1.50 m del suelo, pero siempre que este a menos de unos dos metros de distancia del tanque. El anemómetro de recorrido se coloca en una esquina de la tarima, con sus cazoletas a 60 cm del suelo (Meteored, 2006).

El tanque de evaporación tipo Clase A (Figura 1) permite estimar los efectos combinados de radiación solar, viento, temperatura y humedad sobre la evaporación de una superficie de agua libre. De un modo análogo, la planta responde a las mismas variables climáticas. Este

método permite relacionar la evaporación del agua del tanque con la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) (Inia.org.uy, 2023).

Para muchos autores, la evaporación desde una superficie de agua libre es el mejor integrador de los factores climáticos; a partir de este hecho, numerosas investigaciones han demostrado una estrecha relación entre la evapotranspiración de una superficie cultivada y la evaporación desde superficies de agua libre, puesto que ambos fenómenos se ven afectados por los mismos factores meteorológicos o climáticos (Salgado, 1963; Vargas, 1963; Córdova, 1974; Tosso, 1974; Ferreira y Valenzuela, 1975). Conocer esta relación representa una forma simple y rápida de saber cuándo y cuánto regar (Sánchez, 2001).

El uso de este método ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para calcular la ET_o, dado que la medida de la evaporación integra el efecto de la radiación, viento, temperatura y humedad para un lugar específico. En algunos trabajos experimentales, los valores de evaporación medidos en el tanque tipo A afectados por sus correspondientes factores de corrección, se han utilizado para calcular el volumen de agua de riego a reponer en los cultivos (Tijerina, 2000; González y Hernández, 2000, citados por González *et al.*, 2012).



Figura 1. Tanque de evaporación Tipo Clase A (Archivo personal).

Existe una íntima relación entre los procesos de evapotranspiración del cultivo y la evaporación del Tanque Clase A por lo que este método es de gran utilidad para establecer un programa de riego en una zona determinada (Inia.org.uy, 2023).

• Pruitt y Lawrence 1968 (citados por Mercado, 2006) midieron en cultivos de centeno en Davis (California) que la cantidad de agua utilizada era del 80% de la evaporada por tanque de evaporación, excepto cuando los vientos eran fuertes y el aire seco y cálido. El método propuesto utiliza la siguiente ecuación:

$$\mathbf{ETP = Evap * C}$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración Potencial.

Evap = Evaporación obtenida en el Tanque de evaporación Tipo A.

C = Coeficiente adimensional.

El coeficiente del tanque o coeficiente C, es una fracción de la evaporación del tanque, que hace referencia a la evaporación del cultivo, éste está sujeto a diversos factores como el estado de conservación, el tamaño, forma, color, lámina de agua, dificultad para leer la evaporación durante las lluvias, entre otros factores, todos ellos influyen en el balance energético y en los valores registrados (Ortiz *et al.*, 2018). A su vez, la estimación del coeficiente puede variar (entre 0.40 y 0.85), esta variación se le atribuye a la ubicación del tanque y/o las condiciones físicas y ambientales que rodean al tanque (Allen *et al.*, 2006; citado por Ortiz *et al.*, 2020).

En la Tabla 2, se presentan los valores del coeficiente C de acuerdo con las condiciones en las cuales se encuentra instalado el tanque de evaporación.

Tabla 2. Coeficiente de ajuste C para estimar la evapotranspiración potencial en función de la evaporación medida del tanque tipo A (Cisneros, 2003).

Tanque rodeado de vegetación o cultivo				
Viento (km d⁻¹)	Radio de la cubierta (m)	Humedad relativa (%)		
		Baja < 40	Medio 40-70	Alto > 70
Ligero < 175 km d ⁻¹	0	0.55	0.65	0.75
	10	0.65	0.75	0.85
	100	0.70	0.80	0.85
	1000	0.75	0.85	0.85
Moderado 175–425 km d ⁻¹	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.60	0.70	0.75
	100	0.65	0.75	0.80
	1000	0.70	0.80	0.80
Fuerte 425-700 km d ⁻¹	0	0.45	0.50	0.60
	10	0.55	0.60	0.65
	100	0.60	0.65	0.70
	1000	0.65	0.70	0.75
Muy fuerte > 700 km d ⁻¹	0	0.40	0.45	0.50
	10	0.45	0.55	0.60
	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.55	0.60	0.65
Tanque rodeado de tierra seca				
Viento (km d⁻¹)	Radio del área desnuda (m)	Humedad relativa media (%)		
		Bajo < 40	Medio 40-70	Alto > 70
Ligero < 175 km d ⁻¹	0	0.70	0.80	0.85
	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.50	0.60	0.70
Moderado 175 - 425 km d ⁻¹	0	0.65	0.75	0.80
	10	0.55	0.60	0.70
	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.45	0.55	0.60
Fuerte 425-700 km d ⁻¹	0	0.60	0.65	0.70
	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.45	0.50	0.60
	1000	0.40	0.45	0.55
Muy fuerte > 700 km d ⁻¹	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.40	0.45	0.50
	1000	0.35	0.40	0.45

- Método de Thornthwaite. Este método fue desarrollado para el territorio de los Estados Unidos y actualmente es uno de los más utilizados a nivel mundial, juntamente con el método de Penman-Monteith, este último ha sido aceptado a nivel global después de una consulta de expertos realizada en mayo de 1990, por la FAO como método estándar para la estimación de la evapotranspiración (Allen *et al.*, 2006).

A Thornthwaite se le considera como uno de los pioneros en los trabajos de investigación de la evapotranspiración potencial, su método fue expuesto en el año de 1931. Obtuvo su fórmula empíricamente, basándose en investigaciones sobre el crecimiento de vegetales; al comprobar que este crecimiento se daba en función de los intercambios de agua, entre plantas y atmósfera, empleó el concepto de Evapotranspiración Potencial, referido este a un suministro óptimo de agua en el desarrollo de los vegetales, basado en datos obtenidos en cajas lisimétricas y relacionándolos con datos climatológicos (temperatura) y datos astronómicos (duración del día). Mediante el proceso en mención obtuvo la siguiente expresión matemática (*Ídem*).

El método de Thornthwaite calcula un índice de calor mensual (*I*) a partir de las temperaturas diarias del aire, según la formula:

$$I=(t/5)^{1.514}$$

Una vez obtenido el índice de calor mensual, se obtiene el índice de calor anual (I) como la suma de los doce valores del índice de calor mensual, para años teóricos de doce meses y doce horas diarias de sol.

Con base en el índice de calor anual obtenido a partir de la temperatura promedio mensual se propone la siguiente fórmula (Thornthwaite, 1948), este método fue modificado por Camargo *et al.* (1999).

$$T_{ef} = 0,35 \times (3 \times T_{\max} - T_{\min})$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514}$$

$$0,49239 + 0,0179 \times I - 0,0000771 \times I^2 + 0,000000675 \times I$$

$$E = 1,6 \times \left(\frac{10 \times T_{ef}}{I} \right)^a \quad \text{si } T < 26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E = -415,85 + 32,24 \times T_{ef} - 0,43 \times T_{ef}^2 \quad \text{si } T > 26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$ET_o = E \times \frac{Nd \times Nh}{360}$$

Donde:

I: es el índice de calor anual.

T_i: la temperatura promedio mensual (°C).

T_{ef}: la temperatura efectiva (°C).

E: la evapotranspiración mensual sin ajustar (mm m⁻¹).

N_d: el número de días del mes.

N_h: la duración astronómica del día (h).

ET_o: la evapotranspiración mensual corregida (mm mes⁻¹).

- Método de Penman. El método de Penman es difícil de implementar debido a la información requerida, sin embargo, por su desarrollo teórico, es una metodología muy interesante (Barco *et al.*, 2000).

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y obtuvo una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de insolación solar (horas sol), temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método fue desarrollado posteriormente y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia (Santana, 2008). Debido a que el suministro de energía y el transporte de vapor son limitantes, es necesaria la combinación de los métodos de balance de energía y aerodinámico para dar un

valor estimado de la evaporación (E), esta ecuación fue inicialmente desarrollada por Penman en 1948 y está dada por:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E\gamma + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E\alpha$$

Para grandes áreas, las consideraciones de balance de energía dominan la tasa de evaporación. Priestley - Taylor determinaron que el segundo término de la ecuación del balance de energía es aproximadamente un 30% del primero, así:

$$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E\gamma$$

Donde:

$\alpha = 1.3$, pero varía levemente para otras localidades.

γ = es la constante sicrométrica, la cual se expresa como

$$\gamma = \frac{c_p K h P}{0.6221 l_v K w}$$

c_p = es el calor específico a presión constante; usualmente este valor es de 1004 **J/kg •K**.

P = es la presión atmosférica.

l_v = es el calor latente de vaporización, dado por,

$$l_v = 2.501 * 10^6 - 2.370T \quad \text{expresado en } J/kg.$$

Δ = es la pendiente de la curva de presión de saturación del vapor a la temperatura de aire, expresada como:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(237.3 + T)^2}$$

la pendiente esta en **Pa/°C**,

T = es la temperatura del aire en **°C**. $K h/Kw$ es la relación entre las difusividades de calor y el vapor, se toma comúnmente como 1 (Priestley y Taylor, 1972).

e_s = la presión de vapor de saturación en **Pa** y los otros términos y unidades ya fueron definidos anteriormente (Barco *et al.*, 2000).

- Método de Penman-Monteith. La fórmula de Penman-Monteith ha sido reportada por equipos de investigación (americanos: Comité de Requerimientos de Agua para Riego de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en ingles) y europeos: por la Comunidad Europea, (consorcio de institutos de investigación europeos)) como aquella que produce resultados relativamente exactos y consistentes tanto en climas áridos como en húmedos. El análisis del funcionamiento y la dispersión de resultados obtenidos por varios métodos de cálculo revela la necesidad de formular un único método estándar para el cómputo de la ETo. Dado el mejor comportamiento y consistencia del método FAO Penman-Monteith en el ámbito global, este es el único que se recomienda como método estándar de cálculo. Esto se debe a que existe una elevada probabilidad de que este método prediga correctamente los valores de ETo en una amplia gama geográfica y climática y cuenta con previsiones para su uso en situaciones de falta de datos. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) recomienda utilizar el método estándar Penman-Monteith, para determinar ETo, debido a que este método se ajusta tanto a zonas áridas como templadas y tropicales (Allen *et al.*, 2006). Proporciona estimaciones de la evapotranspiración de referencia (ETo) para la planificación y el uso eficiente de los recursos hídricos agrícolas (Hou *et al.*, 2013).

Este método determina ETo con base en tres componentes:

- Resistencia aerodinámica (demanda evaporativa de la atmósfera estimada en función de las variables climatológicas: temperatura promedio, máxima y mínima, humedad relativa, horas de luz solar, viento, altitud y latitud).

- Resistencia superficial del cultivo (flujo del agua por difusión desde las raíces hasta los estomas de la planta y de la evaporación directa del agua desde el suelo).

- Albedo (radiación solar reflejada por el cultivo); para el cultivo de referencia (pasto) de una altura de 0.12 m, bien regado y con una cobertura total de la superficie del suelo, la resistencia superficial estimada es de 70 s m^{-1} y la radiación solar reflejada o albedo de 0.23 (Allen *et al.*, 2006).

La ecuación de Penman-Monteith es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde:

ET_o: es la evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

Δ: es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹).

R_n: es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m² día⁻¹).

G: es el flujo de calor del suelo.

γ: es la constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

T: es la temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).

u₂: es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻²).

2.2. Balance hídrico

El comportamiento hidrológico y la capacidad de captación de agua de una cuenca hidrológica dependen de la variación temporal y espacial de los patrones de las variables climáticas, y de las características fisiográficas de la cuenca. Considerando que en ciertas regiones la disponibilidad del agua depende de la capacidad de captación de la cuenca, la utilización de métodos eficaces como los balances hídricos se ha hecho más recurrente, ya que permiten estimar y determinar el comportamiento hidrológico, su capacidad de captación y los flujos de agua, así como los procesos hidrológicos y los periodos en los cuales se presentan (Santillán *et al.*, 2013).

Los componentes principales del balance hídrico son: la precipitación, el caudal, la evapotranspiración y el almacenamiento de agua en todas sus formas (Sokolov y Chapman, 1981). Este balance es la formulación matemática de la ley de la conservación de materia aplicada al agua en un sistema dado; el sistema puede ser de cualquier tamaño, por ejemplo,

el volumen de suelo ocupado por una planta, una parcela cultivada, una cuenca hidrográfica, una región o un país (Claro, 1991).

El balance hídrico consiste en mantener un equilibrio entre la cantidad de agua que sale de un sistema y la cantidad de agua que entra en un periodo determinado. En el caso de la agricultura, el agua puede ingresar a un sistema de diferentes maneras: a través de la precipitación (Rotoplas, 2021), que es el agua meteórica que cae sobre la corteza terrestre, en forma líquida, sólida o semisólida. La otra manera es por medio del riego de agua, que se extrae de los acuíferos, lagos y ríos (De Goicoechea, 1969). El egreso puede darse de muchas otras formas, por ejemplo, por la evaporación, desvíos hacia otros canales o desagües. Es importante definir el balance hídrico porque es determinante en la vida de los cultivos, o para establecer el momento de realizar una plantación (Rotoplas, 2021). Su estimación permite conocer si existe un balance neto positivo, si se acumula agua, o negativo, si se pierde agua (Portillo, s/f.).

Para todo cultivo, es importante determinar la cantidad de agua que se va a necesitar, es decir, llevar a cabo un balance del agua, sobre todo en verano que es cuando el agua más escasea. Así, al conocer las necesidades que tendrá la plantación, el estado del agua en el suelo y las posibles temperaturas, podrá estimarse la cantidad de agua para cultivos que se necesitará, y de este modo planificar, en caso de ser necesario, cómo obtener reservas de agua para ello (Rotoplas, 2021).

A partir del conocimiento de la cantidad de agua que posee el suelo y la demanda de agua para riego de cultivos, se puede determinar el balance hídrico que debe hacerse, cómo influirán las precipitaciones, las temperaturas, para ver cómo completar el esquema de agua necesaria. Para mantener el balance hídrico, además de incluir las variables climáticas y establecer la capacidad de campo, se debe planificar y contar con un sistema adecuado de medición y con reservas de agua (*Ídem*).

El balance hídrico directo (BHD), es un método empírico que estima el balance de todo el sistema, utilizando el cálculo de la precipitación mensual y anual para el año hidrológico en análisis, y la estimación de la evapotranspiración potencial mensual y anual (Marini & Piccolo, 2000; citado por Del Toro *et al.*, 2014). El método supone que el agua del suelo se

va perdiendo conforme pasa el tiempo hasta agotar su reserva y así cubrir las necesidades hídricas del sistema. Este método consiste en estimar mes con mes los siguientes parámetros (Almorox, 2003, citado por Del Toro *et al.*, 2014).

- Precipitación (P), es el componente de mayor importancia, al ser el que aporta directamente el recurso hacia el sistema.

- Evapotranspiración potencial (ETP), se calculó mediante el método de Thornthwaite (1948), el cual brinda una aproximación de lo que se puede evapotranspirar en el sistema si éste no tuviera restricción alguna del recurso hídrico.

- P-ETP, al calcular esta diferencia entre las entradas y salidas potenciales de agua en el suelo, se pueden clasificar los meses húmedos (si $P > ETP$) y los meses secos (si $P < ETP$).

- Reserva de agua en el suelo (R), depende de las características físicas y biológicas del suelo (textura del suelo y cobertura vegetal). En algunos casos se puede utilizar como reserva máxima 100 mm (Thornthwaite, 1948), sin hacer diferencia entre el tipo de suelo y la cobertura vegetal. Se estima sumando los incrementos P-ETP sólo cuando son meses húmedos. A estos incrementos se le agrega la reserva del mes anterior al mes que se está calculando:

$$R = R_{i-1} + (P-ETP)$$

- Variación de la reserva (VR), se calcula con la diferencia entre la reserva del mes en el que se realiza el cálculo y la reserva del mes anterior:

$$VR = R_i - R_{i-1}$$

- Evapotranspiración real (ETR), se considera que es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes y depende estrechamente del volumen de agua disponible. Esto quiere decir que la P en el mes considerado y la R existente será el agua disponible para evaporar. Cuando la P cubre la demanda potencial (generalmente en el periodo húmedo), se puede decir que $ETR = ETP$.

Si la ETP excede a la P (periodo seco), el agua que se evapora será la de la P + VR (tomada como valor absoluto) se establece que la $ETR = P + VR$.

- Falta de agua (F), se considera como el volumen de agua faltante para cubrir las necesidades hídricas potenciales del sistema (para evapotranspirar).

$$F = ETP - ETR$$

- Exceso de agua (Ex), es el recurso que excede la reserva máxima y que se habrá perdido por escurrimiento superficial.

$$Ex = P - ETP - VR$$

- Desagüe (D), el exceso de agua se dirigirá hacia los cauces naturales y una parte engrosará el manto freático. Thornthwaite señaló que el 50% del excedente de agua de un mes en cuestión escurre hacia los ríos, mientras que el resto se infiltra.

$$D = 0.5 * (D_{i-1} + Ex)$$

Finalmente, la ecuación para estimar el balance hidrológico de la subcuenca es:

$$P = ETR + \text{infiltración} + \text{escurrimiento superficial}; \text{ o } P = ETR + D$$

Si la estimación en el balance es correcta, la precipitación será igual a la suma de la evapotranspiración real más el desagüe en el sistema (Del Toro *et al.*, 2014). El balance hídrico especifica que el total de agua que entra a un sistema debe ser igual a la suma del agua que sale de él, más la diferencia entre los contenidos final e inicial, es decir ingreso = egreso + saldo.

En síntesis, la información básica requerida para el cálculo del balance hídrico incluye los datos de precipitación, evapotranspiración, nivel de infiltración del suelo, consumo del cultivo, entre otros. En el caso de un suelo con vegetación el balance es (Claro, 1991):

$$P = ET + E + I + \Delta HS$$

En donde: P = Precipitación

ET = Evapotranspiración
E = Escorrentía
I = infiltración
 ΔHS = Cambio en la humedad del suelo ($H_f - H_i$)
Hf = Humedad final
Hi = Humedad inicial.

Una de las principales aplicaciones es planificar el aprovechamiento de los recursos hídricos, identificar períodos de déficit y suficiencia de agua en los cultivos, índices climáticos y agroclimáticos, planificación y operación del riego y el drenaje de los campos agrícolas, predicción de rendimientos agrícolas, zonificación de cultivos en secano, elaboración de calendarios agrícolas, predicción de inundaciones, sequías, incendios forestales y erosión del suelo (Claro, 1991).

2.3. Aplicaciones de la evapotranspiración en la agricultura

Su aplicación contribuye a asegurar la eficacia de la planificación de cultivos, minimizando riesgos y maximizando la cantidad y calidad de las cosechas.

La calidad y cantidad de la producción agrícola supone el control y supervisión de factores relevantes como las temperaturas, riego, fertilizantes o fungicidas. Sin embargo, existen otras variables menos conocidas, pero no menos importante, una de ellas es la evapotranspiración (Veto.cl, 2023). Esta sigue siendo uno de los elementos menos estudiados en el balance hidrológico, debido a la poca disponibilidad de datos de calidad y la incertidumbre respecto a la confiabilidad de los resultados generados por los diferentes métodos en su medición, relacionada en lo principal a un conocimiento insuficiente de sus características de variabilidad temporal y la sensibilidad a las variables meteorológicas necesarias para su cálculo (Contreras, 2015). La correcta estimación de la evapotranspiración es de gran importancia en estudios hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos donde se vincula el clima con el desarrollo de la vegetación, el consumo de agua de los ecosistemas y el cierre del balance hidrológico, razón por la cual es de suma importancia para los estudios de producción agrícola (Córdova *et al.*, 2013). Su aplicación contribuye a asegurar la eficacia

de la planificación de cultivos, minimizando riesgos y maximizando la cantidad y calidad de las cosechas (Hernández, 1993).

Los datos obtenidos permiten conocer el comportamiento del agua y su evolución dentro de una cuenca (el agua que ingresa con relación al agua que se pierde), conocido comúnmente como balance hídrico. Su estimación permite conocer si existe un balance neto positivo, si se acumula agua o existe excedentes de recursos, o negativo, si se pierde agua acumulada o recursos (Portillo, s/f.). Para los que estudian la evolución del agua, estos balances hídricos son muy importantes; estos estudios están centrados en la cuantificación de los recursos hídricos de una zona, es decir, todo el agua que llueve restada del agua que se pierde por evapotranspiración, será el volumen de agua que se tendrá disponible. También se debe tener en cuenta la cantidad de agua que se infiltra dependiendo del tipo de suelo o la existencia de acuíferos (*Ídem*).

La evapotranspiración es un componente fundamental del balance hídrico y un factor clave en la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera. Su cuantificación se hace precisa en contextos diferentes tales como la producción vegetal, la planificación y gestión de recursos hídricos o estudios ambientales y ecológicos (Hämmerly, 2001; Domingo y Villagarcía, 2003). Por lo cual su conocimiento permite de una o de otra manera determinar la demanda de agua de riego que requieren los cultivos de una zona específica. Por lo tanto, es muy importante en el ámbito de la agricultura, en este caso, la diferencia entre ETP y ETR puede marcar un déficit; en la agricultura se quiere que esta diferencia sea nula, ya que indicaría que las plantas siempre tienen el agua suficiente para transpirar cuando lo necesiten; así se ahorraría agua de riego y, por lo tanto, se reducen los gastos de producción (Portillo, s/f).

Además, es un parámetro importante para estudios meteorológicos e hidrológicos como también para la planificación y gestión de riego (Hupet y Vanclooster, 2001; Martínez *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2013; citados por Contreras, 2015). Además, es necesario cuantificarla para trabajos relacionados con la gestión de recursos hídricos o estudios ambientales (Rahimikhoob *et al.*, 2012; Tabari *et al.*, 2011; citado por Contreras, 2015).

El comportamiento del balance hídrico y la evapotranspiración es importante. En este conjunto la ET tiene un impacto directo en la agricultura y el comportamiento del balance hídrico influye en el adecuado cálculo de las cuotas de riego que los cultivos requieren para un desarrollo óptimo o para determinar las capacidades de absorción de humedad que posee un terreno, siendo los Hidrólogos e Ingenieros Agrónomos los que mayormente se ocupan de estos estudios (Veto.cl, 2023). El balance hídrico de una zona, tomando como base la velocidad de evapotranspiración, define a grandes rasgos el tipo de problema hídrico y asienta sólidas bases para la programación agrícola de dicha zona y para la planificación del uso y control de los recursos hídricos (Paoli, 1995).

Otra de las aplicaciones actuales en la agricultura tiene que ver con el manejo del agua en los cultivos bajo las diferentes técnicas de invernadero, ya que el tiempo de riego en mm día^{-1} se determina considerando la evapotranspiración del cultivo (Antúnez *et al.*, 2011).

Por último, pero no menos importante su aplicación para las estimaciones de requerimientos hidrológicos proyectados a largo plazo, ya que las variaciones de la ET a través del tiempo relacionadas a los efectos del cambio climático, permite el cálculo de las expectativas que se tendrán que afrontar en un futuro no muy lejano, entre ellas una mayor demanda del recurso agua (Mundo, 2015).

2.4. Investigaciones previas del tema

Se han realizado diversos estudios comparativos, tendientes a validar los diferentes modelos de estimación de ETo en diversas regiones y climas del mundo. Algunos de estos estudios son los siguientes.

McKenney y Rosenberg (1993) utilizaron un enfoque de simulación para generar estimaciones de la sensibilidad de la evapotranspiración potencial al cambio climático utilizando ocho métodos alternativos. Los métodos utilizados fueron: Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Priestley-Taylor, Penman, y Penman-Monteith. Las simulaciones se realizaron utilizando datos climáticos de cinco sitios en las Grandes Llanuras de Estado Unidos. Además, se aplicaron dos escenarios derivados

del cambio climático (GCM). Se encontró que los modelos poseen diferentes sensibilidades dependiendo de las variables meteorológicas de entrada en cada uno de ellos.

Gómez (2002) analizó la evapotranspiración para todo el territorio mexicano con el método de Penman mediante dos fuentes diferentes de datos para el año 2000; la primer fuente se obtuvo mediante la simulación de las variables meteorológicas del modelo numérico de la atmósfera MM5 (Grall *et al.*, 1994); en la segunda fuente fueron usados los datos diarios de la red de estaciones de superficie del Servicio Meteorológico Nacional. En este estudio se determinó que existen errores en las variables meteorológicas, tipo de suelo, y diversidad de la vegetación mismos que pueden contribuir con un grado de influencia positiva o negativa en el cálculo final de la evapotranspiración.

García *et al.* (2004) compararon tres ecuaciones de evapotranspiración (FAO 56 P-M, Thornthwaite y Hargreaves) con respecto a los valores de ET obtenidos por el cultivo de hierba determinado mediante el uso de un lisímetro durante su etapa de crecimiento en cuatro localidades del Altiplano (Bolivia), con el fin de validar las ecuaciones en climas de alta montaña. Los resultados mostraron mayor error en las estimaciones de ETo determinadas por la ecuación de Thornthwaite, seguida de la ecuación de Hargreaves y la ecuación de la FAO 56 P-M; además se observó la ocurrencia de mayores desviaciones cuando la única información disponible era la temperatura máxima y mínima.

Goyal (2004) estudió la sensibilidad de la evapotranspiración al calentamiento global en las regiones áridas de Rajasthan (India), en su estudio se utilizó la ecuación de la FAO 56 P-M para estimar la evapotranspiración de referencia, y la sensibilidad de la ET se analizó en términos de cambio en temperatura, radiación solar, velocidad del viento y la presión de vapor dentro de un rango posible de cambio de $\pm 20\%$ de los parámetros meteorológicos normales a largo plazo. Se encontró que la ETo era más sensible a los cambios en la temperatura seguida de la radiación solar, la velocidad del viento y la presión de vapor.

Fooladmand *et al.* (2008) evaluaron distintas ecuaciones de Hargreaves utilizando 14 estaciones en el sur de Irán para estimaciones de ETo mensual tomando como referencia el método de la FAO 56 P-M. Los resultados mostraron que la ecuación original de Hargreaves

era sólo mejor que las demás en tres estaciones con clima húmedo y bajos niveles de la velocidad del viento durante el año.

Tabari (2009) realizó la comparación de cuatro modelos de evapotranspiración (Makkink, Turc, Priestley–Taylor y Hargreaves) comúnmente utilizados en la determinación de valores de ETo mensual, con respecto al modelo de la FAO 56 P-M, con el objetivo de determinar el mejor modelo para estimar la ETo mediante el uso de pocos datos de alta precisión. Para el estudio se utilizó información de 12 estaciones meteorológicas en cuatro climas diferentes de Irán. En general los resultados mostraron una menor precisión de la ETo determinada por los modelos de Makkink y Priestley–Taylor mientras que una mayor precisión con los modelos de Turc y Hargreaves para todos los climas.

Por su parte, Martínez *et al.* (2009) evaluaron tres modelos de ETo basados en la temperatura (“ecuación reducida” de Penman-Monteith, Hargreaves y Turc) tomando como referencia la ecuación de la FAO 56 P-M, los modelos fueron evaluados utilizando datos mensuales de temperatura de 72 estaciones meteorológicas en Florida.

Kwon y Choi (2011) realizaron un análisis de sensibilidad para evaluar la contribución relativa de los cambios en cada variable a los de la ETo por medio de la ecuación de la FAO 56 P-M utilizando datos climáticos de un año en Corea. La sensibilidad de la ETo se calculó sobre una base mensual para los cambios en las variables individuales de la radiación solar, presión de vapor, radiación neta y velocidad del viento, mientras que otras variables se mantuvieron constantes; con el propósito de mantener la sensibilidad dentro de un cierto rango lineal, la gama de la variación para cada variable fue establecida dentro de $\pm 20\%$ al igual que en el estudio mencionado anteriormente. Los resultados mostraron una mayor sensibilidad de la ETo a la presión de vapor, la velocidad del viento, la radiación solar y radiación solar neta, en ese orden.

Yang *et al.* (2011) estudiaron las variaciones espaciales y temporales de la evapotranspiración por medio del modelo de la FAO 56 P-M usando la temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa y las horas de sol de 89 estaciones meteorológicas en la cuenca del río Amarillo en China. Para el análisis de sensibilidad se basaron en la metodología propuesta anteriormente por Goyal (2004) y Kwon y Choi (2011). La

sensibilidad de la ETo en este lugar fue mayor a los cambios en la humedad relativa, temperatura del aire, a las horas de sol y la velocidad del viento.

Borman (2011) comparó 18 modelos diferentes de ETo, entre ellos el de la FAO 56 P-M y Priestley-Taylor con respecto a la sensibilidad al cambio climático. En el estudio se utilizó datos del clima a largo plazo de seis estaciones meteorológicas en Alemania. Los resultados mostraron que todos los modelos de ETo investigados fueron sensibles a las tendencias significativas de cambio en los datos en el clima, además que todos los modelos mostraron diferentes sensibilidades.

Rahimikhoob *et al.* (2012) evaluaron el comportamiento de cuatro ecuaciones para estimar la ETo en ocho sitios del clima subtropical en el norte de Irán, las ecuaciones fueron: Makkink, Turc, Priestley-Taylor y Hargreaves. La ecuación de la FAO 56 P-M fue elegida como estándar para la calibración y evaluación de los modelos. Se encontró buena correlación entre los valores ETo estimados por cada una de las cuatro ecuaciones empíricas y el método de la FAO 56 P-M para todos los lugares; sin embargo, las ecuaciones de Makkink y Turc produjeron subestimaciones considerables. Los resultados de la comparación mostraron que antes de la calibración, las ecuaciones de Priestley-Taylor y Hargreaves son más aplicables en una región de humedad intermedia; el rendimiento de las ecuaciones de Priestley-Taylor y Hargreaves mejoraron ligeramente después de la calibración de los coeficientes específicos de la región para cada ecuación, mientras que las ecuaciones de Turc y Makkink mejoraron en gran medida.

González *et al.* (2012) utilizaron los métodos de Penman-Monteith FAO, Hargreaves y Samani, Doorenbos y Pruitt y por último el método del Tanque Evaporímetro Tipo A para determinar la evapotranspiración de referencia para nogal pecanero, El trabajo se realizó en las subregiones cuenca baja y media del Río Nazas, en los estados de Durango y Coahuila. Los resultados, con base en la comparación de métodos, indicaron que el modelo de Penman-Monteith presenta mejor correlación de la evapotranspiración de referencia con respecto al método basado en la evaporación del Tanque Tipo A, por lo tanto, determina mejor la evapotranspiración del cultivo, seguido del modelo de Doorenbos-Pruitt y, por último, el de Hargreaves-Samani.

Navejas *et al.* (2012) compraron tres métodos: Blanney-Criddle, Penman Monteith y el Tanque de evaporación, para estimar la ETo en una zona árida citrícola del noroeste de México. Los resultados obtenidos comprueban la aplicabilidad del modelo climático basado en la temperatura máxima y radiación solar, ensayado en el cultivo del naranjo. Se encontró que el método de Blanney-Criddle subestima ligeramente el proceso de ET, principalmente en los meses en que se empieza a acentuar la sequía, de abril a julio, en las condiciones semiáridas secas de la cuenca de La Paz, Baja California Sur, lo cual puede implicar un riesgo para la productividad del cultivo, dada la posibilidad de permitir la ocurrencia de estrés hídrico.

Xu *et al.* (2013) también analizaron los modelos de Priestley y Taylor, Hargreaves y Turc, con el propósito de mejorar el rendimiento de métodos simples en la estimación de ETo diaria en el este de China. Los métodos fueron evaluados y calibrados por experimentos mediante lisímetros. Los resultados mostraron que el modelo de la FAO 56 P-M es el mejor método, seguido de los modelos basados en la radiación (Priestley y Taylor, y Turc) y por último el modelo de Hargreaves basado en la temperatura. Como resultado también se obtuvo un buen desempeño del modelo de Turc, siendo este un buen sustituto del modelo de la FAO 56 P-M.

Samaras *et al.* (2013) evaluaron 18 ecuaciones basadas en la radiación. Los métodos fueron calibrados utilizando la ecuación de la FAO 56 P-M y evaluados bajo condiciones climáticas mediterráneas húmedas, subhúmedas y semiáridas en el centro de Grecia. Los resultados mostraron que todos los modelos proporcionan estimaciones relativamente precisas de la ETo. El modelo de Abtew resultó ser el de mejor rendimiento global con respecto a los datos de todas las estaciones climáticas; sin embargo, se encontró que el grupo de Priestley y Taylor, Makkink y Jensen-Haise se desempeñaron mejor que la ecuación de Abtew en el clima mediterráneo bajo condiciones de humedad relativamente alta y baja velocidad del viento.

Bogawski y Bednorz (2014) en Polonia evaluaron diferentes ecuaciones basadas en la temperatura, la radiación, el viento y ecuaciones de tanque de evaporación para estimar la ETo con respecto a la ecuación de la FAO 56 P-M. En general los resultados mostraron las mejores estimaciones con los métodos basados en la radiación (Priestley-Taylor) seguidos de las ecuaciones de Hargreaves basadas en la temperatura, los menores resultados se dieron con las ecuaciones del Tanque de evaporación.

Valipour (2014) en su estudio comparó cinco métodos diferentes de varianzas, así como los modelos de Priestley-Taylor y Turc, para determinar el mejor método bajo diferentes condiciones climáticas. Los métodos fueron evaluados por la ecuación de la FAO 56 P-M con datos meteorológicos de 181 estaciones en 31 provincias de Irán. Los resultados obtenidos mostraron que la ecuación de varianzas 1 es el método más preciso para las estimaciones de ETo.

Mundo (2015) realizó un estudio de análisis de sensibilidad del incremento de la evapotranspiración (ET) para estimar los efectos del cambio climático sobre la ET a escala regional, utilizando el método de downscaling para ajustar los datos de temperatura ante escenarios de cambio climático, que incluye la selección del método de Hargreaves-Samani (HS), calibrado y comparado contra el método de Penman-Monteith ASCE con una precisión del 93%. Este procedimiento se aplicó en nueve estados de México: Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila y Durango. Los principales resultados enuncian las variaciones de ET entre el escenario contemporáneo y el escenario 2030 son bastante significativas, de acuerdo con los datos de 160 estaciones meteorológicas; para variaciones de temperatura entre 0.1 °C y 0.45 °C; la fluctuación de ET correspondiente va de 2% en el escenario actual a 7% en el escenario 2030. Estos porcentajes obtenidos son superiores a los esperados por la precisión del método. Es importante señalar que un aumento del 7% de la ET (relacionado con un aumento de la temperatura regional de aproximadamente un grado) representaría en la práctica disponer de más millones de m³ de agua en las presas para satisfacer la demanda de agua de los cultivos.

Aguirre *et al.* (2016) analizaron la precisión de tres métodos simplificados para estimar la escala diaria, diez-días y mensual en la cuenca del Río Sierra, localizada en los estados de Chiapas y Tabasco en el sureste de México, a partir de registros meteorológicos de estaciones automatizadas, localizadas en la zona de estudio. Para estimar la ETo se utilizaron los métodos de Hargreaves, Turc y Priestley y Taylor. La precisión de los métodos analizados fue calculada con relación a la ETo de Penman-Monteith; encontrando que, para la zona estudiada, el modelo de Priestley y Taylor tuvo la mejor precisión que los métodos de Hargreaves y Turc.

2.5. Localización del área de estudio

El estudio se realizó en la Facultad de Estudios Cuautitlán, UNAM (FES-C), en el centro del valle donde se ubican los municipios de Cuautitlán México y Cuautitlán Izcalli, Estado de México, perteneciendo políticamente al segundo municipio.

El municipio de Cuautitlán Izcalli se localiza en la parte noroeste de la cuenca de México. Tiene una extensión territorial de 109.9 km² que representa el 0.5% de la superficie del Estado de México, con una altitud de 2,256 msnm, el municipio de Cuautitlán Izcalli, se encuentra ubicado dentro del eje Neovolcánico, con las elevaciones al Suroeste y Oeste del municipio, que forman parte de las estribaciones de las sierras de Monte Alto y Monte Bajo, y colinda al Norte con los municipios de Tepotzotlán y Cuautitlán México, al Este con Cuautitlán México y Tultitlán, al Sur con Tlalnepantla de Baz y Atizapán de Zaragoza, al Oeste con Villa Nicolás Romero y Tepotzotlán (Municipios.mx, 2023) (Figura 2).

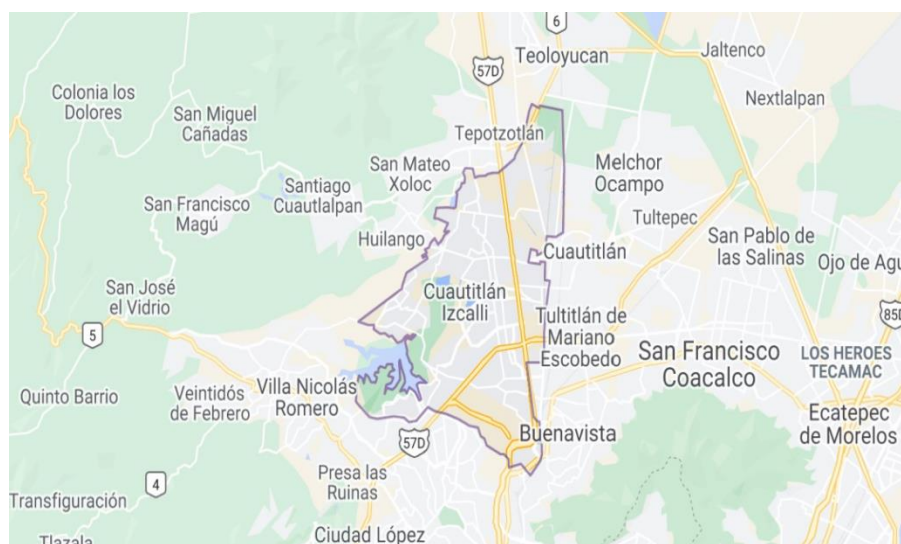


Figura 2. Localización del municipio de Cuautitlán Izcalli. México (Infoabe, 2022).

2.6. Descripción edafoclimática del área de estudio

La información climática fue recopilada de la estación meteorológica Almaraz (Figura 3), que se localiza en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, en la Longitud Oeste de $99^{\circ}11'42''$ y en la Latitud Norte de $19^{\circ}41'35''$; a una altura de 2,256 msnm.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificado por García (1973) y de la información climática descrita por Angeles (2022), la clasificación del clima de la zona es $C(w_0) b (i')$, esto es, un clima templado subhúmedo con lluvias de verano, el más seco de los subhúmedos, con verano fresco, porcentaje de lluvia invernal de 4.71%, poca oscilación de temperatura, el mes más caliente es junio y sin sequía intraestival. La temperatura media anual es de 15.4°C y la precipitación anual de 652.1 mm.



Figura 3. Vista de la estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM (Archivo personal).

Los suelos del área de estudio son vertisoles, de textura arcillosa, con un porcentaje de materia orgánica de 3.7%; el pH es de 6.9; la conductividad eléctrica de 0.619 dS m^{-1} ; y la fertilidad de alta a muy alta (Mercado *et al.*, 2015).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Metodología

Para el cálculo de la evapotranspiración, se utilizaron los datos capturados durante el periodo de julio de 1988 a diciembre del 2022 en la estación meteorológica Almaraz, de la FES Cuautitlán-UNAM (Anexo 1); en particular se consideraron los datos promedio mensual de temperatura media, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, evaporación, presión atmosférica, precipitación mensual, para su cálculo por los diferentes métodos propuestos.

3.2.1. Variables evaluadas

Se determinó la evapotranspiración por los siguientes métodos:

- Método del Tanque de evaporación Clase A.
- Método de Thornthwaite.
- Método de Penman.
- Método de Penman-Monteith.

El procedimiento de cada método se explicó en los apartados anteriores. Para el balance hídrico mensual, se relacionó el dato de precipitación y de ETP (obtenido por el método del Tanque).

Los cálculos de cada método se realizaron a través de la siguiente plataforma digital:

<https://ponce.sdsu.edu/onlinepenman.php>

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evapotranspiración potencial

Los datos obtenidos de ETP por los métodos evaluados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de la ETP mensual promedio por los diferentes métodos evaluados.

	Thornthwaite (cm)	Penman-Monteith (cm)	Penman (cm)	Tanque (cm)
E	3.63	14.45	14.49	7.05
F	4.53	15.63	15.80	8.67
M	5.66	21.01	20.23	11.80
A	7.06	20.79	21.05	12.41
M	7.99	22.71	22.84	12.92
J	8.20	19.62	19.93	10.92
J	7.58	19.52	19.79	10.43
A	7.32	19.06	19.30	9.52
S	6.81	18.06	18.37	7.95
O	5.55	15.80	15.94	7.68
N	4.45	14.29	14.31	6.70
D	3.73	14.11	14.06	6.64
Total	72.51	215.05	216.11	112.69

Se observa que los meses que presentaron un menor índice de ETP son octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero, coincidiendo estos con el periodo de otoño-invierno, lo cual se atribuye a las bajas temperaturas y la poca radiación solar propias de este periodo, siendo diciembre el mes con el valor más bajo de precipitación y radiación solar. Por otro lado, durante los meses de marzo, abril y mayo, corresponden los valores más altos de ETP y es en el mes de mayo donde se registran los valores más altos de radiación solar coincidiendo este con los valores más altos de ETP.

Estos datos se presentan de forma gráfica en la Figura 4.

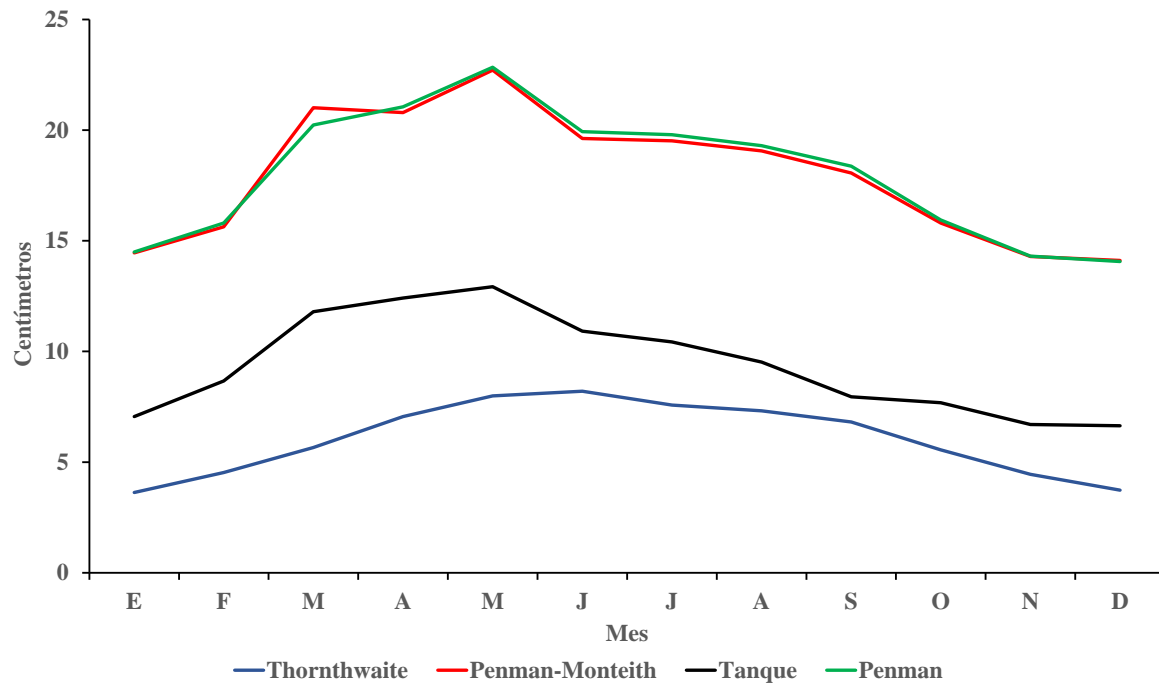


Figura 4. ETP (cm) mensual por varios métodos. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM.

Partiendo del análisis de los datos obtenidos por los diferentes métodos utilizados en este estudio se ha observado en las gráficas una similitud en las curvas de ETP, esta similitud se encuentra mucho más marcada entre los métodos de Penman, Penman-Monteith y el tanque evaporímetro. Sin embargo, aun refiriéndose a esta similitud de las curvas se observa que los valores obtenidos por Penman y Penman-Monteith son muy similares tanto que en algunos de los puntos de la curva los valores se sobreponen, esto podría atribuir a que en la fórmula de Penman-Monteith es una modificación del método original de Penman. Se observa por otro lado, que los valores obtenidos por los métodos mencionados anteriormente son más elevados que los obtenidos por los métodos del Tanque y el de Thornthwaite, siendo este último quien arroja los valores de ETP más bajos de los cuatro métodos analizados, esto es consecuencia de los pocos datos climatológicos que contempla para su cálculo.

Tomando como referencia la anterior representación gráfica puede deducirse que la ETP calculada a partir del método del Tanque presenta una curva con gran similitud en relación a los métodos de Penman y Penman-Monteith, sin embargo, los valores calculados por estos

últimos son mayores en relación a los calculados por Thornthwaite lo que indica que estos métodos sobreestiman los valores de la ETP, esto comparado con los valores obtenidos por el método de Thornthwaite y del Tanque, el cual se considera en este análisis que resulta ser el más apropiado para la zona de estudio, ya que presenta un cálculo de la ETP intermedio entre los cuatro métodos analizados y este es el único de los cuatro métodos que contempla para su cálculo los datos directos de la evaporación la cual esta influenciada por la temperatura, humedad atmosférica, nubosidad, radiación solar, viento, por lo tanto, puede señalarse como un método confiable para obtener la ETP en la condiciones meteorológicas de la zona de estudio.

Ahora bien, a partir de los datos de evaporación obtenidos en el Tanque evaporímetro, se calculó la ETP total anual, durante el periodo de estudio, la cual se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. ETP (mm) total anual. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM.

Año	ETP	Año	ETP	Año	ETP
1987	1,271.90	1999	1,017.37	2011	1,109.22
1988	1,189.05	2000	1,063.84	2012	1,050.61
1989	1,129.77	2001	969.08	2013	1,184.48
1990	1,094.44	2002	1,086.23	2014	1,090.49
1991	1,133.42	2003	1,108.60	2015	1,091.70
1992	1,114.82	2004	1,076.63	2016	1,111.00
1993	1,127.39	2005	1,277.10	2017	1,222.13
1994	1,066.97	2006	1,169.09	2018	1,099.58
1995	1,095.02	2007	1,046.04	2019	1,153.95
1996	1,106.54	2008	1,047.74	2020	1,284.82
1997	1,032.89	2009	1,101.73	2021	1,187.66
1998	1,121.63	2010	1,163.55	2022	1,201.04

La tendencia de la ETP (Figura 5), muestra su incremento en los últimos 10 años, lo que deja evidencia de la necesidad de contar con agua para riego agrícola en la mayor parte del año (Figura 4), que asegure mantener la productividad del campo, debido a que se tienen valores menores de precipitación anual en el área de estudio.

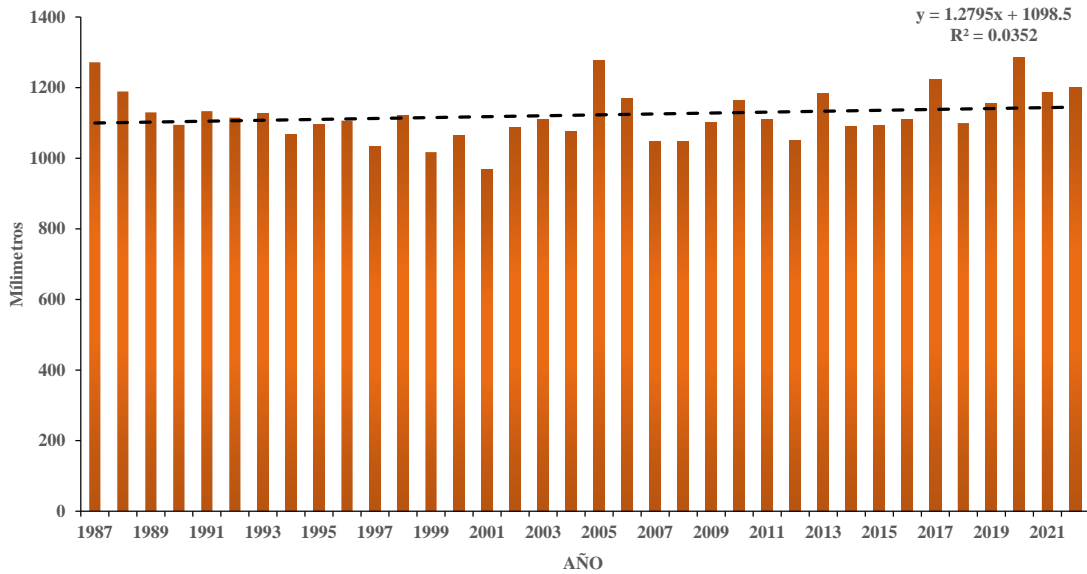


Figura 5. ETP (mm) total anual obtenida por el método del Tanque. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM.

Para un análisis más detallado de los datos obtenidos de la evapotranspiración, debe considerarse las condiciones insitu del área de estudio, porque son varios los elementos a considerar, como sería, el tipo de cultivo, el estado fenológico de este, las características físicas del suelo, la disponibilidad de agua para riego, así como el tipo de infraestructura para hacerlo. Sin embargo, los datos obtenidos permitirán apoyar la toma de decisiones para mejorar el manejo del recurso hídrico, y en particular, en las parcelas de la FES Cuautitlán.

4.2. Balance hídrico

El balance hídrico, como se señaló anteriormente, se obtuvo con la relación de la PP y la ETP (Tabla 5 y Figura 6).

Tabla 5. Balance hídrico (mm) promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM.

Mes	Pp (mm)	ETP (mm)	Balance hídrico (mm)
E	7.6	70.54	-62.9
F	10.5	86.66	-76.2
M	12.7	117.99	-105.3
A	30.0	124.13	-94.1
M	50.2	129.21	-79.1
J	112.9	109.16	3.8
J	127.1	104.31	22.8
A	116.6	95.22	21.3
S	105.5	79.49	26.0
O	59.2	76.80	-17.6
N	12.5	66.96	-54.5
D	5.1	66.39	-61.3

En el análisis realizado a la Tabla anterior se puede observar que en los meses de junio, julio, agosto y septiembre se tiene un balance hídrico positivo, siendo septiembre el mes que presenta el mayor índice de balance hídrico positivo del año; asimismo, los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre, presentan un balance hídrico negativo, siendo el mes de marzo en donde se presenta el mayor índice negativo del balance hídrico, en la zona de estudio.

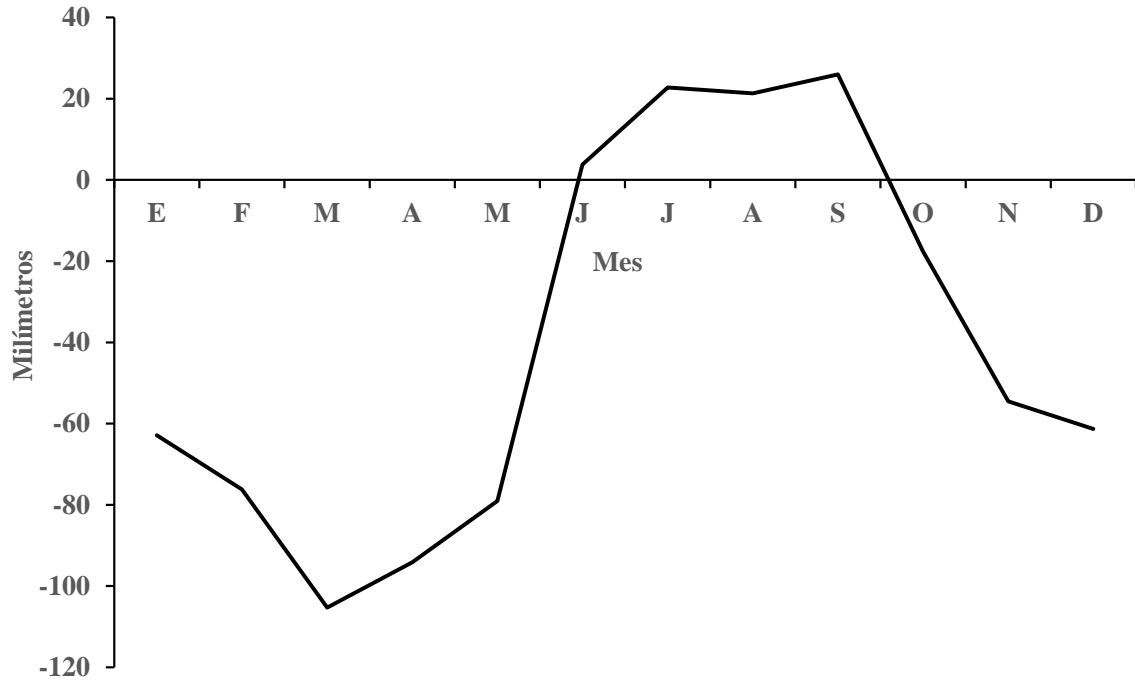


Figura 6. Balance hídrico (mm) promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM.

En la Figura 6 se observa de una manera puntual y esquemática el comportamiento del balance hídrico durante el año, el cual como ya se comentó, los valores positivos del balance hídrico coinciden con los meses de mayor precipitación, esto es, la presencia de la temporada de lluvias en la zona de estudio. Asimismo, el mayor índice negativo de este balance hídrico se presenta en el mes de marzo, que corresponde al periodo de sequía. Los datos analizados anteriormente permiten conocer la disponibilidad natural de agua y requerimientos durante el año, para tomarlo en consideración al momento de realizar una planeación para el establecimiento de los cultivos.

4.3. Importancia de la ETP en la agricultura

Dentro de las prácticas de planeación agrícola es de gran importancia el tener disponible una herramienta tan valiosa como lo es la evapotranspiración potencial (ETP), la cual proporciona elementos indispensables para hacer un uso óptimo y adecuado de los recursos hídricos de

los que se cuente para realizar las labores de riego agrícola, ya sea en las parcelas a campo abierto, así como en ambientes cerrados o bajo cubierta como lo son los invernaderos; este conocimiento permitirá determinar cuándo, cuánto y cómo regar.

Por lo tanto, uno de los retos más importantes al que se enfrentan los productores es mantener la cantidad de agua disponible en el suelo para los cultivos y evitar que esta decaiga por debajo de los niveles mínimos necesarios para un desarrollo óptimo de las plantas, ya que dicha deficiencia en periodos prolongados en ciertas etapas críticas del desarrollo del cultivo podría ocasionar la muerte de la planta (punto de marchites permanente) o una disminución significativa en el rendimiento de ellos. Esto obliga a buscar los medios para crear las condiciones necesarias para obtener un balance adecuado entre el suministro de agua y la pérdida ocasionada por la evapotranspiración (balance hídrico), evitando a toda costa que el cultivo entre en un periodo de estrés hídrico, lo cual ocasionaría pérdidas importantes en el rendimiento e incluso si ese estrés se prolongara por un largo periodo podría perderse la totalidad de la inversión. Tomando en cuenta que del agua absorbida por la planta menos del 5% es aprovechada por la planta para sus procesos fisiológicos, crecimiento y almacenamiento, constituyendo con esto la esencia de los tejidos vegetales. Un alto porcentaje del agua absorbida por las raíces (hasta un 99%) se pierde por la transpiración, sin embargo, la transpiración proporciona la energía necesaria para transportar agua, minerales y nutrientes a las hojas en la parte superior de la planta. La planta exige constantemente que se mantenga un rango de humedad adecuado para que la transpiración no se detenga. El flujo de agua que circula por la planta no se puede detener pues esto ocasionaría la muerte de ellas, por ejemplo, en una hectárea de cultivo se puede absorber entre 3,000 y 6,000 m³ de agua durante la estación de crecimiento, esto en litros equivale a 3,000,000 y 6,000,000 de litros cúbicos por hectárea, de ahí la importancia que se maneje adecuadamente el suministro del recurso agua.

Haciendo referencia a todo lo anteriormente expuesto se pueden utilizar ciertas prácticas agrícolas que permiten reducir los niveles de evapotranspiración y con ello evitar las pérdidas de agua ocasionadas por este fenómeno, y tienen que ver con la implementación del método de riego.

- *Riego superficial*: la reducción en la evaporación de la superficie del suelo se obtiene bajo condiciones de una cobertura incompleta en el riego (menos del 60%) y/o humedecimiento de solo una área relativamente pequeña (menos del 30%), esta última práctica en huertos y viñedos se logra irrigando cerca de los troncos, la reducción neta de la evapotranspiración estacional en general no es más del 5%.

- *Riego por goteo o micro aspersión*: cuando se tiene una cobertura total, la evapotranspiración no se ve afectada, sin embargo, en el caso de cultivos espaciados o huertos jóvenes, la evapotranspiración puede reducirse, ya que la transpiración queda restringida a la área húmeda, para huertos jóvenes y con un 30% de cobertura, en suelos ligeros y en condiciones de alta demanda evaporativa que requieren riegos frecuentes, se ha observado una reducción en la evapotranspiración hasta del orden del 60%, esto permite un ahorro muy importante de agua, y evidencia la importancia de conocer y manejar de una manera correcta la ETP.

- *Riego por aspersión*: Las pérdidas de agua por evaporación en el riego por aspersión son muy pequeñas aproximadamente del 2%, sin embargo, las pérdidas ocasionadas por vientos con altas velocidades son considerables aproximadamente de un 15% a una velocidad de 5 m s^{-1} , los vientos fuertes ocasionan un patrón de distribución muy pobre, por lo que este método no se recomienda para zona donde la velocidad del viento sea mayor a 5 m s^{-1} , ya que esto ocasiona que el agua esparcida se evapore más rápido y afecte a la ETP del cultivo y por lo tanto, aumenta el consumo de agua.

Dado que para la estimación de la evapotranspiración los datos climáticos son valores promedios, no en todos los momentos los valores obtenidos serán los correctos, así también el tipo de suelo, y el cultivo tienen una influencia en la determinación de esta por lo cual, se necesitará de ajustes dependiendo de cada momento y lugar específico de que se trate.

Para determinar cuándo y cuánto regar se requiere calcular la evapotranspiración del cultivo (ETc), la cual se obtiene por la formula: $ETc = Kc * ETo$ en donde Kc=constante del cultivo (obtenida de tablas preestablecidas por la FAO y varía según el tipo de cultivo y la etapa de desarrollo fenológico del mismo) y ETo= evapotranspiración de referencia calculada previamente por el método que se haya elegido. Una vez determinada la ETc se podrá definir

cuánto es lo que estará evaporando el cultivo en la etapa que se elija para el cálculo, esto indicará los requerimientos de humedad necesarios por suplir, para esto se debe tomar en cuenta la eficiencia del sistema de riego, el tipo de textura de nuestro suelo (arcillosa, media o arenosa), homogeneidad del suelo y la profundidad radicular de los cultivos. Esto permitirá calcular cuánto debe aplicarse de riego para que el cultivo tenga las condiciones óptimas para su desarrollo.

Los cambios en las condiciones climáticas ocasionadas por las actividades del ser humano (calentamiento global de efecto invernadero) han traído como consecuencia cambios significativos en las condiciones de producción a nivel mundial, por lo cual es de suma importancia el cálculo de la ETP en tiempo real para las planeaciones agrícolas. Esto debido a que el aumento en la temperatura a nivel global ha ocasionado cambios significativos en los procesos fisiológicos de los cultivos, mismos que deben conocerse y relacionarse con la ETP que de igual manera es afectada por esos cambios climáticos, pues no olvidar que tanto los procesos fisiológicos de las plantas como la evapotranspiración dependen en gran medida de las condiciones atmosféricas. He ahí la importancia de conocer estas variables para analizarlas poder hacer una buena planeación agrícola.

Para tener condiciones que permitan calcular de una manera adecuada el balance hídrico, es importante que estas estén acompañadas de un buen cálculo de la evapotranspiración, esto será suficiente para calcular la relación entre la cantidad de agua en los cultivos y la ETP.

Se debe tener claro que la evapotranspiración, es un concepto que relaciona el agua que la planta evapora, con el agua que la planta transpira, con el agua que se pierde por escorrentía, con el agua que se pierde infiltrada en el manto freático, y que la sumatoria de esa agua con base a la aplicación de una lámina conocida, resultará el diferencial del agua consumida por la planta, del agua que se pierde por evapotranspiración (evaporación, transpiración y drenaje). Estos tres factores interactúan y son muy variables, pero muy importantes para la producción agrícola, ya que, si se entienden las necesidades hídricas de los cultivos, estos se van a desarrollar correctamente. Por lo tanto, es un proceso complejo el hacer los cálculos de evapotranspiración y hacer un buen balance hídrico, pero estas son las bases para entender el funcionamiento de las plantas, y poder alcanzar una óptima producción agrícola.

En resumen, la relación de la ETP con la precipitación permite realizar el cálculo del balance hídrico y con esto conocer la interacción entre ambas variables, obteniendo de esta manera los elementos necesarios para un buen manejo de los recursos hídricos y una buena planeación agrícola.

V. CONCLUSIONES

1. Se cumplieron los objetivos de la presente investigación, y se determinaron los valores de la evapotranspiración y del balance hídrico con los datos de la estación meteorológica de la FES Cuautitlán.
2. La evapotranspiración es un proceso dinámico que involucra una gran cantidad de variables para su cálculo y aplicación, que permite determinar de una manera adecuada las necesidades hídricas de los cultivos y minimizar las pérdidas económicas en los sistemas de producción agrícola.
3. Una vez realizados los análisis y cálculos con los cuatro métodos propuestos se determinó que tanto el método de Penman como el de Penman Monteith sobreestiman el valor de la evapotranspiración en valores de 216.11 y 215.05 cm, respectivamente, lo cual y con base en las observaciones en la zona de estudio, no reflejan lo que sucede con los cultivos en campo.
4. El método de Thornthwaite subestima el valor de la ETP (72.51 cm), con valores muy por debajo de los calculados por los métodos de Penman y Penman-Monteith, por lo cual, se considera que no es un método recomendable para el cálculo de la evapotranspiración en el área de estudio.
5. Los datos obtenidos por el método del Tanque de evaporación Clase A (112.69 cm), representan valores que se acercan más a la realidad observada bajo las condiciones ambientales de la zona de estudio, asimismo, sus resultados se comportan en un rango intermedio entre los obtenidos en los métodos empleados en esta investigación.
6. De lo anterior se concluye que el método del Tanque de evaporación Clase A, es más recomendable para el cálculo de la ETP bajo las condiciones ambientales de la zona de estudio.

VI. LITERATURA CITADA

1. Aguilera, C.M., Martínez, E.R. 1990. Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. 3ª Edic. UACH. México.
2. Aguirre, A.R., Tijerina, C.L., Chávez, M.J., González, C.J.M. 2016. Estimación de la evapotranspiración de referencia en la cuenca del río sierra, Chiapas y Tabasco, México. Memorias del II Congreso Nacional de riego y drenaje 2016 COMEII. Chapingo, Edo. de México.
3. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivo. FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. 322 pp.
4. Angeles, F.S.B. 2022. Determinación de la normal climática de 1987 a 2022 de la Estación Meteorológica Almaraz. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Agrícola. FES Cuautitlán, UNAM. México. 117 pp.
5. Antúnez, B.A., Carvallo, G.E., Otárola, A.J. 2011. Programación de riego en cultivos de importancia económica del Valle de Azapa. Informativo INIA-URURI. Chile. 6 pp.
6. Barco, J., Cuartas, A., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J. I., Mantilla, R., Hoyos, C., Mejía, J.F., Botero, B., Montoya, M. 2000. Estimación de la evaporación en Colombia. Avances en Recursos Hidráulicos, (7): 043-051.
7. Bogawski, P., Bednorz, E. 2014. Comparison and validation of selected evapotranspiration models for conditions in Poland (Central Europe). Water Resources Management, 28(14): 5021-5038.
8. Blogspot.com. 2013. Evaporación y Transpiración. En: <http://evaporacionytranspiracion.blogspot.com/2013/05/medicion-de-la-evaporacion.html>. Fecha de consulta el 12 de enero de 2023.
9. 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.
10. Claro, R.F.A. 1991. Balance hídrico. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras. HIMAT. Santafé de Bogotá, Colombia. 34 pp.
11. Contreras, S.J.J. 2015. Análisis comparativo de cuatro modelos de evapotranspiración de referencia en la microcuenca del río Quinuas. Tesis de Ingeniero Ambiental. Ecuador. 17-20 p.

12. Córdova, M.M., Carrillo, R.G., Céleri, R. 2013. Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de páramo andino debido al uso de datos mensuales, diarios y horarios. *Aqua-LAC*, 5: 14-22.
13. De Goicoechea, N. 1969. Nociones generales del balance hídrico. *K O B 1 E* (Bilbao) Grupo Espeleológico Vizcaíno. Excma. Diputación de Vizcaya Boletín No. 1. 6pp.
14. Del Toro, G.F., Kretschmar T., Hinojosa, C.A. 2014. Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6): 69-81.
15. Domínguez, F., Villagarcía, L. 2003. ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. En: https://www.researchgate.net/publication/39539778_Como_se_puede_medir_y_estimar_la_evapotranspiracion_estado_actual_y_evoluciones. Fecha de consulta el 28 de febrero de 2023.
16. Doorenbos, J., Pruitt, W. 1977. Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar. Publicación No. 24 de la Serie de Riego y Drenaje. FAO. Roma, Italia. 161-208 pp.
17. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1990. Annex V FAO Penman – Monteith Formula. Report on Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements, FAO, Roma, Italia. 23 pp.
18. Fooladmand, H.R., Zandilak, H., Ravanan, M.H. 2008. Comparison of different types of Hargreaves equation for estimating monthly evapotranspiration in the south of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 54(3): 321-330.
19. García, M., Raes, D., Allen, R., Herbas, C. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology*, 125(1-2): 67-82.
20. Gómez, B.M. 2002. Evapotranspiración en México. Estudio comparativo de observaciones con resultados del modelo de mesoescala MM5. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. México. 65 pp.
21. González, C.G., Chávez, R.E., González, B.J.L., Dzul, L.A., Sánchez, C.I., Potisek, T.M.C. 2012. Comparación de métodos para determinar la evapotranspiración y oportunidad de riego en nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 30(1): 29-38.
22. Goyal, R.K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*, 69(1): 1-11.
23. Hargreaves, G.H., Allen, R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1): 53-63.

24. Hämmerly, R.C. 2001. Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua. Tesis de Maestría de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, Córdoba, Argentina. 15-49 pp.
25. Hernández, N.M.L. 1993. La Agroclimatología: instrumento de planificación agrícola. *Geographicalia*, (30): 213-228.
26. Hou, L.G., Zou, S.B., Xiao, H.L., Yang, Y.G. 2013. Sensitivity of the reference evapotranspiration to key climatic variables during the growing season in the Ejina oasis northwest China. *SpringerPlus*, 2(Suppl 1).
27. Hupet, F., Vanclooster, M. 2001. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 243(3-4): 192-204.
28. Inia.org.uy. 2023. Método y descripción de tanque de evaporación clase “A”. En: <http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/evainf.htm>. Fecha de consulta el 28 de febrero de 2023.
29. Infoabe. 2022. Cuál es el origen de Cuautitlán Izcalli. En: <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/01/27/cual-es-el-origen-de-cuautitlan-izcalli/>. Fecha de consulta el 25 de febrero de 2023.
30. 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.
31. Jensen, M.E., Allen, R.G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements: A manual. Committee on Irrigation Water Requirements. American Society of Civil Engineers, USA. 332 pp.
32. Kwon, H., Choi, M. 2011. Error assessment of climate variables for FAO-56 reference evapotranspiration. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 112(1-2): 81-90.
33. Manríquez, N.I. 1971. Determinación de uso consumo en 6 cultivos, sometidos a diferentes tratamientos de humedad de suelo, para la provincia de Ñuble. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
34. Martínez, C.J., Thepadia, M. 2009. Estimating reference evapotranspiration with minimum data in Florida. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 136(7): 494-501.
35. Martínez, R., Boueri, M.A., Escalona, P. 2005. Correlación entre la evaporación en tina y la evapotranspiración de referencia en cinco estaciones climatológicas de Venezuela. *Bioagro*, 17(2): 79-83.

36. McKenney, M.S., Rosenberg, N.J. 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(1-2): 81-110.
37. Mercado, M.G. 2006. Evaporación y déficit hídrico en un agostadero representativo de matorral sarcocaula en la Paz Baja California Sur. Tesis de Maestro en Ciencias. CIBNOR, B.C.S. México.
38. Mercado, M.G., Granados, M.A.K., Reyes, L.D., López, A.H., Canales, T.L, Severiano, L.J.H., Valencia, I.C.E. 2015. Variabilidad espacial de parámetros químicos de un suelo vertisol, con manejo convencional y orgánico. Memorias del XL Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. San Luis Potosí, S.L.P. México.
39. Meteored. 2006. Tanque de Evaporación Tipo "A". En: <http://foro.tiempo.com/el-tanque-de-evaporacion-tipo-a-t55901.0.html>. Fecha de consulta el 2 de marzo de 2023.
40. Millar, B.A. 1972. Información tabulada para el cálculo de evaporación potencial mediante la ecuación de Penman. Boletín Técnico Número 39. Departamento de Suelos, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
41. Mundo, M.M. 2015. Climate Change Effects on Evapotranspiration in Mexico. *American Journal of Climate Change*, 4(2): 163-172.
42. Municipios.mx. 2023. Cuautitlán Izcalli. En: <http://www.municipios.mx/mexico/cuautitlan-izcalli/>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2023.
43. Navejas, J.J., Nieto, G.A., Fraga, P.H.C., Rueda, P.E.O., Ávila, S.N.Y. 2011. Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en una zona árida citrícola del noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2): 147-155.
44. Novoa, P. 1998. Estimación de la Evapotranspiración Actual en Bosques: Teoría. Corporación Nacional Forestal, Sexta Región. Casilla 447, Rancagua, Chile: 111-112.
45. Ortega, F.S., Mediavilla, A.W., Fuentes, J.S., Cuenca, C.R. 1998. Validación de un modelo para estimar la radiación neta de una cubierta vegetal en condiciones de referencia. *Ciencia e Investigación Agraria*, 25(2): 103-107.
46. Ortíz, C.R., Tamayo, O.C., Chile, A.M., Méndez, C.A. 2018. Coeficiente del tanque evaporímetro Clase A para estimar la evapotranspiración de referencia para el valle de Tumbaco. *Siembra*, 5(1): 16-25.

47. Ortiz, C.R., Chile, A.M. 2020. Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1): 1-14.
48. Paoli, C. 1995. Hidrometeorología - Manual del VI curso internacional de hidrología general con aspectos ambientales. FICH (UNL)-UNESCO.
49. Parra, F.H.M. 2012. Diseño de un sistema de riego por goteo automatizado. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Instituto Tecnológico de Sonora. En: http://biblioteca.itson.mx/dac_new/tesis/360_parra_hector.pdf. Fecha de consulta el 17 de marzo de 2023.
50. Portillo, G. s/f. Evapotranspiración, que es, como se mide y qué importancia tiene en la agricultura. En: <https://www.meteorologiaenred.com/evapotranspiracion.html#:~:text=Es%20el%20proceso%20por%20el,lo%20transpiran%20a%20la%20atm%C3%B3sfera>. Fecha de consulta el 15 de febrero de 2023.
51. Rahimikhoob, A., Behbahani, M.R., Fakheri, J. 2012. An Evaluation of Four Reference Evapotranspiration Models in a Subtropical Climate. *Water Resources Management*, 26(10): 2867-2881.
52. Rodríguez, E.D.S. 2017. Estimativa da evapotranspiração de uma floresta tropical a partir do método de Penman Monteith e Tanque classe A., Programa de iniciação científica do INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia) relatório final. 25 pp.
53. Rojas, C.N.Z. 1994. Determinación de la evapotranspiración de *Pinus radiata* D. Don en vivero, mediante lisímetro de drenaje. Memoria para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
54. Rosenberg, N.J., Blad, B.L., Verma, S.B. 1983. *Microclimate, the Biological Environment*. John Wiley & Sons. Second edition. New York.
55. Rotoplas. 2021. ¿Qué es el Balance hídrico? En: <https://rotoplas.com.ar/agroindustria/que-es-el-balance-hidrico/>. Fecha de consulta el 28 de mayo de 2023.
56. Rovira, P.A. 1976. Selección de fórmula para estimar evapotranspiración potencial en Chillán-Chile. *Notas Geográficas*, 7: 31-44.
57. Sahin, U., Angin, I., Anapali, O. 2004. Evaluation of reference evapotranspiration calculation methods applied to the climatic conditions of Turkey. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 52(2): 125-133.

58. Salgado, S.L.G. 1966. Métodos para determinar evapotranspiración actual y potencial. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
59. Samaras, D.A., Reif, A., Theodoropoulos, K. 2013. Evaluation of Radiation-Based Reference Evapotranspiration Models Under Different Mediterranean Climates in Central Greece. *Water Resources Management*, 28(1): 207-225.
60. Sánchez, M.M.I., 2001 Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28: 3-10.
61. Sánchez, T.M.I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología. Geofoma Ediciones. Logroño. España.
62. Santana, P.L.M. 2008. Evapotranspiración Penman-Monteith Análisis Año 2008 Agro cabildo. En: <https://www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/evapotrans2008.pdf>. Fecha de consulta el 28 de abril de 2023.
63. Santillán, G.E., Dávila, V.G., Anda, S.J., Díaz, T.J.J. 2013. Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz México. *Rev. Ambiente & Agua*, 8(3): 104-117.
64. SMEAP (Sociedad Mexicana de Especialistas en Agricultura Protegida). 2023. La Evapotranspiración y el Manejo del Riego. En: <https://smeapmexico.org/la-evapotranspiracion-y-el-manejo-del-riego/>. Fecha de consulta el 15 de septiembre de 2023.
65. Sokolov, A.A., Chapman, T.C. 1981. Métodos de Cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de Investigación y Métodos. En: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000137771/PDF/137771spao.pdf.multi>. Fecha de consulta el 12 de junio de 2023.
66. Tabari, H. 2009. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*, 24(10): 2311-2337.
67. Tabari, H., Grismer, M.E., Trajkovic, S. 2011. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31(2): 107-117.
68. Tosso, T.J. 1972. Analysis of chilean meteorological data to estimate evapotranspiration and irrigation requirements. Tesis para optar al grado de Master of Science en Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University. Logan, Utah.
69. Tuñón, C.J. 2000. Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Tesis Doctoral Departamento de Ciencias Experimentales. Universitat Jaume I. Castellón. Granada, España. 377 pp.

70. Valipour, M. 2014. Investigation of Valiantzas' evapotranspiration equation in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-12.
71. Vargas, A.H. 1963. Correlación entre la evapotranspiración de alfalfa y trébol rosado y la evaporación de tres tipos diferentes de bandejas de evaporación. Tesis de Ingeniero Agrónomo, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
72. Veto.cl. 2023. Importancia de la Evapotranspiración en la agricultura. En: <https://blog.veto.cl/2020/10/31/la-importancia-de-la-evapotranspiracion-en-la-agricultura/>. Fecha de consulta el 15 de enero de 2023.
73. Xu, J., Peng, S., Ding, J., Wei, Q., Yu, Y. 2013. Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(6): 845-858.
74. Yang, Z., Liu, Q., Cui, B. 2011. Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2006 in the Yellow River Basin, China. *Hydrological Sciences Journal*, 56(6): 1015-1026.

ANEXOS

Anexo 1. Datos climáticos promedio mensual del periodo de 1988 a 2022. Estación meteorológica Almaraz, FESC-UNAM.

	T. media (°C)	H. R. (%)	Rad. Solar (cal cm² día⁻¹)	Viento (Km día⁻¹)	Evap. (mm)	Presión (hp)	Pp (mm)
E	11.9	63.2	401.89	120.60	94.05	781.5	7.6
F	13.4	60.7	465.26	144.37	115.55	780.1	10.5
M	15.1	56.1	509.10	165.03	157.32	780.0	12.7
A	16.9	59.3	537.47	158.40	165.51	779.1	30.0
M	17.9	55.4	546.19	158.17	172.28	780.1	50.2
J	18.0	64.6	500.82	163.20	145.55	780.2	112.9
J	17.2	66.1	499.02	139.20	139.08	781.9	127.1
A	17.1	67.9	493.06	128.98	126.96	781.5	116.6
S	16.8	71.2	439.68	132.00	105.99	780.6	105.5
O	15.1	69.6	422.30	126.71	102.40	781.1	59.2
N	13.5	65.3	398.52	115.75	89.28	781.8	12.5
D	12.2	63.1	390.13	103.19	88.52	781.7	5.1