



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**USO DE HERRAMIENTAS DE PERCEPCIÓN
REMOTA PARA ESTIMAR
EVAPOTRANSPIRACIÓN**

MONSERRAT RAMÍREZ MARTÍNEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: **Uso de herramientas de percepción remota para estimar evapotranspiración**, realizada por la alumna: **Montserrat Ramírez Martínez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

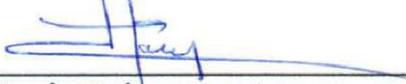
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



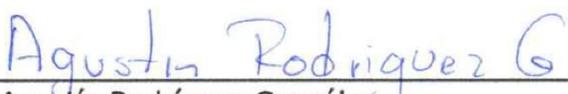
Dr. Jorge Flores Velázquez

ASESOR



Dr. Jesús Chávez Morales

ASESOR



Dr. Agustín Rodríguez González

Montecillo, Texcoco, Estado de México, marzo de 2022

USO DE HERRAMIENTAS DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRACIÓN

Monserrat Ramírez Martínez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

Introducción. La administración del agua en la agricultura sigue siendo el tema central en el uso eficiente en México. El estado de Hidalgo recibe el agua tratada de la tercera planta de tratamiento más grande del mundo para abastecer el riego de tres de los principales distritos de riego. El **objetivo** de este trabajo fue describir el proceso para estimar la evapotranspiración real de un cultivo, usando la herramienta de percepción remota METRIC EEflux y comparar los resultados de la evapotranspiración con el modelo Hargreaves-Samani. **Metodología.** Se utilizaron 12 imágenes de satélite Landsat 7 para estimar evapotranspiración puntual usando METRIC EEflux. Para analizar los resultados se usó el modelo Hargreaves-Samani para estimar la misma variable usando normales climatológicas. **Resultados.** Se calcularon los valores de Evapotranspiración real del cultivo de maíz, bajo riego mediante percepción remota en un total de 2630 ha cultivadas oscilando entre 0.51 y 4.28 (mm/día); los resultados por medio del método Hargreaves-Samani, se encuentran en el intervalo 1.93 y 5.48 (mm/día). Los resultados indican que ambas metodologías son útiles en la estimación de los requerimientos de riego por los cultivos. **Conclusión.** La metodología mediante percepción remota es una herramienta robusta no solo en la estimación de requerimiento de riego en zonas agrícolas, sino que una vez calculada y desplegada en un sistema de información geográfica, abre posibilidades al monitoreo y gestión de los recursos, en especial el hídrico. Y sus resultados al ser comparados no mostraron una discrepancia notable que haga dudar de su eficiencia.

Palabras Clave: METRIC, Evapotranspiración, Hargreaves-Samani, recurso hídrico

USE OF REMOTE PERCEPTION TOOLS TO ESTIMATE EVAPOTRANSPIRATION

Montserrat Ramírez Martínez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

Introduction. The administration of water in the agriculture continues to be the central affair about the efficiency in Mexico. The state of Hidalgo receives residual water from the third largest treatment plant in the world to supply the irrigation to three of the main irrigation districts. The objective of this work was to describe the process to estimate the real evapotranspiration of a crop, using the remote sensing tool METRIC EEflux and comparing the evapotranspiration results with the Hargreaves-Samani model. **Methodology.** Twelve Landsat 7 satellite images were used to estimate the point evapotranspiration using METRIC EEflux method. To analyze the results, the Hargreaves-Samani model was used to estimate it using normal climatologies statements. **Results.** . The real Evapotranspiration values of the corn crop were calculated, under irrigation by remote sensing in a total of 2630 cultivated ha, ranging between 0.51 and 4.28 (mm / day); the results by means of the Hargreaves-Samani method, are in the interval 1.93 and 5.48 (mm / day). The results indicate that both methodologies are useful in estimating irrigation requirements for crops. **Conclusion.** The remote by sensing methodology is a robust tool that not only in estimating the irrigation requirement in agricultural areas, but once calculated and deployed in a geographic information system, it opens possibilities for the monitoring and management of resources, especially water resources. And their results when compared did not show a notable discrepancy that casts doubts on their efficiency.

Key Words: METRIC, Evapotranspiration, Hargreaves-Samani, water resource

DEDICATORIA

A mi esposo y mejor amigo Alberto Díaz González no solo por su ayuda en el presente trabajo si no por todo su apoyo, compañía, comprensión y sobre todo su amor a lo largo de esta meta.

A mis padres Antonio Ramírez y Lourdes Martínez que siempre creen en mí y están para apoyarme y guiarme en cualquier momento de mi vida. Este logro también es de ustedes.

A mis hermanos Luis Antonio por ese gran cerebro que tienes y que sé que te llevara lejos, también aprendo de ti. Y Adrian Uriel que siempre estas para las buenas, malas y peores eres el mejor hermano mayor.

Los Amo infinitamente.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por el apoyo para realizar el presente trabajo y el desarrollo profesional de muchos colegas.

Agradezco al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, en particular al posgrado de Hidrociencias por darme la oportunidad de crecer de manera profesional.

Al Dr. Jorge Flores por el apoyo invaluable, confianza, paciencia, tolerancia y orientación en todo el proceso del trabajo.

A él M. en C. Eduardo Gutiérrez, por su confianza apoyo, amistad y orientación a lo largo de la maestría.

A los Doctores. Jesús Chávez y Agustín Rodríguez por el gran apoyo, asesoramiento, consejos y contribuciones al presente trabajo.

Al Dr. Roberto Ascencio, por sus sugerencias, grandes aportaciones y su confianza.

Al M. en C. José Manuel por brindarme los datos esenciales para esta investigación.

A mis amigos de toda la vida que siempre están apoyándome y siempre creen en mi Gisela Salvatierra, Alberto García, Alejandra Reyes, Mario Gatica, Bertha Valdez y Ricardo Zuñiga.

Gracias infinitas.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE CUADROS	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	4
II.1Objetivo general	4
II.1.1Objetivos específicos:	5
II.2Hipótesis	5
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
III.1 Requerimientos hídricos por los cultivos.....	5
III.2 Evapotranspiración (ET)	7
III.2.1 Factores ambientales que condicionan la evapotranspiración.....	8
III.2.2 Importancia agronómica de la evapotranspiración.....	10
III.2.3 Métodos para estimar evapotranspiración (ET)	10
III.2.4 Información climática de estaciones meteorológicas	18
III.3 Herramientas de percepción remota aplicada a la agronomía.....	22
III.3.1. Fundamentos de la percepción remota.....	23
III.3.2. Plataformas de percepción remota	26
III.3.3. Estimación de la evapotranspiración por medio de percepción remota	28
III.4 METRIC (Mapeo de evapotranspiración a Alta Resolución con Calibración Interna).....	31
III.5 Requerimientos hídricos de cultivo bajo riego.....	33
IV MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
IV.1 Descripción de la zona de estudio.....	34
IV.2 Obtención de información meteorológica para estimar evapotranspiración Hargreaves- Samani.	38

IV.3 Obtención de imágenes LANDSAT para estimar evapotranspiración mediante METRIC.....	42
IV.3.1 Estimación de evapotranspiración mediante método METRIC.	45
V RESULTADOS.....	52
VI. CONCLUSIONES	59
VII LITERATURA CITADA	60
ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1. Mapa del Distrito de riego 003 mostrando canales de agua. (CONAGUA, 2012)	3
Figura IV.2. Superficie regada total de los distritos de riego 2018-2019, por entidad federativa (CEDRESSA, 2021).....	36
Figura IV.3 Pantalla principal del sistema MetricEEFlux consultada septiembre 2021	43
Figura IV.4. Listado de imágenes resultado de la búsqueda en sistema MetricEEFlux.....	43
Figura IV.5 Pantalla del sistema Metric EFlux correspondiente al menú y solicitud de imágenes.....	44
Figura IV.6. Capa en QGis de la delimitación de las parcelas de Tepantepec.....	45
Figura IV.7. Pantalla del programa QGis mostrando el menú de vectorial de la herramienta vectorial.....	47
Figura IV.8. Pantalla del programa QGis mostrando la capa recortada de MetricEEFlux.....	47
Figura IV.9. Pantalla del programa QGis mostrando el menú de simbología.....	48
Figura IV.10. Capa de las parcelas solo con los límites marcados sin relleno de superficie.....	48
Figura IV.11 Pantalla del programa QGis mostrando el menú de simbología.....	49
Figura IV.12. Pantalla del programa QGis mostrando el menú para cambio de niveles de datos.....	49
Figura IV.13. Píxeles fríos y calientes representados por los colores azul y café.....	50
Figura IV.14. Programa QGis con imagen de enero 2019 descargada de MetricEEFlux y capa de parcelas de Tepantepec.....	50
Figura IV.15. Menú estadísticas de zona en Qgis.....	51
Figura IV.16 Menú de programa QGis para exportar los datos de la capa a un formato numérico Excel (xlm.).....	52
Figura V.1 Estimación de la ETr promedio mensual obtenida por método de METRIC EEFlux.....	53

Figura V.2. Estimación de la ETo promedio mensual obtenida por método de Hargreaves-Samani.	54
Figura V.3. Estimación de la ETr promedio mensual de maíz obtenida por método de Hargreaves-Samani.....	56
Figura V.4. Comparación de la ETr por método Metric y Hargreaves – Samani.ETr por método de Hargreaves- SamaniETr por método METRICEEFlux	57

LISTA DE CUADROS

Cuadro III.1. Clasificación del espectro electromagnético (Villegas, 2008)	24
Cuadro. III.2. Clasificación de satélites según su distancia.....	27
Cuadro IV.1. Características biogeografías del municipio Francisco I. Madero INEGI (1998).....	35
Cuadro IV.2. Superficie sembrada y volúmenes de agua registrados en el año 2012 para diferentes ciclos de cultivo en tres distritos de riego del Estado de Hidalgo .(CONAGUA, 2013).....	38
Cuadro IV.3. Características de la estación meteorológica y de los datos obtenidos de CLICOM consultado en marzo 2020.	39
Cuadro IV.4. Valores de Kc para cultivo de maíz en un ciclo agrícola. (Palacios, 2002)	41
Cuadro IV.5 Características de las imágenes descargadas en METRIC EEFlux.....	44
Cuadro IV.6. Atributos que contiene la capa Tepantepec.	45
Cuadro V.1. Datos de Er promedio mensual mediante el método Metric EEFlux	53
Cuadro V.2. Datos promedios mensuales de ETo obtenida por el método Hargraves- Samani.	54
Cuadro V.3. Datos de ETo y Kc mensual de maíz para obtener ETr promedio mensual.....	55
Cuadro V.4.Requerimientos de riego según los métodos METRIC y Hargreaves- Samani para el cultivo de maíz sembrado 2020.....	59

I. INTRODUCCIÓN

México enfrenta el creciente problema relacionado con la generación de agua residual producto de los desechos debido al incremento poblacional, mayormente observado en las ciudades como la Ciudad de México. Para contrarrestar los problemas, desde principios del siglo XX se realizaron obras hidráulicas para redirigir el agua residual hacia el Valle del Mezquital localizado en el estado de Hidalgo.

En el periodo del porfiriato, se construyó una obra hidráulica llamada el Gran Canal del Desagüe, con el que se buscaba frenar las inundaciones que sufría la Ciudad de México. Dichas aguas, tenían como propósito desembocar en el mar, pero en su trayectoria se vertían en el río Tula, que atraviesa el Valle, donde un sistema de presas y canales la distribuían para los cultivos.

De esta manera se produjeron dos impactos positivos en aquel tiempo: 1) se evitaron las inundaciones en la ciudad y 2) se dotó de agua a una zona que presentaba escasez por sus condiciones climáticas. El agua negra comenzó a ser enviada a esta zona a través de tres conductos: el Interceptor Poniente (1789), el Gran Canal (1898) y el Emisor Central (1975). El agua que llegaba de esta forma comenzó a ser aprovechada de manera oficial en 1989 para la generación de energía eléctrica (plantas hidroeléctricas de Juandhó y La Cañada); (Domínguez, 2001). Lo anterior, permitía que las aguas que desembocaban en el mar llegaran con una carga menor de contaminantes y se incentivaba la actividad agrícola en la región, que mejoraba la economía de los pobladores locales (García, 2019). El recurso hídrico no solo permite la actividad agrícola, si no también permite el asentamiento urbano lo cual lleva a un crecimiento poblacional y económico.

En el Plan Nacional Hídrico (PHN) 2020-2024, CONAGUA indica que la superficie dedicada a la agricultura en el país es de 22 millones de hectáreas de las cuales 6.1 millones cuentan con infraestructura de riego y el resto es temporal. La superficie que está en condiciones de riego se compone por 86 distritos de riego registrados hasta 2019 y aunque es mucho menor superficie que la de temporal, la productividad es de 2 a 3 veces más como se reportó en 2018 con cultivos de arroz, maíz, frijol y trigo mostrando

un rendimiento de 3.5 veces mayor que los de temporal. Los distritos de riego se han transferido a los usuarios, los cuales se organizan y forman asociaciones porque son responsables de mantener la infraestructura con sus propios recursos, pero estos no pagan derechos como el resto.

El total del volumen de agua distribuido, a través de los 86 distritos de riego de México, es de 2,585,984 m³ al año, de los cuales 74,589.00 m³ corresponde a 5 distritos pertenecientes a Hidalgo el DR003 Tula, DR008 Metztlán, DR028 Tulancingo, DR100 Alfajayucan y DR112 Ajacuba. Tres de estos distritos pertenecen a la zona del acuífero del Valle del Mezquital, DR003 Tula, DR100 Alfajayucan y DR112 Ajacuba, zona que es importante porque aporta el 56 % del producto interno bruto (PIB) del estado de Hidalgo esto representa 30,505.65 millones de pesos valor mostrado en actividades agropecuarias registradas hasta 2014, donde la agricultura representaba un 59% de este PIB, con los principales cultivos que son hortalizas, legumbres y especias (alfalfa, maíz, trigo, avena, frijol, jitomate, chile y betabel); con restricción para cultivos de lechuga, col, cilantro, rábano, zanahoria, espinacas y perejil (aunque se cultivan en la actualidad) debido a la regulación para la reutilización de aguas residuales para la protección de la salud (Maples, 1990).

El uso de aguas residuales en el sector agrícola coloca a México, en particular al Valle del Mezquital, como el segundo a nivel mundial en su uso después de China (Ontiveros, Diakite, Álvarez y Coras, 2013; Jiménez y Chávez, 2004; García, 2001). Este es uno de los más antiguos esquemas de irrigación usando aguas residuales urbanas. Las aguas residuales de la Ciudad de México máximo (45m³/seg) es una mezcla de agua de desecho doméstico, municipal e industrial, del cual el 75% es usado sin tratamiento formal para la irrigación de 90,000 ha en el Valle. (Jiménez, 2004)

Las aguas residuales recorren 80 km desde la Ciudad de México hasta llegar a ser vertidas en la presa Endho, Requena y Taximay para después ser distribuidas por medio de canales de riego en la región, para el uso de los distritos de riego reciben tratamiento de infiltración natural en la tierra que es equivalente a un tratamiento secundario convencional de agua residual Figura I.1

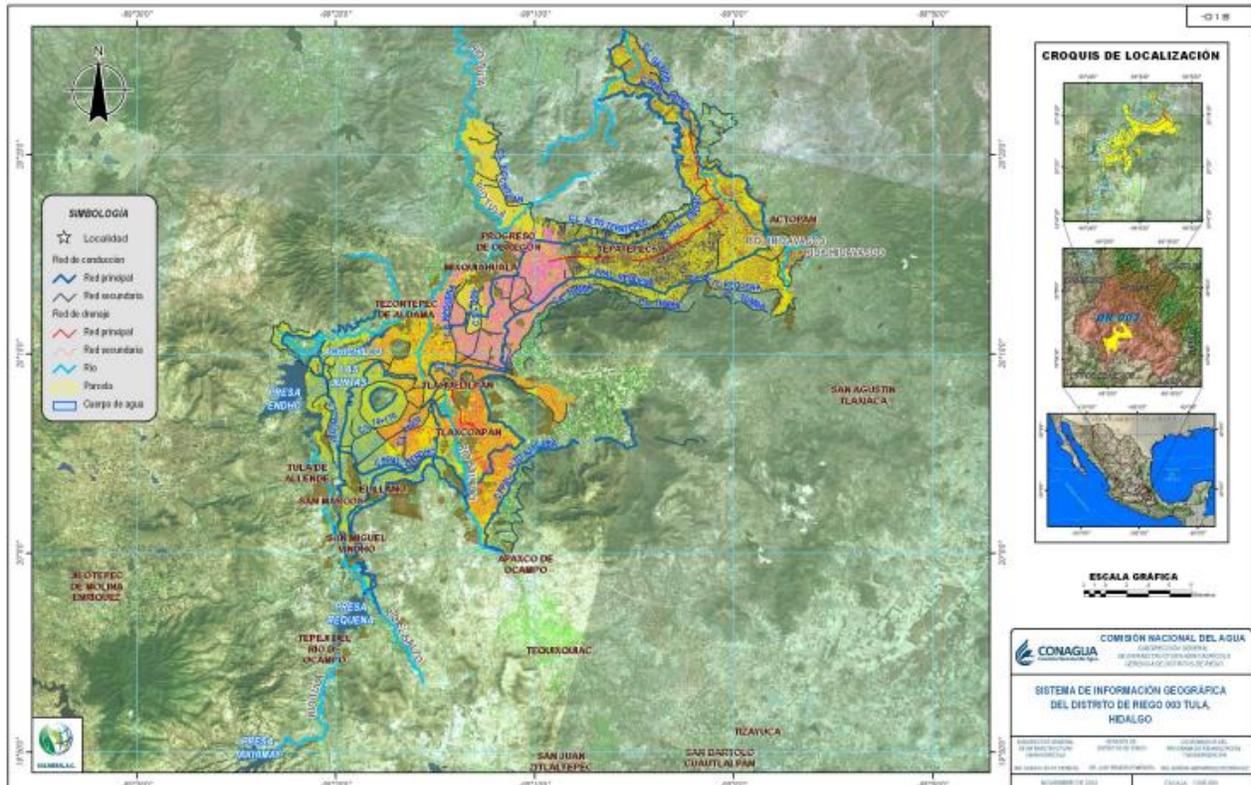


Figura I.1. Mapa del Distrito de riego 003 mostrando canales de agua. (CONAGUA, 2012)

El municipio de Francisco I. Madero, al ser parte del Valle del Mezquital se considera una zona potencialmente agrícola, ya que los cultivos obtienen nutrientes de las aguas residuales vertidas y aunque actualmente se ha demostrado mayor rendimiento en la producción de forrajes no significa que estas aguas contaminadas no puedan provocar un cambio físico- químico en las características de los suelos, como la dispersión de agregados debido a la acumulación de sodio (Murcia-Sarmiento, 2014). El deterioro físico se refleja en la estructura del suelo, en la capacidad de infiltración y el decremento de la porosidad e incremento de la densidad aparente, llegando a impedir un drenaje de manera adecuada (Caravaca et al., 2001).

Este impacto negativo ha perdurado durante 25 años en el Valle del Mezquital, ya que ha recibido flujos de agua negra de manera ininterrumpida, lo que ha ocasionado una degradación del suelo agrícola, que se ha trasladado a los cultivos. Al ser insumos elementales para la producción agrícola, esta se ha visto reducida tanto en superficie como en rendimiento (SEMARNAT, 2007).

Cornejo et al. (2012) reportaron para el distrito de riego 003 Tula una pérdida en la estructura de suelo por la disminución de la fracción arenosa y aumento en limo. El pH mostró una disminución de un punto generando una acidez debido a inundaciones y depósito de los contaminantes vertidos con el agua negra y la generada por la industria favoreció, la acumulación de toxicidad por presencia de metales pesados tanto en suelo como en tejido vegetal.

Debido al volumen de agua residual generada en la Ciudad de México y área metropolitana, aunado a los problemas que ocasiona, se crea un plan de sustentabilidad Hídrica del Valle de México, teniendo como objetivo el tratamiento del 100 % del agua residual con lo que se pretendió un cambio en el panorama agrícola del Valle del Mezquital. (Rodríguez et al., 2007).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) muestra datos que una tasa de 1.5 m³ por m² por año de agua de riego en una zona de clima semiárido como lo es en el distrito de riego 003, las aguas residuales pueden proporcionar hasta 225 kg de nitrógeno y 45 kg de fósforo en una hectárea al año, dejando a los cultivos sin necesidad de fertilización generando a la actividad agrícola un gran beneficio (Núñez, 2015). Pero la acumulación de metales pesados como cromo, cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc llega a los alimentos que se consumen a diario por la población las cuales en primera instancia no provocan una afectación, sino hasta que se acumulan en el organismo. (Ikeda et al., 2000).

Por las razones expuestas se considera útil realizar un diagnóstico respecto al volumen de agua para riego que requiere la zona del distrito 003 Tula Hgo. Así como el mosaico de cultivo. Conocer el requerimiento hídrico de los cultivos, así como la superficie sembrada, será el punto de partida para dosificar la cantidad de agua residual.

II OBJETIVOS E HIPÓTESIS

II.1 Objetivo general

Describir un procedimiento práctico para estimar la evapotranspiración potencial y evapotranspiración real utilizando percepción remota.

II.1.1Objetivos específicos:

1. Estimar Evapotranspiración real utilizando normales climatológicas e imágenes satelitales en una zona de interés agrícola.
2. Estimar variables útiles (superficie regada y distribución de agua) para la operación de la zona de riego que utiliza aguas negras para riego agrícola.

II.2Hipótesis

Se obtendrán valores de evapotranspiración potencial y real similares, mediante el método de percepción remota METRIC y el método empírico Hargreaves-Samani.

Los volúmenes de agua concesionados para el municipio de Tepantepec no son suficientes para satisfacer las necesidades de los cultivos.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

III.1 Requerimientos hídricos por los cultivos.

El agua es uno de los recursos naturales esenciales para la vida orgánica y en específico del ser humano al ser capaz de producir cosechas y con ello garantizar la producción de alimentos. Actualmente el gobierno propone y asigna programas para proyectos de infraestructura hidroagrícola como lo son presas, canales, primarios, secundarios y terciarios, también sistemas de drenaje para que el flujo de agua sea regulado. (Peña, Vargas y Romero, 2013). Todo esto por los requerimientos de agua en cada cultivo ya que puede variar por especie y también entre la estación de crecimiento.

Se ha registrado un incremento de las demandas hídricas de los cultivos por efecto del cambio climático (Rodríguez et al., 2007) esto significa que existe un aumento global de la temperatura y del bióxido de carbono (CO₂) durante este siglo; y con respecto a México se ha registrado un decremento en la precipitación en la mayor parte del país, y se pronostica otro efecto que será el deshielo de los polos lo cual provocara una variación del escurrimiento en cuencas causando la mayor afectación en México en Baja California.(Montero y Pérez, 2008).

Los cambios en los patrones climáticos provoca un aumento de temperatura que llega a afectar la tasa de crecimiento en los cultivos, la actividad fotosintética, aumento en su respiración y limita su ciclo fenológico lo cual genera cambios en los requerimientos hídricos del cultivo y que aunado al déficit de precipitación modifica de manera significativa la evapotranspiración. Aunque existe la metodología para estudiar dichos efectos en zonas agrícolas, aun para México no hay suficiente información que cuantifique estos cambios de demandas por efecto climático (Ruiz et al., 2011)

Para poder tener un aprovechamiento eficiente del agua se implementaron técnicas modernas de riego, uno de los más comunes es el riego en surcos en el cual el agua es transportada por los canales que forma el interior del cultivo. Otro sistema es el de aspersión siendo esta aplicación en forma de lluvia teniendo en cuenta que no solo aporta humedad a la raíz sino a toda la planta, y el riego por goteo en el que se transporta el agua en una serie de conductos hasta dosificarla por gotas en la raíz de la planta. Pero para que el riego sea una técnica eficiente es necesario conocer la cantidad de agua para cada etapa de cultivo.

Actualmente en el distrito 003 de Hidalgo lo integran 32 128 productores con 1.5 hectáreas por productor en promedio. El 54 % son ejidatarios y el resto son pequeños productores. (Peña, Vargas y Romero, 2013)

El Plan de Desarrollo 2016-2022 reporta que la superficie dedicada a actividades agrícolas en 2010 era de 602 mil hectáreas de las cuales 153 mil 114 eran de riego (25%) y 449 mil 344 hectáreas de temporal (75%) El 66% de la superficie de riego se localiza en el Distrito de Desarrollo Rural de Mixquiahuala; el 13.83% en el Distrito de Desarrollo Rural de Huichapan; el 9.6% en el Distrito de Desarrollo Rural de Tulancingo y el 10.57% restante se distribuye en los Distritos de Desarrollo Rural de Huejutla, Zacualtipán y Pachuca. En estas áreas es urgente atender el deterioro de la infraestructura hidroagrícola, que provoca baja eficiencia en la conducción y aplicación del agua de riego. La producción predominante en la entidad por su valor económico, en 2015 fue de alfalfa, con un 57% de un volumen total de producción de 7.9 millones de toneladas en 573 mil hectáreas; con un valor mayor de 8 mil 7 millones de pesos.

Además de la alfalfa los cultivos sembrados son maíz y cebada que representan el 60 % de la superficie total sembrada en la entidad. Las hortalizas como jitomate, calabaza, chile, pimiento, lechuga, cebolla son el 2 %, el frijol ocupa el 6 %, la alfalfa 8%, café 4%, forrajes y praderas 13% y otros cultivos el 7 %.

Para atender las necesidades hídricas de toda esta superficie, sobre todo en el maíz es imperativo conocer las fuentes ya sea por suministro de aguas subterráneas o en este caso por aguas residuales que como ya antes ha sido mencionada tienen repercusiones negativas; y salidas del agua como lo es la evapotranspiración donde el agua es transferida del suelo a la atmósfera ya sea por evaporación del suelo o la planta y transpiración por tejidos de la misma, esta tasa de evapotranspiración está influenciada por factores meteorológicos que determinan la demanda evapotranspirativa y afectan la cantidad del agua que el cultivo puede absorber (Andrade, 2000)

III.2 Evapotranspiración (ET)

La FAO (2006), define 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 mediante transpiración del cultivo. Estos dos procesos ocurren de manera simultánea por lo cual una forma de cuantificarlos es mediante la evapotranspiración (mm).

La evaporación es el proceso en el cual el agua pasa de estado líquido a gaseoso; en los cultivos esto ocurre en la superficie de la tierra debido a la radiación solar que emite la energía necesaria para este cambio. Y para que se pueda retirar el vapor de agua de una superficie es necesaria una fuerza que en este caso es la diferencia de entre la presión del vapor del agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua en la atmósfera, cuando este proceso ocurre en la superficie del suelo el espacio de cobertura y la cantidad de agua disponible afectan el proceso.

La transpiración es un componente primario del balance energético de la hoja y del estado hídrico de la planta. Este proceso comprende la evaporación del agua desde las células superficiales en el interior de los espacios intercelulares y su difusión fuera del tejido vegetal principalmente a través de los estomas y en menor medida a través de la

cutícula y lenticelas. Junto al intercambio de dióxido de carbono (CO₂), se determina la eficiencia de uso del agua de una planta. Las hojas pierden agua a través de sus estomas como una consecuencia de la actividad fotosintética de las células del mesófilo (Squeo y León, 2007).

Un gran porcentaje del agua absorbida por las raíces se pierde en el proceso de transpiración; los factores que afectan este proceso son gradiente de presión del vapor y la velocidad del viento, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica deben ser considerados en su determinación.

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada así que puede llegar a medirse por diferentes unidades de tiempo hora, día, 10 días, mes o incluso un ciclo de cultivo.

Como una hectárea tiene una superficie de 10 000 m² y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m³ de agua por hectárea. Es decir 1 mm día⁻¹ es equivalente 10 m³ ha⁻¹ día⁻¹. (Allen et. al., 2006). Hablando del proceso de evapotranspiración se debe tener en cuenta los siguientes conceptos: la evapotranspiración de referencia (ET_o), y la evapotranspiración potencial (ET_p). La ET_o es definida como la cantidad de agua perdida por el complejo suelo-planta en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes; mientras que la ET_p es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubre todo el terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada (Ortiz-Solorio, 2011). Aun cuando se reconoce que estos conceptos son diferentes, ambos indican cantidades máximas de agua perdida en favor de la atmósfera; por ello, en algunos estudios, han sido considerados como equivalentes (McKenney & Rosenberg, 1993; Henríquez-Dole & Miner-Vega, 2014).

III.2.1 Factores ambientales que condicionan la evapotranspiración

Existen factores ambientales que afectan el proceso de evapotranspiración.

Radiación solar, esta es la mayor fuente de energía la cual puede transformar grandes cantidades de agua líquida a vapor esta energía puede variar a causa de la posición del sol y la época del año como la posición geográfica y la cantidad que llega a la superficie es afectada por la turbidez de la atmosfera gracias a las nubes.

Temperatura del aire, a mayor temperatura es mayor la tasa de evaporación, por lo que en un clima cálido y soleado, la pérdida de agua por evapotranspiración es mayor en climas nublados y frescos

Humedad atmosférica; si existe un valor alto es menor la capacidad de absorber el vapor de agua producido por la evaporación, mientras que el aire seco cuenta con mayor capacidad para absorber y transportar vapor de agua igualmente la velocidad del viento afectaría ya que cuando una masa de aire que haya absorbido humedad es desplazada y substituida por otra con menor contenido de humedad, esta es capaz de producir nueva evaporación; la humedad del aire es baja en el día y aumenta en la noche.

Velocidad del viento, la eliminación del vapor depende del viento y las cantidades de energía que se transfieren por turbulencias de aire, si esto no se concretara la tasa de evapotranspiración disminuiría por la cantidad de vapor de agua en el aire.

El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. Por esta razón, distintos cultivos presentan distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente K_c . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c (Allen et. al., 2006). El tipo de **cultivo** la variante y en la etapa de desarrollo en la que se encuentre deben ser considerados para las mediciones en las áreas grandes y bien manejadas ya que características como la altura, rugosidad, reflejo de cobertura en el suelo y características radicales afectan el proceso de evapotranspiración como lo menciona Brown. (2000).

Otros factores como las características del suelo; textura, estructura, densidad, composición química, salinidad, baja fertilidad, ausencia y control de enfermedades e incluso parásitos son factores a considerar según la FAO 56.

III.2.2 Importancia agronómica de la evapotranspiración

La estimación de la *evapotranspiración* es relevante para asegurar el uso del agua con aplicaciones agrícolas como poder determinar de manera certera o más eficiente el requerimiento de riego ya que un exceso en la cantidad del recurso en el suelo provocara una saturación lo que llevara a un daño en la zona radicular de la planta y sobre todo una reducción en la capacidad de extraer agua del sustrato por inhibición de la respiración. Teniendo en cuenta que el método de riego puede modificar el microclima (Llanes, Campos y Muñoz, 2014) la estimación también ayuda al, manejo de recursos naturales, usos ecológicos y otras actividades de planeación (Villa-Nova, Pereira, & Shock, 2007). Este requerimiento de agua es esencial en las etapas de un proyecto y sobre todo en áreas áridas y semiáridas, ya que en estos territorios el recurso hídrico es sumamente escaso y valioso sobre todo para el sector agrícola e industrial por lo cual debe saberse lo más precisa posible.

III.2.3 Métodos para estimar evapotranspiración (ET)

La elección de un método depende de la región como la precisión y sobre todo de la disponibilidad de datos climáticos de la zona estudiada. El concepto de evapotranspiración puede tener diferentes acepciones entre las más importantes son 3 a) evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), b) evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y c) evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{c aj}).

A) Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

Se refiere a que la evapotranspiración, que ocurre sin restricciones de agua, en una superficie cultivada de pasto verde extensa entre 8 a 12 cm con un buen desarrollo y que llega a cubrir en su gran mayoría a la superficie del suelo se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_o. (Ahmad, 1983). Esta

condición de evapotranspiración la definió Thornthwaite en 1948 como evapotranspiración potencial (ETp) consideró que está condicionada principalmente por factores meteorológicos pasando a segundo término el factor suelo y planta.

B) Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se indica como ETc, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas locales.

C) Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que se desarrolla bajo condiciones ambientales diferentes a lo que se le asigna como estándar . En otras palabras, en condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ETc debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua.

La Evapotranspiración de referencia y Evapotranspiración potencial son intercambiables la diferencia de ETP-ETR se denomina déficit. En agricultura se desea que esta sea lo más cercano a cero o cero que significaría que las plantas siempre tengan el recurso agua suficiente para el proceso de evapotranspiración. (Sánchez, 2017)

La estimación de la evapotranspiración a través de métodos directos requiere de equipo costoso llamado lisímetro, que consiste en aislar el suelo de la zona radicular de un cultivo en tanques y mantener controlados los procesos de balance de agua con la mayor exactitud posible de esta manera se obtienen datos con una precisión de hasta centésimas de milímetro. Pueden ser de dos tipos, de balance y de pesada sus dimensiones varían dependiendo de la superficie puede ir desde 1 a 10 m² con profundidad de 1m de suelo ambos tipos de lisímetro se pueden combinar (Ojeda y Flores, 2015).

Otro método es midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo que consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo. Se tienen como entradas: El riego (R) y la precipitación (P). Parte de R y P pueden considerarse como pérdidas en escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática subsuperficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (Faraminal, 2018)

Se han desarrollado metodologías empíricas y modelos para estimar con precisión la evapotranspiración, los cuales se han implementado a diversas escalas espaciales y temporales, desde el más simple (balance hídrico del suelo) hasta el más complejo (covarianza de vórtices, teledetección y scintilometría).

Los métodos se pueden distinguir en cuatro grupos como lo menciona Smith et al. (1996)

A) los métodos derivados de la ecuación III.1 de Penman-Monteith FAO56.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{(T+273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (III.1)$$

Donde:

ET₀: es la evapotranspiración de referencia (mm d-1)

R_n: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹)

G: flujo del calor de suelo (MJ m⁻² d⁻¹)

U₂: velocidad del viento (m s⁻¹)

e_a: presión real de vapor (kPa)

e_s: presión de vapor de saturación (kPa)

Δ: pendiente de la curva de variación de la presión (kPa °C⁻¹)

T: temperatura promedio (°C)

γ : constante psicométrica (kPa °C⁻¹)

Z: elevación sobre el nivel medio del mar (MSL)

λ : calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹).

B) Métodos de radiación en los que incluyen al método de la FAO del mismo nombre y también Priestley and Taylor (Priestley y Taylor, 1972).

Priestley and Taylor

$$ETp = \left(\frac{1,26\Delta Q_n}{\Delta + \gamma} \right) \quad (\text{III.2})$$

Donde:

ETp: Es la evapotranspiración potencial (mm d⁻¹)

Δ : Es el gradiente de la presión de vapor de saturación entre las temperaturas del aire y del agua.

Q_n : Es la radiación neta (Wm⁻²)

γ : Es la constante psicométrica.

C) Métodos de temperatura como Thornthwaite (ecuación III.3), Blaney-Criddle, Turc, Hargreaves-Samani, entre otros (Choque, 2021).

Thornthwaite
$$ETp = 16 \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{d}{30} \right) \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (\text{III.3})$$

Donde:

ETp: Es evapotranspiración de potencial (mm mes⁻¹)

N: Son el número de horas luz día (h día⁻¹) que depende de la latitud.

d: días del mes (día)

t: Es la temperatura media mensual (°C)

Para el cálculo del mismo se debe calcular el índice de calor mensual ($^{\circ}\text{C}$) i_n (III.3.1).

$$i_n = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (\text{III.3.1})$$

Seguido del cálculo del índice de calor anual I ($^{\circ}\text{C}$) sumando los doce valores (III.3.2)

$$I = \sum_{n=1}^{n=12} i_n \quad (1.3.2)$$

Finalmente, se calcula el valor de coeficiente a . (III.3.3)

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1792 \times 10^{-5} I + 0,49239 \quad (\text{III.3.3})$$

Blaney-Criddle

$$ETp = a + b * f \quad (1.4)$$

Donde:

ETp : Es la evapotranspiración de potencial (mm día-1).

ayb : Son los coeficientes de regresión lineal.

f : Es el factor de Blaney-Criddle (III.4.1) (mm día-1).

$$f = P * [0.46 * T + 8,13] \quad (\text{III.4.1})$$

Donde:

P : Es la fracción diaria de las horas de luz porcentaje del total anuales (h anual)

T : La temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$).

Turc

$$ETp = 0,013 * (Rs + 50) \left(\frac{r}{r+15}\right) * \left[1 + \left(\frac{65-HR}{120}\right)\right] \quad (\text{III.5})$$

Dónde:

ETp : Es la evapotranspiración real (mm día-1).

R_s : Es la radiación global (cal cm²día-1).

T : Es la temperatura media (°C).

HR : humedad relativa media (%).

D) Los métodos de evaporación en tanque. (Ortiz y Chile, 2020)

Doorenbos y Pruitt.

$$ET_o = K_p \times E_o \quad (\text{III.6})$$

Donde:

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

E_o : evaporación del tanque (mm d-1)

K_p : Es el coeficiente del tanque evaporímetro (III.6.1)

$$K_p = 0,5321 - 3 \times 10^{-4} \times U_2 + 0,0249 \times \ln(F) + 0,0025 \times HR \quad (\text{III.6.1})$$

Donde:

U_2 : Es la velocidad del viento (ms⁻¹)

F : distancia que existe entre el tanque evaporímetro y el área con cultivo (m).

HR : Es la humedad relativa media (%)

Otra clasificación para estimar evapotranspiración los divide en cinco grupos como lo menciona Ojeda y Flores 2015:

1) Aerodinámicos

2) Balance energético

3) Combinatorios

4) Semiempíricos

5.) Empíricos

Los métodos aerodinámicos están basados en la ley de transferencia de calor y masa, los de balance de energía como antes mencionado en la entrada y salida de masa y energía en la misma cantidad y los combinatorios como lo dice su nombre, mezcla estos dos anteriores. Los semiempíricos están basados en principios de la física para después aplicar una regresión a la ecuación base. Y al final los empíricos están estrictamente basados en los parámetros obtenidos por una regresión.

Todos los métodos presentan limitaciones relacionadas con las condiciones del experimento, así como con la cantidad y calidad de los datos requeridos para la estimación. Pero aun así, la ET es calculada con datos meteorológicos de manera más frecuente ya que la obtención de datos en campo es costosa y de gran dificultad.

Retomando la clasificación de Smith el método más usado y aceptado es la fórmula de Penman-Monteith generada en 1948, pero analizada y modificada por expertos en 1968 quedando con el nombre de Penman-Monteith (Allen et. al., 2006) (ecuación III.1) Guevara (2006), esta fórmula combina los factores que generan las principales pérdidas de agua como lo es la radiación solar, temperatura, humedad de aire y velocidad del viento, permite estimar la ETo y en general presenta buen comportamiento en diferentes regiones climáticas. (Segura-Castruita, 2017)

Cuando es complicado o nulo encontrar los datos precisos de la fórmula se cuenta con una alternativa que es la ecuación III.7 de Hargreaves y Samani HS (Trezza, 2008; Vásquez, Ventura, & Acosta, 2011) (De Melo & Fernández, 2012; Moeletsi, Walker, & Hamandawana, 2013; Chen et al., 2014)

$$ET_0 = 0,0135(t_{med} + 17,78)R_s \quad (III.7)$$

Donde

ET₀: Es la evapotranspiración potencial diaria (mm/día)

T_{med}: Es la temperatura media (°C)

R_s : Es la radiación solar incidente, convertida a (mm/día)

La radiación solar incidente se estima a partir de la radiación solar extraterrestre esto se refiere a la energía que llega a la zona exterior de la atmosfera, en otras palabras, a la radiación que llegaría al suelo si no existiera atmosfera y ya se han realizado tablas (Anexo1) en función de la latitud y mes del año (Allen et al., 1998).

Samani (2000) propone una forma de obtener esta radiación (ecuación III.7.1).

$$R_s = R_o * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (\text{III.7.1})$$

Donde

R_s : Es la radiación solar incidente (mm d⁻¹)

R_o : Es la radiación solar extraterrestre (anexo 1)

KT : Es el coeficiente de cultivo

t_{max} : Es la temperatura diaria máxima (°C)

t_{min} : Es la temperatura diaria mínima (°C).

En esta fórmula lo único complicado de obtener es KT ya que los datos de radiación se encuentran tabulados y las temperaturas son datos empíricos; este coeficiente KT , se puede calcular tomando los datos de presión atmosférica, pero Samanicita a Hargreaves donde recomienda un valor de 0,162 para zonas interiores y 0,19 para las costas. Con esta premisa entonces se tendrá una ecuación simplificada (III.7.2) sustituyendo la R_s de (III.7.1) en la ecuación (III.7) y el valor de KT se colocará como un valor medio 0,17.

$$ET_0 = 0,00023(t_{med} + 17,78)R_o * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (\text{III.7.2})$$

Donde

ET_0 : Es la evapotranspiración potencial diaria, (mm/día)

T_{med} : Es temperatura media diaria (°C)

R_o : Es la radiación solar extraterrestre en, mm/día (anexo 1).

t_{\max} : Es la temperatura diaria máxima ($^{\circ}\text{C}$).

t_{\min} : Es la temperatura diaria mínima ($^{\circ}\text{C}$).

El método de *HS* utiliza la temperatura media y la amplitud estacional a partir de datos de temperaturas máximas y mínimas (además de datos geográficos, como la latitud de las *Estaciones Meteorológicas* o del sitio de estudio, para la estimación de la radiación extraterrestre (Hargreaves & Samani, 1985). Aunque, para la obtención de la radiación, también pueden utilizarse mapas de radiación solar incidente (Campos, 2015), En general, la ecuación de Hargreaves tiende a sobrestimar ET_0 con respecto a la ecuación Penman-Monteith cuando el valor medio diario de la evapotranspiración es bajo y viceversa. Además, cuando la advección de calor sensible es severa, la ecuación subestima hasta un 25% para periodos diarios (Berengena y Gavilán, 2005). Por otro lado, la ecuación de Hargreaves está recomendada para cálculos semanales o incluso periodos más largos, aunque es posible encontrar estimaciones diarias de ET_0 bastante precisas (Hargreaves y Allen, 2003).

La elección del método es determinada por la disponibilidad de datos como ya lo mencionamos y otros de los métodos aplicables cuando solo tenemos la temperatura es Turc donde también necesita la radiación solar y humedad relativa media; el método Blanney-Cridde además de las temperaturas medias necesita estimaciones sobre insolación, humedad relativa del viento y su velocidad (Hernández, 1997).

III.2.4 Información climática de estaciones meteorológicas

Ureña (2011) menciona que a una estación meteorológica se le puede definir como una instalación en donde se tienen los instrumentos destinados a la recolección y registro de las variables meteorológicas, ya sean climáticas, sinópticas o marinas. Las estaciones fueron utilizadas primeramente como una estación propiedad de la marina de los Estados Unidos la cual funcionó desatendida por periodos largos de tiempo, y registro de datos de presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento.

La gran ventaja de las estaciones automáticas es la obtención de información en tiempo real de lugares alejados o que es difícil acceder estas apoyan a mejorar la normalización

de la información meteorológica, ya que con ellas se eliminan los problemas del sistema tradicional como lo es la subjetividad del observador y los errores de digitación (Ureña, 1998)

Las primeras estaciones meteorológicas automáticas estaban equipadas con sensores mecánicos como lo son el termómetro bimetálico, higrómetro de cabello, barómetro de capsula aneroide sensor de precipitación de balancín etc. De estos instrumentos algunos todavía son utilizados por las estaciones automáticas, pero generalmente se prefieren los sensores de salida digital ya que los tradicionales requieren adaptadores y conductores analógicos/digitales.

La estructura general de una estación meteorológica automática es de un grupo de sensores conectados a un sistema de interrogación, un sistema de acondicionamiento de señales y con un sistema de registro este debe ser colocado dependiendo si los datos serán procesados dentro de la estación o se llevarán a un centro independiente. Los sensores actualmente tienen diferentes características y calidades que se adaptan a las estaciones.

Para medir la presión atmosférica se utiliza una amplia gama de dispositivos, teniendo el fundamento de las capsulas aneroides o diafragmas, los cuales para su instalación es importante los efectos de la temperatura más las vibraciones de los golpes de las señales de los transductores, cuando hablamos de aplicaciones marítimas, la frecuencia con la que se debe registrar la presión no afecta las medidas que se hacen en tierra con fines sinópticos en cambio de las tomas marítimas existe el riesgo de una toma en forma vertical por el movimiento de las olas generando una desviación

La temperatura se puede tomar con dos de los termómetros más comunes que son el de resistencia metálica o termistores, se pueden utilizar otros de lámina bimetálica que son de baja calidad en comparación con el de resistencia y provoca errores. Para la humedad ya sea relativa o absoluta, esta siempre es la más difícil de medir, se utilizan sensores, los cuales son muy propensos al deterioro por la presencia de sales haloideas, y aunque se han propuesto técnicas para que no tenga un daño es muy frecuente que ocurra. (Pettifer, 1980). Los sensores que miden la humedad se llaman higrómetros los cuales

son instalados dentro de un protector contra radiación junto con una pila y un transmisor sellados con una tapa resistente a la intemperie por lo antes mencionado.

La velocidad del viento se mide generalmente por anemómetros de cazoletas o hélice ya que son los más confiables al no presentar problemas técnicos, los problemas ocurren en la toma de datos o eliminación de señales del anemómetro como lo señala Deacon en 1961. Para la dirección del viento se utilizan instrumentos analógicos a base de veletas aunque sus registros ya están en forma digital es un poco complicado determinar el periodo de almacenamiento de datos y el método para promediarlos ya que puede afectar los resultados; en general los resultados obtenidos por sistemas automáticos diferirá por lo menos en 10% de estimaciones tomadas por un observador.

En lo que concierne a la medición de la precipitación, es mediante un pluviómetro de depósito basculante el cual funciona de manera simple con un balde que al llenarse se vuelca y genera una carga eléctrica digital un inconveniente de este método es que puede llegar a ensuciarse muy fácil con tierra hojas etcétera; en 1980 Pettifer menciona un pluviómetro ya con la capacidad de indicar la intensidad como la cantidad de lluvia en cierto tiempo.

Otra de las mediciones complicadas de obtener con fiabilidad y precisión es la radiación en las estaciones tradicionales se utilizan sensores que si bien pueden conectarse a las estaciones automáticas estos generan señales muy pequeñas, variables y con mucha interferencia; para solucionar este problema se utilizan amplificadores como su nombre lo dice para ampliar la señal. Los sensores pueden estar fundamentados por los efectos como : calorimétricos, que miden el incremento térmico de una placa metálica de alta conductividad térmica, termoeléctricos que su medición es por la fuerza electromotriz por dos puntos de cubierta de metales distintos que se encuentran a diferente temperatura, los bimetálicos son sensores de tiras que están pintadas de negro que absorbe y de blanco para que refleje esta diferencia hará que las tiras entren en movimiento y darán una inscripción por medio de una aguja; y los fotoeléctricos que son sensores basados en la intensidad de un corto circuito generado por la exposición a la radiación solar (Villalta y Sorto, 2013)

Una vez que se transmiten los datos a los centros deben pasar por un control de calidad, que no es más que una revisión de errores gruesos. Puede ser una comparación de valores extremos por ejemplo una presión mayor a 1060 hPa, que no es posible y se elimina; o una temperatura de 70°C debe ser errónea en la superficie de la tierra; estas correcciones se realizan de manera manual o por sistemas computacionales.

Con la información ya revisada o limpia, se inicia un análisis de pronóstico el cual anteriormente se realizaba en mapas y a lápiz por un pronosticador de manera subjetiva, ahora con la tecnología se utilizan modelos numéricos, basados en ecuaciones matemáticas que describen los procesos más importantes en la atmósfera. (Campetella, Cerne y Salio 2011).

El Programa de Observación Mundial, es una herramienta para generar innumerables observaciones meteorológicas en todo el mundo. Estas observaciones se reúnen mediante el Sistema Mundial de Telecomunicaciones y son elaboradas en los centros meteorológicos o archivadas para ser utilizadas posteriormente. Cuando la Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) inició sus actividades en 1968, cada 24 horas ingresaban unas 100 000 observaciones meteorológicas de las condiciones existentes en la superficie de la tierra y unas 11 000 de la atmósfera superior. Este flujo de datos hacia los centros meteorológicos procedía de 8 000 estaciones terrestres distribuidas en todos los países de la tierra, 3 000 aviones comerciales y de reconocimiento, y 4 000 buques mercantes. Dos tipos de satélites artificiales facilitaban datos de observación a la VMM; los de órbita polar denominados "TIROS", su órbita está situada entre los 800 y 1,400 km de la tierra y pasa por los polos norte y sur. Posteriormente surgieron los satélites geoestacionarios, denominados "GOES", que están colocados en el espacio a 36 000 km, giran a la misma velocidad angular que la tierra y están situados sobre el ecuador.

En México, en el año 2003 se comienza a implementar en la red de observatorios un sistema de captura, validación, codificación y envío de la información cuantificada denominada SICA y en el CNTM "Centro Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas" se inicia la recepción de datos meteorológicos en forma automática a través de INTERNET e INTRANET. De 2005 a 2010 se amplía la red de estaciones meteorológicas automáticas a 133; en Mozatal, Chiapas se coloca un radar

meteorológico nuevo, y en Querétaro se instala otro en el Cerro de la Ronchera. (CONAGUA, 2010)

III.3 Herramientas de percepción remota aplicada a la agronomía.

En los sistemas de información geográfica (SIG) la información obtenida mediante subsistemas, se almacena edita y analiza luego se convierte en mapas y otras bases de datos. Un elemento esencial de estos es la capacidad analítica. Para las cuencas, los usos más frecuentes en los SIG han sido en temas tales como modelamiento hidrológico (predicción del gasto, cálculo de probabilidad de avenidas), estimación del balance hídrico, análisis integrado y planes de manejo de cuencas, y definición de zonas prioritarias para la conservación del agua. (Bocco, 2004).

La percepción remota está definida como una técnica con la cual podemos obtener información de un objeto sin que tengamos contacto directo con él, mediante imágenes obtenidas por un satélite. Los sensores son equipos capaces de coleccionar energía proveniente de los objetos, y transformarla en una señal posible de ser registrada, para presentarla en una forma adecuada, que permita extraerle información (geología y minera) esta energía puede ser acústica (sonares, sismógrafos, sismómetros, etc.), gravitacional (gravímetros) o electromagnética (radiómetros). La percepción remota se limita a utilizar bandas de espectro electromagnético para la obtención de las imágenes desde la luz visible e infrarroja. (Villegas, 2008)

El usar las herramientas de percepción remota brinda ventajas:

Periodicidad en obtener una imagen del planeta y también obtener imágenes de algunas áreas complicadas como los polos desiertos y bosques.

Detección de grandes áreas por la altura de los satélites dando una escala hasta de 1:18000 en una sola imagen.

Datos y coherencia. Los sensores toman datos en un corto tiempo, pero son capaces de ordenar y guardar todos estos datos.

El uso de los satélites se registró desde principios de 1970 (Jewel, 1989) cuando el EarthResourcesTechnologySatellite mejor conocido como Landsat 1, fue lanzado en 1972 recopilando imágenes en banda verde, roja y dos infrarrojas fue utilizado por Bauer y Cipra en 1973 para realizar una clasificación de cultivos en Estados Unidos. Los LANDSAT 1-3 "veían" toda la tierra cada 18 días. Posterior a eso en 1984 se lanzó Landsat 5 y Landsat 6 no llegó a la órbita; los datos obtenidos por Landsat son de dos tipos de sensores, el Scanner Multiespectral (MSS) y uno sensor mapeador temático (MT) asignados a crear diferentes categorías de mapas. En 1997 fue propuesto el lanzamiento de un Landsat 7 que cuenta con un mapeador Temático Reforzado (ETM). En 1979 Francia lanzó un satélite llamado SPOT por sus siglas System Pour l'Observation de la Terre el cual obtuvo imágenes de 20 m en bandas verde, rojo e infrarrojo cercano. (Mulla, 2012). Hasta 1991 se utilizó el sistema de teledetección para la agricultura por Bhatti et al. Al tomar las imágenes de suelo desnudo para estimar materia orgánica y fósforo para el rendimiento de trigo.

III.3.1. Fundamentos de la percepción remota

La percepción remota es una técnica que utiliza la información que percibe de manera remota o a distancia rasgos de la superficie terrestre o de objetos localizados a distancia y esta se registra en un sensor. La "percepción" del objeto puede ser registrada por la reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial también por emisión propia, es preciso que esa energía sea directamente emitida de la superficie de la tierra para que se logre interpretar por los sensores.

La radiación electromagnética definida como la energía en forma de ondas producidas por la oscilación, aceleración o vibración de cargas eléctricas generadas por atracción y repulsión entre electrones y protones, esta onda electromagnética se propaga gracias a los electrones liberados en condiciones específicas que como resultado nos da las tecnologías que ahora conocemos como Bluetooth, wifi, Radio AM y FM las cuales no necesitan algún medio para propagarse a diferencia de las mecánicas estas ondas pueden desplazarse a una velocidad de $c = 300.000 \text{ km/s}$ en el vacío. (Rojas, 2009)

Las ondas electromagnéticas presentan características propias, a partir de las cuales se puede potenciar su uso.

La amplitud de onda (A) es la distancia que existe entre el punto más alto llamado cresta y el eje horizontal de la onda, medida en metros (m), se puede decir que es el representante de la intensidad a mayor amplitud sonora, serán mayores los decibeles.

La Longitud de onda (λ) es la distancia entre una cresta y otra, o de un valle y otro, esta característica es inversamente a la energía que transporta la onda es decir a mayor longitud es menor la energía que se transporta.

La frecuencia (F) se refiere al número de oscilaciones que ha hecho la onda en un tiempo establecido, para medir esta característica se utilizan los hertzios (Hz).

El periodo (T) es el tiempo necesario para que una onda genere una oscilación esto se refiere a lo que tarda en llegar de un valle a otro o de una cresta a otra.

Velocidad (V): En términos de onda es la distancia que recorre la onda en alguna unidad de tiempo dependiendo de características del medio como la elasticidad densidad presión y temperatura.

Al conjunto de esta energía en todas sus diferentes frecuencias se denomina espectro electromagnético, el cual su límite inferior puede ser cero ya que no hay frecuencias negativas, pero si bajas las cuales pueden ser los rayos gamma y rayos X. En contraparte pueden existir kilométricas que son las llamadas telecomunicaciones. La clasificación más común del espectro electromagnético se indica en el (Cuadro III.1).

Cuadro III.1. Clasificación del espectro electromagnético (Villegas, 2008)

BANDA	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)
Rayos gamma	< 10 pm	>30.0 EHz
Rayos X	< 10 nm	>30.0 PHz
Ultravioleta extremo	< 200 nm	> 1,5 PHz
Ultravioleta cercano	< 380 nm	> 789 THz

Luz visible	< 780 nm	> 384 THz
Infrarrojo cercano	< 2,5 um	> 120 THz
infrarrojo medio	< 50 um	> 6,00 THz
Infrarrojo lejano	< 1 mm	> 300 GHz
Microondas	< 30 cm	> 1 GHz
Ultra alta frecuencia- Radio	< 1 m	> 300 MHz
Muy alta Frecuencia- Radio	< 10 m	> 30 MHz
Onda corta- Radio	< 180 m	> 1,7 MHz
Onda Media- Radio	<650 m	> 650 kHz
Onda Larga- Radio	< 10 km	> 30 kHz
Muy baja frecuencia - Radio	> 10 km	> 30 kHz

Las unidades de medida para las ondas cortas son las micras ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ metros), en cambio las más largas se miden en centímetro o metros denominadas comúnmente como microondas y se les da un valor de frecuencia en gigahercios $\text{GHz} = 10^8$ Hz. (Villegas, 2008)

Con las tecnologías actuales, se han detectado frecuencias electromagnéticas inferiores a 30 Hz y superiores a $2,9 \cdot 10^{27}$ Hz Aunque formalmente el espectro es infinito y continuo, se cree que la longitud de onda electromagnética (distancia entre dos valores de amplitud máxima de la onda) más pequeña posible es la longitud de Planck ($l_p \approx 1,616252 \cdot 10^{-35}$ m).

Para la tecnología de teledetección, la parte más importante del espectro electromagnético, es el espectro óptico que comprende del 0.3 y 15.0um. Lo que se encuentra entre 0.38 y 3.0um, es a la que llamamos zona reflejada del espectro, porque la señal que los sensores detectan en esta región, es la que se crea desde la reflexión de energía solar por parte de los objetos de la superficie del planeta. Esta región se puede dividir en tres subregiones: el visible, llamado así por que corresponde a lo que es capaz de ver el ojo humano y va de 0.38 a 0.72 um en este campo de espectro se distinguen tres bandas, la azul, verde y rojo de ahí el nombre de colores primarios. La

segunda división es el llamado infrarrojo cercano de rango 0.72 a 1.3um y el definido como infrarrojo medio es el que se encuentra entre el rango .1.3 a 3.0 um.

III.3.2. Plataformas de percepción remota

Existen dos tipos o sistemas de percepción remota, dependiendo si producen una imagen o no, o si son activos o pasivos dependiendo de la fuente emisora de energía.

a) Activos: generan su propia energía la cual una vez emitida, rebota en un objeto y se recibe la porción que se devuelve y gracias a esto los sensores generan las características interpretando los datos, un ejemplo son las ondas de radio que se emiten por un transmisor, después son reflejadas por un objeto y finalmente son recibidas por un sensor. Regularmente se utilizan para calcular las distancias y ubicación de cualquier objeto. En la agricultura se utilizan para monitorear el estado hídrico de los cultivos. (Hernández. De la Maza y Estados, 2007)

b) Pasivo: Necesitan de una fuente externa de energía, son capaces de detectar el origen de la emisión de energía o del objeto reflejado, estos generan imágenes de mayor valor, debido a que reciben las señales emitidas de forma natural y reflejadas por los objetos brindando mayor y/o mejor información.

Para elegir o comparar un sistema se debe considerar las siguientes características de las imágenes producidas:

Resolución espacial: esta se refiere al tamaño del objeto, si es pequeño es difícil que sea distinguido ya dependerá del uso que se le dará a la imagen, si es considerada una característica relevante; las imágenes de una resolución de 2 metros son de mucha utilidad para la agricultura ya que se logran distinguir los cultivos.

Respuesta espectral: es la habilidad del sistema para responder a una medida de radiación en la banda espectral igualmente depende el uso que se le dará a la información para requerir una longitud de onda específica.

Resolución espectral: es otra habilidad de los sistemas para diferir de la radiación electromagnética de las diferentes longitudes de onda esto igualmente depende del uso.

Por ejemplo si se requiere saber la producción vegetal entonces se necesita una imagen pancromática donde se encuentra la banda azul, rojo, verde y el infrarrojo cercano, mientras la resolución espectral sea mayor en verde e infrarrojo cercano esta es más útil.

El sensor necesita una plataforma sobre cual operar y que se puede encontrar a cientos de kilómetros de la tierra lo que conocemos como satélites cercanos, a miles de metros de altura que se pueden utilizar en aviones, y a nivel de la superficie son fotografías terrestres. Barret y Curtis en 1999 proponen una clasificación (Cuadro III.2).

Cuadro. III.1. Clasificación de satélites según su distancia.

Satelitales Miles de kilómetros	Aéreos Kilómetros	Superficiales Metros
Cohetes	Aviones	Vehículos
Vehículos en órbita (no tripulados) satélites	Helicópteros	Misiles
Sondas espaciales	Globos	Torres

Los sistemas satélites más comúnmente utilizados son:

1. ERS-1 y 2 (Agencia Espacial Europea)
2. SPOT 1, 2,3 y 4 (Francia)
3. IKONOS
4. LANDSAT 5, 7 y 8 (NASA)
5. RADARSAT (Canadá)
6. JERS-1 (Japón)

En México existen centros de investigación así como de administración pública para la generación de información, que cuentan con estaciones de procesamiento de datos de la percepción remota, bases de datos diversas, y de producción de cartografía. La tecnología que se utiliza es la más avanzada, y gran parte de la información de producción está disponible en la internet. Los portales o bases de datos que destacan

son: INEGI, CONABIO, SEMARNAT y órganos desconcentrados de la misma (CNA, IMTA, INE). Si bien existe un acervo importante de datos y equipo para desarrollar las tareas descritas en este trabajo, aún faltan datos básicos a la resolución regional y local, y no siempre existen todos los especialistas que se requieren para aportar información oportuna a los tomadores de decisiones.

III.3.3. Estimación de la evapotranspiración por medio de percepción remota

Con el avance tecnológico, principalmente en el área de las telecomunicaciones, se han desarrollado metodologías que permiten estimar de manera remota variables de interés agrícola a partir de imágenes de satélite. Por ejemplo, usando imágenes Landsat, Google Earthn Engine contiene una recopilación de las imágenes Landsat desde 1984, además una base de datos meteorológicos que dio pauta al desarrollo de una aplicación que mapeara la evapotranspiración. La información se encuentra disponible mediante una herramienta llamada EEflux para Earth Engine Evapotranspiration Flux, basada en el modelo METRIC (Mapeo evapotranspiración a Alta Resolución con Calibración Interna).

a) Modelos basados en el balance de energía superficial. (SEBAL)

Para este modelo interesa la cantidad de radiación neta, esto se refiere a la cantidad de energía que realmente dispone la superficie terrestre para llevar a cabo los procesos físicos y biológicos como la evaporación, y mediante el flujo de calor latente (ET) puede ser estimada la Evapotranspiración del cultivo (ETc)

Este algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance at Land) desarrollado en 1995 por Bastiaanssen, (ecuación 1.8) de balance de energía en zonas de cultivo utilizando las imágenes LANDSAT, obteniendo pixel a pixel los flujos de radiación neta.

$$R_n = \lambda ET + H + G + PH \quad (\text{III.8})$$

Donde

Rn: Es la radiación neta

H: Es el calor sensible (cal/g)

λET : Es el calor latente (J/kg)

G: Es el calor del suelo (°C).

PH: Es la energía que se usa en la fotosíntesis y la que se usa para calentar la biomasa vegetal.

En la herramienta de percepción remota se incorporaron operadores lógicos que automatizan la selección de píxeles en “fríos” y “calientes” que corresponden al balance de energía contrastante en la imagen (Allen et al., 2002).

b) Modelo basado en la estimación de temperatura superficial.

Se podría pensar que si una superficie tiene evapotranspiración es porque cuenta con agua suficiente para liberar mediante evaporación y es preciso tener en cuenta que no todas las superficies tienen la misma capacidad de retención de agua y es variable la cantidad que recibe y liberan y por consecuencia la energía que requieren, esto se ve reflejado entonces en la temperatura que mantendrá esta superficie y es esta la que se estima por los sensores de los satélites (Di Bella et al., 2000). Este método es basado en la derivación del método residual llamado así por el flujo del calor latente se obtiene del residuo de los términos “radiación neta”, flujo de calor del suelo y el flujo del calor sensible el cual algunos autores como Delegido y Casellen, (1993) lo llaman “ecuación simplificada” (ecuación III.9) (Jackson et al., 1997).

$$ET_d = Rn_d * -B \quad (III.9)$$

Dónde:

ET_d : Es la evapotranspiración real diaria (mm/día)

Rn_d : Es la radiación neta diaria, expresada en (mm/día.),

B: Es una constante empírica

$(T_s - T_a)$: diferencia entre la temperatura del suelo y la temperatura del aire medidas cerca del mediodía.

Para esta ecuación se requiere datos tomados en campo de evapotranspiración real neta diaria también la radiación neta diaria, una medida de temperatura del aire a mediodía y la temperatura del suelo, estos valores establecen una relación entre datos de campo y satélites.

Para la agricultura actual la herramienta de percepción remota se ha vuelto indispensable, para analizar paisajes físicos y conocer detalles como los métodos de balance de energía para calcular la evapotranspiración, la modernización por sensores remotos como SEBAL (Bastiaanssen, 1998) y el uso de METRIC (Allen, 2007). Como herramientas de predicción y cálculo de variables de interés que han sido aceptados siendo METRIC-EEFLUX el más utilizado ya que automatiza el cálculo a diferencia de SEBAL (Vázquez, 2019).

En 2017 Zenteno et al. , publicaron un estudio para la predicción del rendimiento de la caña de azúcar en el estado de Morelos, México en el ciclo agrícola de 2009-2010, mediante imágenes Landsat 7 que permitieron obtener los índices NDVI y MSI que es el índice de estrés de humedad y a su vez la evapotranspiración del cultivo (ETc), calculando la variable Kc en función de índices NDVI y utilizando la evapotranspiración de referencia (ETo). De esta forma se obtuvo un rendimiento promedio para la zona de estudio de 114.3 t ha⁻¹.

Otras de las aplicaciones, la registra Aníbal en 2019, donde se genera un balance hídrico diario y mensual a partir del algoritmo SEBAL para poder obtener los requerimientos de agua de los cultivos; ya que solo la cubierta vegetales abastecida por las precipitaciones de manera natural en temporales, pero en verano los cultivos suelen ser más exigentes. Esta metodología permite tener un modelo para dar un pronóstico de necesidad de recurso hídrico.

Sánchez en 2002 menciona que los métodos o modelos propuestos mediante percepción remota deben ser complementarios no alternativos, resaltando que la percepción remota supera por mucho la cantidad de información por la capacidad espacial y de tiempo para tomar los datos.

III.4METRIC (Mapeo de evapotranspiración a Alta Resolución con Calibración Interna)

METRIC es un modelo de balance energético de superficie, El modelo proporciona los mapas de radiación neta (Rn), flujo de calor del suelo (G), calor sensible (H), calor latente (LE), evapotranspiración (ET) y coeficiente de cultivo (Kc).

Este sistema utiliza datos meteorológicos con un intervalo de tiempo a cada hora del sistema de asimilación de datos terrestres de América del Norte (NLDAS), para desarrollar una calibración del balance de energía y el tiempo de ET en las imágenes Landsat y generar el dato de ET de referencia utilizando radiación solar, velocidad del viento, humedad y temperatura del aire a través de la ecuación de Penman-Monteith (Allen et. al ,2015).

La aplicación despliega las bandas térmicas y de onda corta de Landsat para derivar ET (ETa) real del albedo, la vegetación y otros parámetros de la superficie. Las Imágenes METRIC-EEFlux se calibran internamente a partir de la ET de referencia de alfalfa (ETo) utilizando datos meteorológicos cuadrículados para recuperar la fracción de ETo (EToF). Esta fracción se utilizó para extrapolar instantáneas ET (ETins) de acuerdo con las ecuaciones dadas (Niza et. al., 2021).

El primer término, ETins pertenece a ET en cada píxel en el momento del paso elevado del satélite, derivado del flujo de calor latente (ecuación III.10)

$$ET_{ins} = 3600 * \frac{LE}{\lambda * \rho_w} \quad (III.10)$$

Donde:

ET_{ins}: Es la evapotranspiración instantánea (mmh⁻¹)

λ : Es el calor latente de vaporización (Jkg⁻¹)

Pw : es la densidad del agua (kgm⁻³).

La fracción de ET de referencia se calcula como (ecuación III.10.1)

$$ET_oF = \frac{ET_{ins}}{ET_o} \quad (III.10.1)$$

Donde:

$ET_o F$: Es la fracción de evapotranspiración de referencia

ET_{ins} : Es la evapotranspiración instantánea (mmh^{-1})

ET_o : Es la evapotranspiración de referencia

Al final la ET_a en cada pixel se deriva como ecuación III.10.2

$$ET_a = ET_o F * ET_o \quad (III.10.2)$$

Donde:

$ET_o F$: Es la fracción de evapotranspiración de referencia (mm/dia^{-1})

ET_o : Es la evapotranspiración de referencia (mm/dia^{-1})

El principio de EEFlux es congruente con el método tradicional de la FAO para ET real (referencia $ET_o \times K_c$), donde $ET_o F$ es similar al coeficiente de cultivo (K_c). En este método, los píxeles calientes y fríos estimados a partir de ET_o se utilizan en el modelado de flujo de calor sensible (H).

Se ha registrado buenos resultados del sistema Metric EEFlux en una comparación realizada por Niza et. al.(2021) donde menciona que probó tres modelos de balance de energía de fuente única (SEBS, QWater Model y METRIC-EEFlux), para estimar la ET diaria de rotaciones de tierras de cultivo de hinojo / maíz / ravigrás-trébol en el sur de Italia. Dando resultados similares y congruentes entre SEBS y METRIC EEFlux en comparación de QWater Model mostrando una congruencia más débil con respecto a los resultados comparados de los otros dos modelos.

Se realizó una comparación similar entre el programa CROPWAT derivada de índices de vegetación y el método EEFlux, en dos subsistemas en Santiago, Argentina en los años 2014 y 2015 en parcelas de algodón y maíz; concluyendo que el sistema CROPWAT en superficies de grandes áreas puede tener una desviación de los resultados, y aunque los otros métodos son alternativas requieren mayor información ya que el método EEFlux

se caracteriza de manera puntual en la fecha en la que pasa el satélite (Salgado y Mateos, 2019)

Silva en 2011 registró la estimación de evapotranspiración real en una pequeña región en el sur de Goiano, Rio de Janeiro mediante imágenes modis y el método SEBAL, utilizando los datos de estas imágenes como son temperatura del aire, velocidad del viento y algunos coeficientes de este método. Y para 2013 Gordillo et. al., utilizan el modelo METRIC igualmente para determinar la evapotranspiración mediante un balance de energía para después compararla con el sistema de Eddy Correlación en el cultivo de vid en Hermosillo, Sonora, concluyendo que la estimación fue de manera confiable al utilizar este método, y sugiriendo que se generen más pruebas para seguir evaluando la precisión del método.

III.5 Requerimientos hídricos de cultivo bajo riego

El requerimiento de riego se define como la cantidad de agua necesaria para que un cultivo pueda satisfacer la pérdida por la evapotranspiración, y representa el agua necesaria para que los cultivos crezcan óptimamente (FAO, 2016).

Este requerimiento tomo el supuesto de que la precipitación es ausente y se expresa como la ecuación 1.11 lo cual se puede discernir que la evapotranspiración es igual a la lámina regada.

$$R_h = V_{ET} - V_R \quad (\text{III.11})$$

Donde:

R_h : Es el requerimiento hídrico del cultivo (mm/día)

V_{ET} : Es el volumen de agua evotranspirado por el cultivo (mm/día)

V_R : Es el volumen de riego suministrado al cultivo. (mm/día)

IV MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1 Descripción de la zona de estudio.

La localidad originalmente llamada “Tepatepec” en 1650, se conoce actualmente por el municipio de Francisco I. Madero, cuyas coordenadas geográficas son 20° 15' 20" de latitud norte y 99° 00' y 10" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, altitud entre 1900 y 2 700 m . Se encuentra ubicado a 53 kilómetros de la capital del Estado de Hidalgo (Figura IV.1).

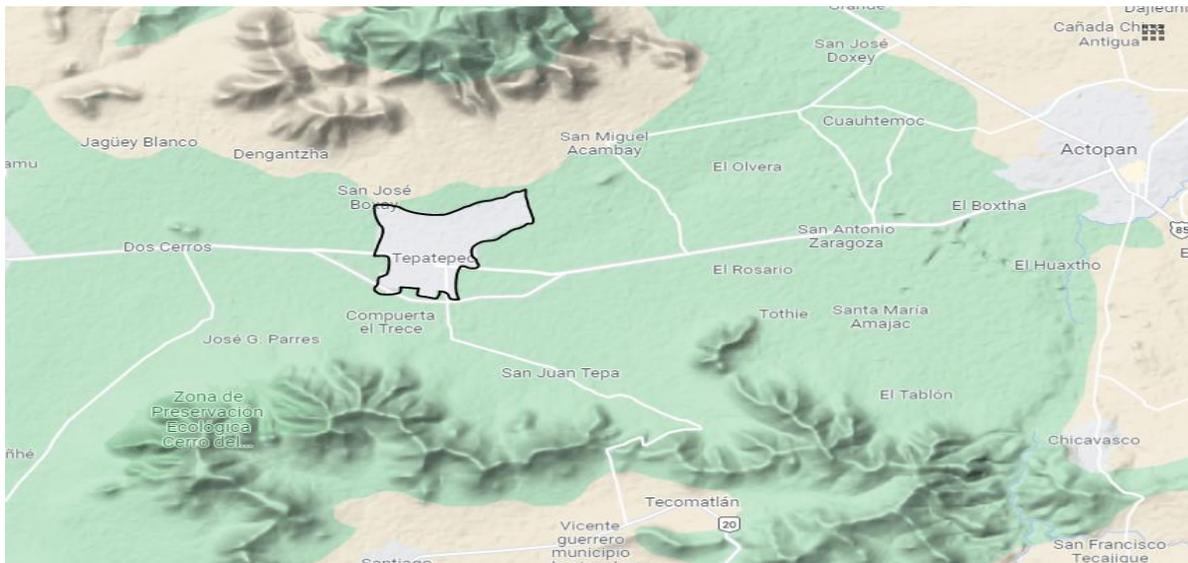


Figura IV.1. Ubicación de la zona Tepatepec INEGI 2021

El Municipio colinda al norte con San Salvador, al sur con los municipios de Ajacuba y Tetepango, y al oeste con los municipios de Progreso y Mixquiahuala. Representa un 0.5% de la superficie total del Estado. Se enlistan algunas características biogeográficas del municipio de Francisco I- Madero (Cuadro 2.1).

El clima, es Bs1K seco estepario con lluvia en verano (Inzunza 2005), con una precipitación total anual de 581.4 mm y temperatura media anual de 17.5 °C. La vegetación es escasa y está formada por matorrales xerófilos, con la dominancia de especies espinosas tales como mezquite (*Prosopissp.*), lechuguilla (*Agave lechuguilla sp.*), garambullo (*Lophocereussp.*), cardón (*Pachycereussp.*) y ocotillo (*Pringleisp.*) (Domínguez et. al. 2011).

CuadroIV.1. Características biogeografías del municipio Francisco I. Madero INEGI (1998)

Fisiografía	Eje Neo volcánico (100.0%) Subprovincia Provincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (100.0%) Sistema de topoformas Sierra (51.0%) y Llanura (49.0%)
Clima	Rango de temperatura: 12 – 18°C Rango de precipitación :400 - 600
Geología	Periodo Neógeno (75.45%), Cretácico (3.0%) y Cuaternario (1.0%) Roca Ígnea extrusiva: volcanoclástico (55.45%) y basalto–brecha volcánica básica (20.0%) Sedimentaria: caliza (3.0%) Suelo: aluvial (1.0%)
Edafología	Suelo dominante Vertisol (34.0%), Leptosol (32.0%), Calcisol (13.0%) y Phaeozem (0.45%)
Hidrografía	Región hidrológica Pánuco (100.0%) Cuenca: R. Moctezuma (100.0%) Subcuenca R. Actopan (91.0%) y R. Tula (9.0%) Corrientes de agua Intermitentes
Uso del suelo y vegetación	Uso del suelo Agricultura (56.45%) y zona urbana (20.55%) Vegetación Matorral (14.0%), bosque (8.0%) y mezquital (1.0%)

El motivo de la selección de la zona es que, en 2015, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval), registra en materia de agricultura, que en este municipio se destinaron más hectáreas para la producción de maíz, obteniendo 24, 217 ton, con un valor de \$ 800,459 pesos, pero en cuanto a volumen producido la alfalfa verde lo supero con 244 085 ton, que tuvieron un valor monetario de \$740 751 pesos. Y aunque ocupa el 6to lugar de índice de desarrollo humano a nivel estado la mayoría de la población vive de manera marginal.

Los registros recientes de RPDA (Registro Público de Derechos del Agua) indican que del total de los usos consuntivos del agua, alrededor del 61 % proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos) y 39 %, de fuentes subterráneas (acuíferos). De acuerdo con datos del Sistema Nacional de Información del Agua, en 2019, el sector agrícola utilizó 75.7 % del volumen total concesionado.

Los registros del año 2019 muestran al estado de Hidalgo en el octavo lugar con 87 mil hectáreas, de los 29 estados con más superficie regada. (Figura IV.2) (CEDRESSA, 2021)

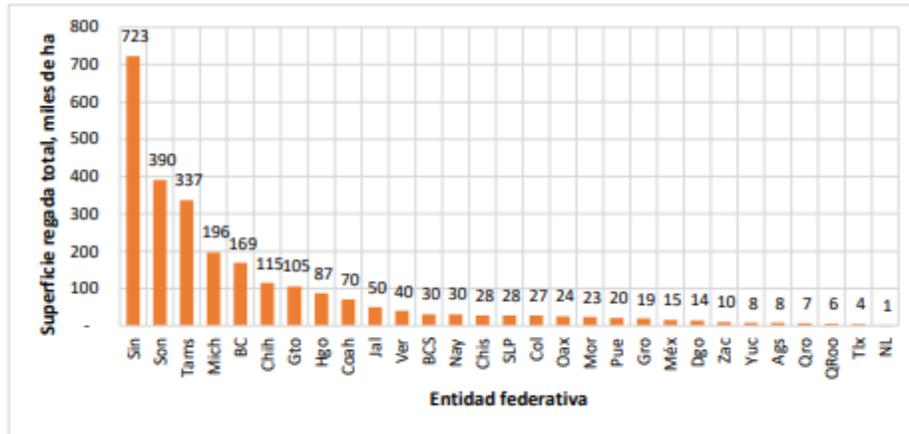


Figura IV.2. Superficie regada total de los distritos de riego 2018-2019, por entidad federativa (CEDRESSA, 2021)

http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/61Distritos_riego_concesiones_agua.pdf

Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo tiene registro de más de 100 años, para la actividad agrícola con aguas residuales, actualmente en este distrito se cultivan 50,000 ha (Cuadro 2.2), siendo el maíz (*Zea Mays*) y la alfalfa (*Medicago sativa*) los principales cultivos (Cornejo et. Al. , 2012)

Distrito de Riego 100 Alfajayucan, Hidalgo, con una superficie de 26 016 hectáreas (ha), comprende tres Unidades de Riego, Chilcuautla, Alfajayucan e Ixmiquilpan, que localizados en los municipios de Tula, Tezontepec, Mixquiahuala, Tepetitlan, Alfajayucan, Chilcuautla, Ixmiquilpan, Tasquillo (CONAGUA 2016). Las fuentes de abastecimiento de agua en el DR 100 son las aguas superficiales que escurren en las presas de almacenamiento Endho, Lic. Javier Rojo Gómez, Lic. Vicente Aguirre, y las presas de derivación, Chilcuautla, Felipe Ángeles, el Maye, El Tecolote, Pallares, Xotho. En este distrito se registró los últimos 10 años para el ciclo de cultivo otoño-invierno (avena, cebada, coliflor, haba, trigo, otros cultivos), para el ciclo Primavera-Verano (calabacita, chile, frijol, coliflor, maíz, jitomate, tomate, otros cultivos) y cultivos perennes (alfalfa, frutales y otros pastos) (Luna et. Al. 2021).

Distrito de Riego 112 Ajacuba, Hidalgo Los cultivos que destacan en el distrito de Ajacuba son alfalfa, maíz grano, coliflor y avena forrajera, siendo una superficie de 26,481 hectáreas y en menor medida se cultivan chile seco, tomate verde, calabacita y chile verde. Este distrito se destaca por la producción de maíz grano, alfalfa y avena forrajera con una superficie sembrada de 5,931 hectáreas. (García, 2019).

Cuadro IV.2. Superficie sembrada y volúmenes de agua registrados en el año 2012 para diferentes ciclos de cultivo en tres distritos de riego del Estado de Hidalgo.(CONAGUA, 2013)

Distrito de Riego	Ciclo de cultivo	Superficie sembrada (Ha)	Total de superficie (Ha)	Volumen distribuido Miles (m ³)
003 Tula	Otoño - Invierno	5,671	55,785	914,118
	Primavera- Verano	19,766		
	Perenes	25,344		
	Segundos cultivos	5,004		
100 Alfayuca	Otoño - Invierno	3,979	28,633	483,957
	Primavera- Verano	11,426		
	Perenes	13,228		
	Segundos cultivos	-		
112 Ajacuba	Otoño - Invierno	900	6,271	40,945.7
	Primavera- Verano	3,277		
	Perenes	1,965		
	Segundos cultivos	129		

IV.2 Obtención de información meteorológica para estimar evapotranspiración Hargreaves- Samani.

Los datos fueron obtenidos (Cuadro 2.3) de la estación meteorológica Actopan, por medio del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). CLImate COMputing project (CLICOM) <http://clicom-mex.cicese.mx/> el cual es un sistema para manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas. Las observaciones son diarias recopiladas durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las

diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información, y actualmente se encuentran datos desde 1920 hasta 2012.

CuadroIV.3. Características de la estación meteorológica y de los datos obtenidos deCLICOM consultado en marzo 2020.

Fuente :	CLICOM http://clicom-mex.cicese.mx/
Núm. de Identificación:	13060
Estación:	ACTOPAN-HGO
Posición:	20.2652777778N -98.9658333333W
	Altitud 1955msnm
Variable:	Temperatura máxima (°C)
	Temperatura mínima (°C)
	Temperatura media
Fecha Inicial:	10/01/1953
Fecha Final:	07/01/2016
Datos ordenados en:	mes , día y valor de temperatura

Estos datos se descargaron en formato Excel 2010 (.xlm) para su mejor tratamiento y manejo, una vez ordenados en hojas por cada mes , donde cada hoja contienen todos los datos registrados por año, se obtuvieron los datos promedios, para después calcular la ET diaria, mediante la ecuación (III.7.2)de Hargreaves- Samani, sustituyendo los datos de temperatura media , máxima y mínima.

$$ET_0 = 0,00023(t_{med} + 17,78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (III.7.2)$$

Donde

ET₀: Es la evapotranspiración potencial diaria, (mm/día)

T_{med}: Es temperatura media diaria (°C)

t_{max}: Es la temperatura diaria máxima (°C).

t_{min}: Es la temperatura diaria mínima (°C).

R₀: Es la radiación solar extraterrestre en, (mm/día) (anexo 1).

Se utilizó los valores asignados en latitud 22 en el hemisferio norte por la ubicación geográfica de la zona de estudio, cambiando para cada mes el valor.

Ya obtenida la ET_o se aplica la ecuación (IV.1) para la obtención real de la evapotranspiración multiplicándola por el coeficiente de cultivo.

$$ET_r = ET_o * K_c \text{(IV.1)}$$

Donde:

ET_r : Es la evapotranspiración real del cultivo (mm/día)

ET_o : Es la evapotranspiración potencial (mm/día)

K_c : Es el Coeficiente de cultivo

El K_c se obtuvo de los cálculos ya registrados (Palacios, 2002) por día juliano para el cultivo de maíz (Cuadro IV.4) y alfalfa (Anexo 2), tomando en cuenta que en el país se realizan dos siembras en el año Otoño- invierno y Primavera – Verano una iniciando en abril y otra en octubre terminando en septiembre y marzo respectivamente.

CuadroIV.4. Valores de Kc para cultivo de maíz en un ciclo agrícola. (Palacios, 2002)

día juliano	Kc	día juliano	Kc	día juliano	Kc
1	0.52	56	0.78	111	1.06
2	0.51	57	0.79	112	1.06
3	0.5	58	0.80	113	1.06
4	0.49	59	0.81	114	1.05
5	0.48	60	0.83	115	1.05
6	0.47	61	0.84	116	1.05
7	0.46	62	0.85	117	1.05
8	0.45	63	0.86	118	1.04
9	0.45	64	0.88	119	1.04
10	0.46	65	0.89	120	1.04
11	0.46	66	0.90	121	1.03
12	0.46	67	0.91	122	1.03
13	0.47	68	0.93	123	1.02
14	0.47	69	0.94	124	1.02
15	0.47	70	0.95	125	1.02
16	0.48	71	0.96	126	1.02
17	0.48	72	0.98	127	1.01
18	0.48	73	0.99	128	1.01
19	0.49	74	1	129	1.01
20	0.49	75	1.01	130	1.01
21	0.50	76	1.01	131	1.00
22	0.50	77	1.02	132	1
23	0.50	78	1.02	133	0.99
24	0.51	79	1.03	134	0.99
25	0.51	80	1.03	135	0.98
26	0.52	81	1.04	136	0.98
27	0.53	82	1.04	137	0.97
28	0.54	83	1.05	138	0.96
29	0.56	84	1.05	139	0.96
30	0.57	85	1.06	140	0.95
31	0.58	86	1.06	141	0.94
32	0.59	87	1.06	142	0.94
33	0.60	88	1.06	143	0.93
34	0.61	89	1.07	144	0.93
35	0.61	90	1.07	145	0.92
36	0.62	91	1.07	146	0.92
37	0.63	92	1.07	147	0.91
38	0.63	93	1.07	148	0.91

día juliano	Kc	día juliano	Kc	día juliano	Kc
39	0.64	94	1.07	149	0.9
40	0.64	95	1.08	150	0.90
41	0.65	96	1.08	151	0.89
42	0.66	97	1.08	152	0.89
43	0.66	98	1.08	153	0.89
44	0.67	99	1.08	154	0.88
45	0.67	100	1.08	155	0.88
46	0.68	101	1.08	156	0.87
47	0.68	102	1.08	157	0.87
48	0.69	103	1.08	158	0.87
49	0.69	104	1.07	159	0.87
50	0.7	105	1.07	160	0.86
51	0.71	106	1.07	161	0.86
52	0.73	107	1.07	162	0.86
53	0.74	108	1.07	163	0.86
54	0.75	109	1.07	164	0.85
55	0.76	110	1.06	165	0.85

IV.3 Obtención de imágenes LANDSAT para estimar evapotranspiración mediante METRIC.

Para este trabajo se utilizó una computadora HP Laptop 15 bw0xx con procesador AMD A9-9420 RADEON R5, 5 COMPUTE CORES 2C+3G, Sistema operativo de 64 bits, procesador x64.Windows 10 Home Single Language, Versión21H1.

Las imágenes fueron obtenidas en formato geo-TIFF de un tamaño aproximado de 200 Mb. Con una resolución espacial de 30m corregidas geográficamente con el sistema de coordenadas WGS84 y la proyección transversal de mercator (UTM zona 14 Norte), para una sola fecha Landsat una por mes, de enero a diciembre del año 2019, con la menor nubosidad posible por medio del programa EEFLUX (EarthEngineEvapotranspirationFlux) esta es una versión de METRIC (MappingEvapotranspiration at highResolutionwithInternalizedCalibration) en la página de internet <https://eeflux-level1.appspot.com> con la siguiente metodología:

1. Se registran las coordenadas o se coloca el puntero en la posición que se encuentre la zona de estudio, posterior del lado izquierdo se visualiza un

marcador donde se puede especificar la fechas de inicio y termino y se da clic en el botón de “buscar imagen” (Figura IV.3),

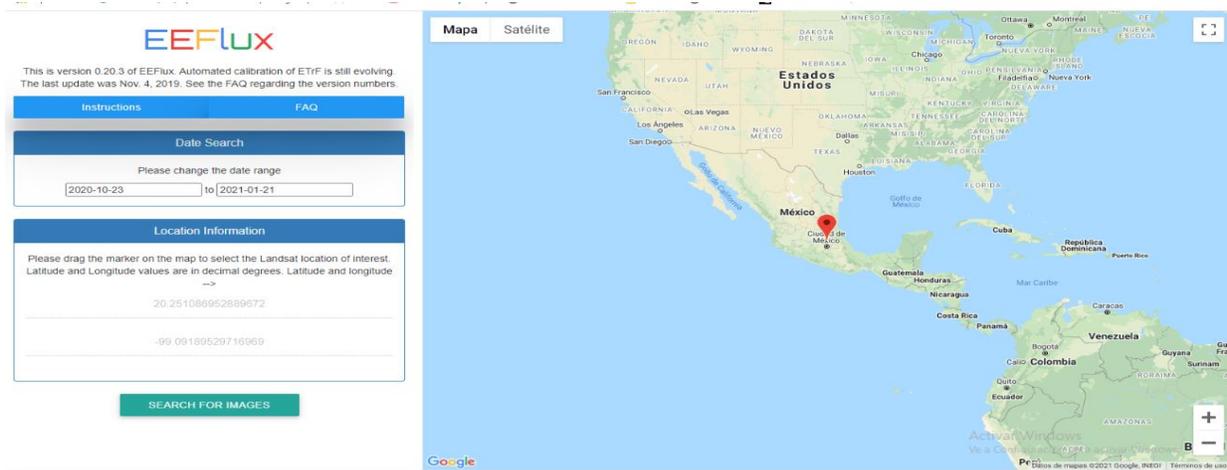


Figura IV.3 Pantalla principal del sistema MetricEEFlux consultada septiembre 2021

2. La herramienta da un listado de todas las imágenes registradas de la zona en el satélite, en este listado (Figura IV.4) nos indicara la fecha de la imagen y el porcentaje de nubosidad.

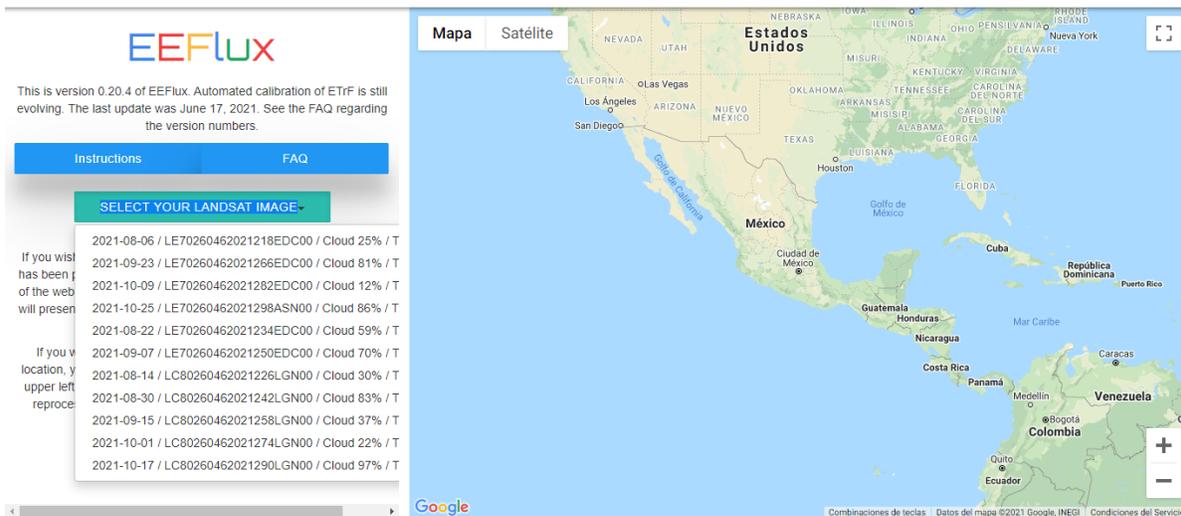


Figura IV.4. Listado de imágenes resultado de la búsqueda en sistema MetricEEFlux

3. Al elegir la imagen deseada arrojará un menú en el cual podemos observar lo que el satélite puede medir y a su vez descargar en formato TIFF. Como es NDVI,

Albedo, cubierta de terreno, temperatura de la superficie, ETr y ETo entre otros. (FiguraIV.5)

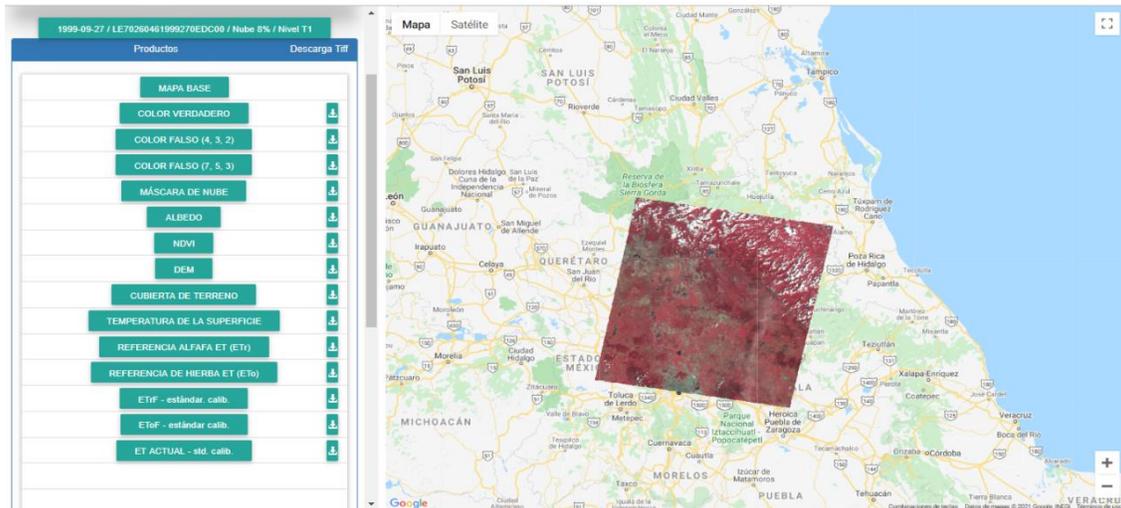


Figura IV.5 Pantalla del sistema Metric EFlux correspondiente al menú y solicitud de imágenes.

- Las 12 imágenes (CuadroIV.5) obtenidas se procesaron en el programa QGIS versión 3.10.10-A Coruña descargado de manera gratuita en la página <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>.

CuadroIV.5 Características de las imágenes descargadas en METRIC EFlux

Nombre de la imagen	Fecha de captura	% de nubosidad
LE70260462019021EDC00	21-ene-19	0%
LE70260462019053EDC00	22-feb-19	11%
LE70260462019085EDC00	26-mar-19	14%
LE70260462019101EDC00	11-abr-19	0%
LE70260462019149EDC00	29-may-19	28%
LE70260462019181EDC00	30-jun-19	10%
LE70260462019197EDC00	16-jul-19	21%
LE70260462019213EDC00	01-ago-19	1%
LE70260462019261EDC00	18-sep-19	12%
LE70260462019293EDC00	20-oct-19	24%
LE70260462019325EDC00	21-nov-19	14%
LE70260462019357EDC00	23-dic-19	7%

- En el programa QGIS se colocó una capa con 5284 parcelas de Tepantepec la cual fue proporcionada por el jefe de sección del módulo que apoya a llevar los

registros de dosificación de agua en el año 2020, en esta capa se muestran delimitadas las parcelas de la zona de estudio (Figura IV.6).

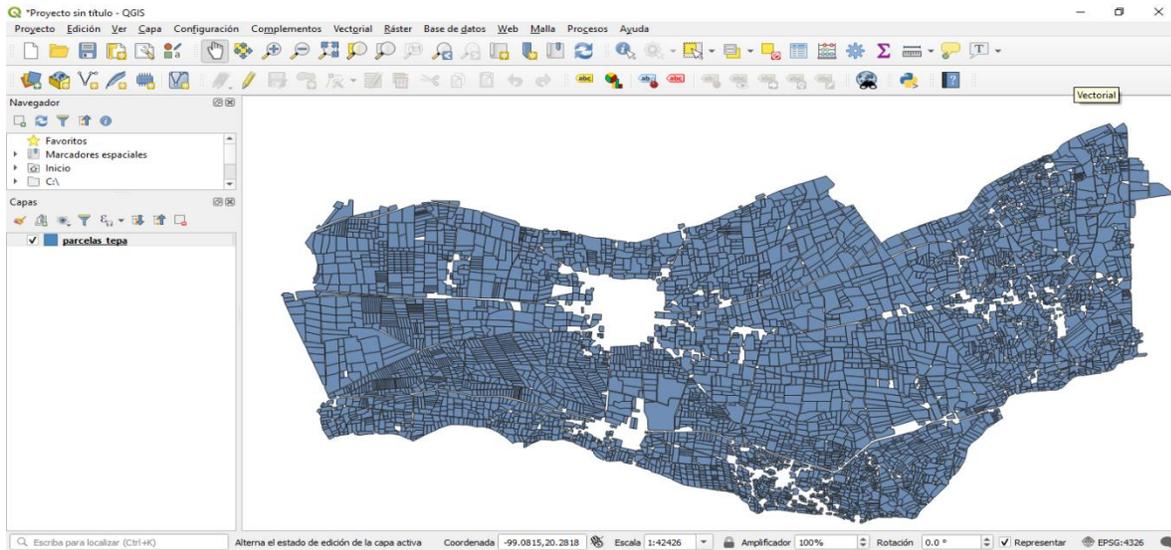


Figura IV.6. Capa en QGis de la delimitación de las parcelas de Tepantepec.

Entre los atributos que presenta esta capa (Cuadro 3.6) los más relevantes son la superficie física y la superficie de riego a la cual se tiene derecho.

CuadroIV.6. Atributos que contiene la capa Tepantepec.

Atributos	Datos
Clave de Distrito de Riego	003
MODULO	5
SECCION	34
ESTADO	13
MUNICIPIO	23
EJIDO	0
GRUPO	0
SISTRIEGO	1
SUPFISICA	5742.75 ha. Totales
SUPRIEGO	5741.81 ha totales

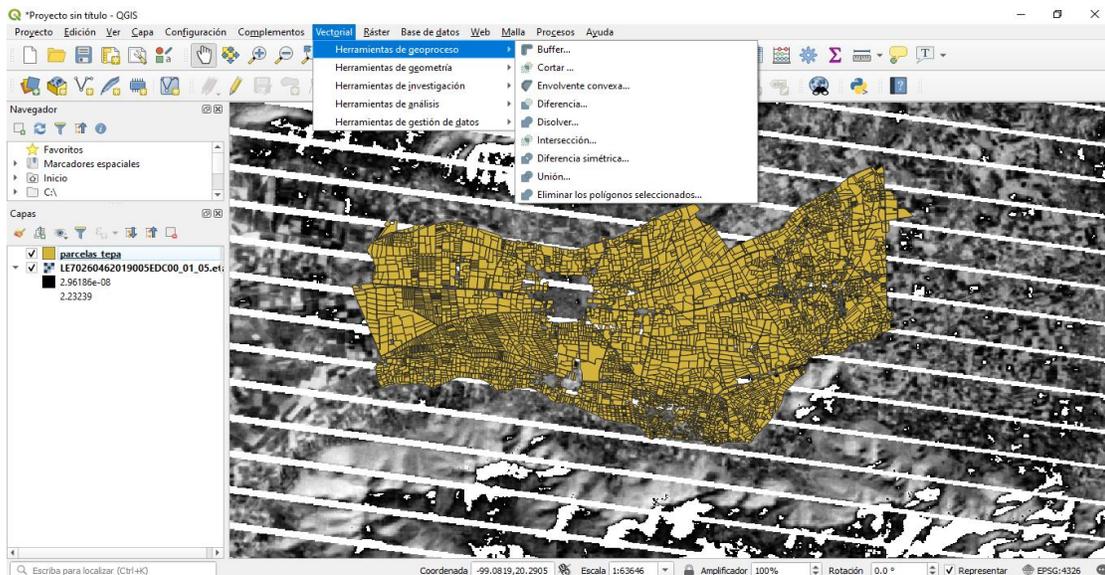
IV.3.1 Estimación de evapotranspiración mediante método METRIC.

Este modelo obtiene la ETr mediante un balance de energía derivada de las imágenes de banda térmica provenientes de los satélites Landsat 7 los valores se obtienen mediante una calibración interna en el cálculo de calor sensible H, basada en la relación

lineal entre la temperatura radiométrica y la temperatura del aire, se hace la selección de dos píxeles caliente y frío. El píxel cálido corresponde a un suelo desnudo que presenta una alta temperatura y un NDVI típico de este tipo de cubiertas en el que se considera que existe poca o ninguna ET_r de la imagen en zonas no desérticas. El píxel frío, es el extremo opuesto al anterior y marca el techo evapotranspirativo en la imagen, que corresponde a un cultivo de regadío preferiblemente alfalfa o maíz en óptimas condiciones y densa cubierta vegetal presentando, por tanto, un elevado NDVI y una baja temperatura. (González et al., 2015). Las imágenes obtenidas están sujetos al paso del satélite en este caso la plataforma (EEFlux) obtiene dos imágenes, al mes variando el grado de nubosidad.

La observación de los píxeles fríos y calientes se obtiene igualmente con la ayuda del programa QGIS, generando una modificación de las propiedades de la capa:

1. Se coloca ambas capas en el programa QGIS para poder realizar un recorte de la imagen, que corresponderá solo a la zona de estudio (Figura 2.7) esto puede ser opcional ya que se puede hacer solo con la imagen descargada. Primero se ingresa al menú de “vectorial” y después a la opción “herramientas de geoprocreso”.



FiguraIV.7.Pantalla del programa QGis mostrando el menú de vectorial de la herramienta vectorial.

2. Se elige la opción cortar, donde desplegará un menú para elegir la capa de “entrada” que será la imagen descargada de Metric EFlux y la capa de “corte” que es la de parcelas. (Figura IV.8).

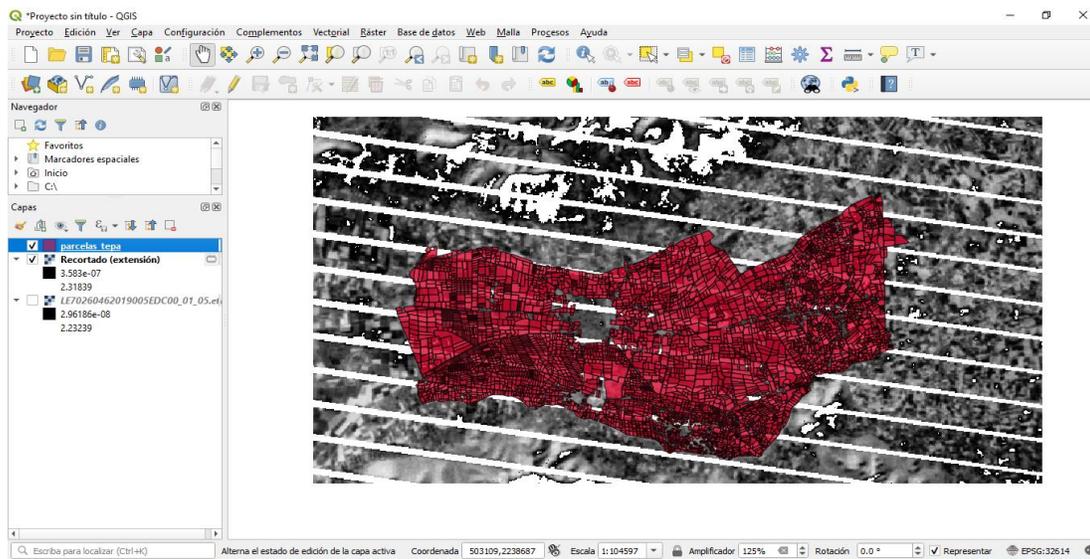


Figura IV.8. Pantalla del programa QGis mostrando la capa recortada de Metric EFlux.

3. A la capa de parcelas se le hace una modificación en las propiedades de la limitación de las parcelas. Dando click derecho en la capa y seleccionar propiedades (Figura IV.9), en la opción relleno se selecciona “sin relleno” y se elige un color para la línea de división (Figura IV.10).

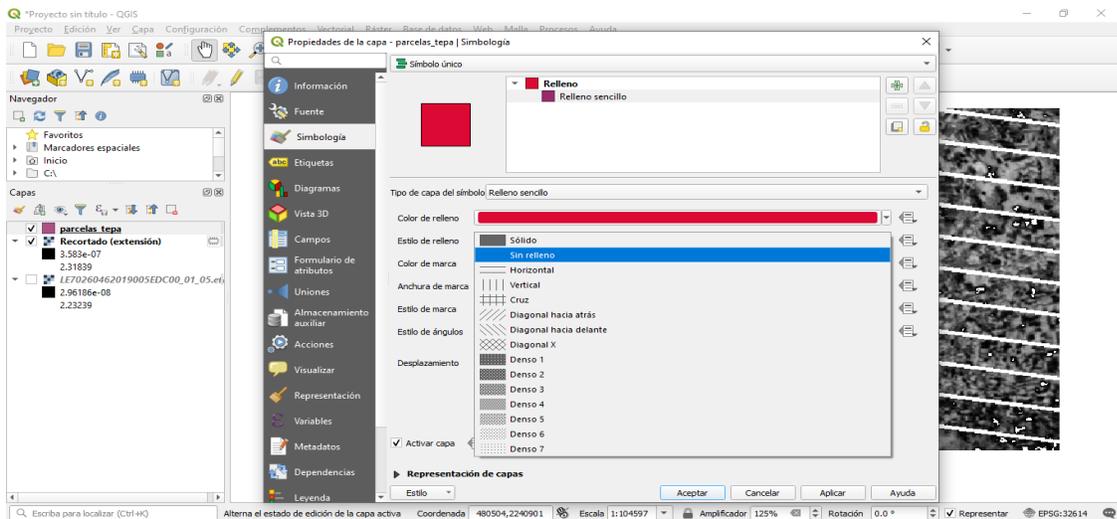


Figura IV.9. Pantalla del programa Qgis mostrando el menú de simbología

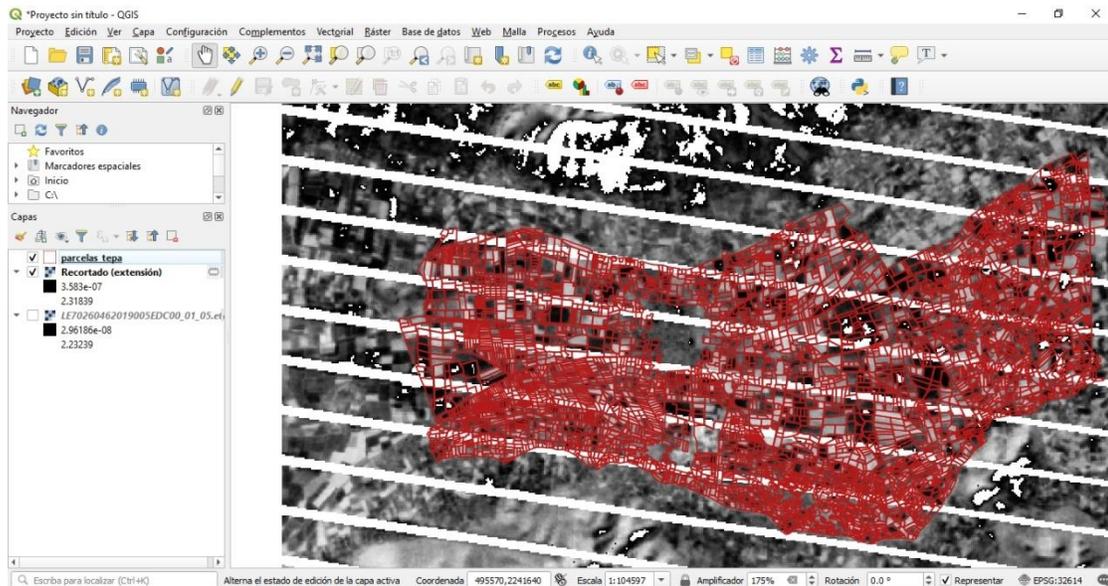


Figura IV.10. Capa de las parcelas solo con los límites marcados sin relleno de superficie.

4. Posteriormente se da click derecho en la capa descargada que ahora aparece como “recortada” y se selecciona la opción “propiedades”, para después seleccionar la opción “simbología” (Figura IV.11).

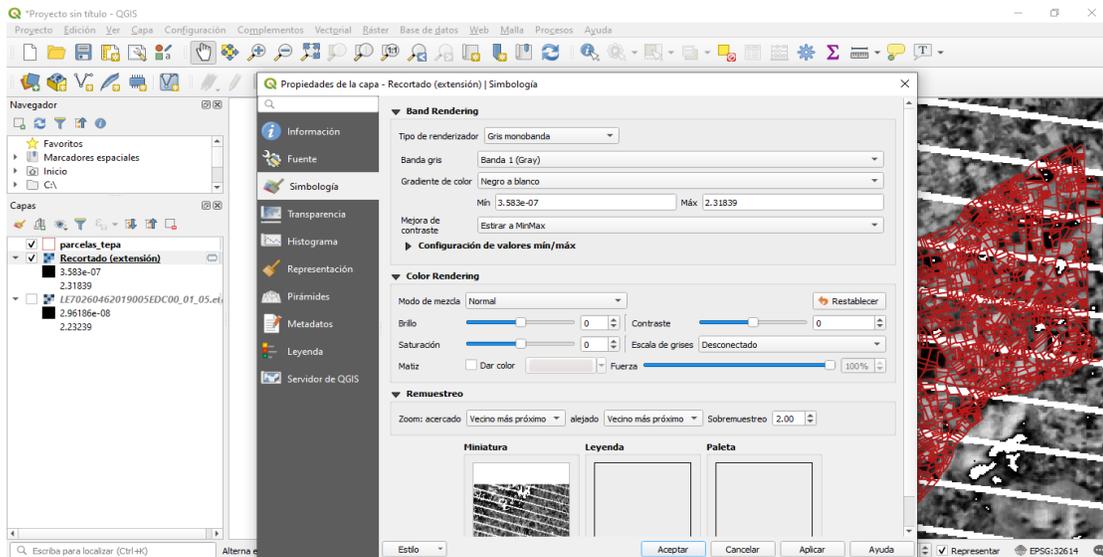


Figura IV.11 Pantalla del programa QGis mostrando el menú de simbología

5. En el menú de simbología (Figura IV.12) se selecciona la opción de “pseudocolor monobanda” en el apartado de tipo de redendizador. En la opción banda debe indicar “banda 1” y en la opción interpolar se elige “lineal”.

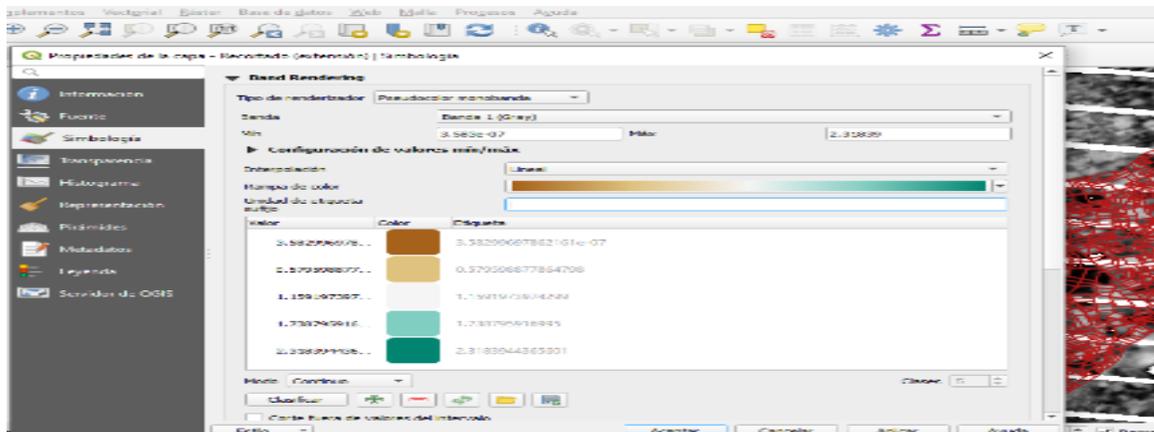


Figura IV.12. Pantalla del programa QGis mostrando el menú para cambio de niveles de datos.

6. El menú de simbología permite seleccionar en la gama de colores, el cual queda a elección del autor, una vez elegidos se da click en el botón de aplicar, para que el programa muestre una escala de colores que será la representación de los pixeles fríos y calientes conforme a los valores de la ETr (Figura IV.13).

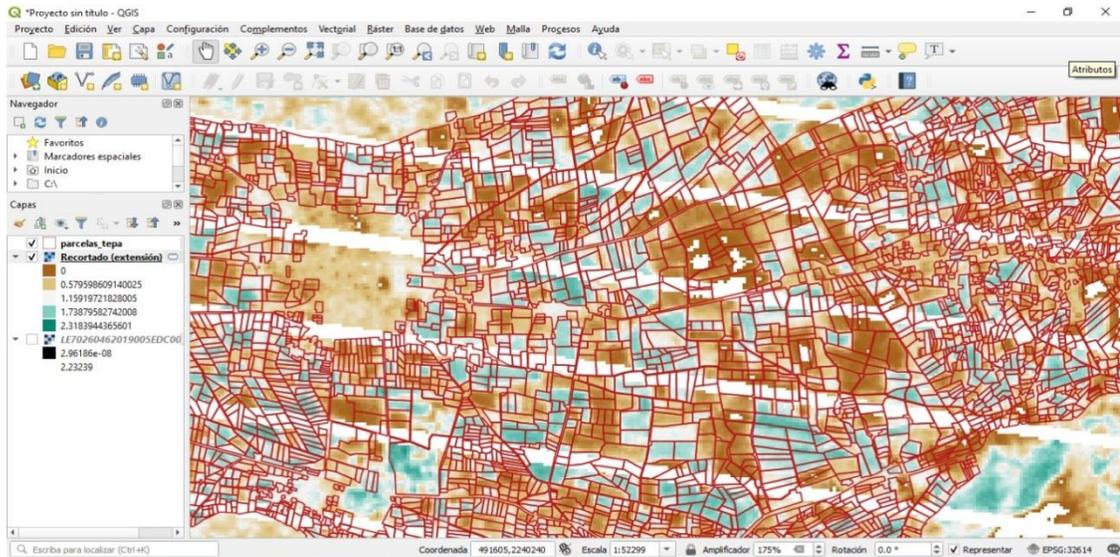


Figura IV.13. Pixeles fríos y calientes representados por los colores azul y café.

Para obtener los valores de ETr en formato numérico:

Se colocó la capa descargada de Metric EEFLUX junto con la de parcelas Tepantepec en el programa QGIS (Figura IV.14) para después asignar valores de la imagen satelital a cada pixel de la capa de la parcela.

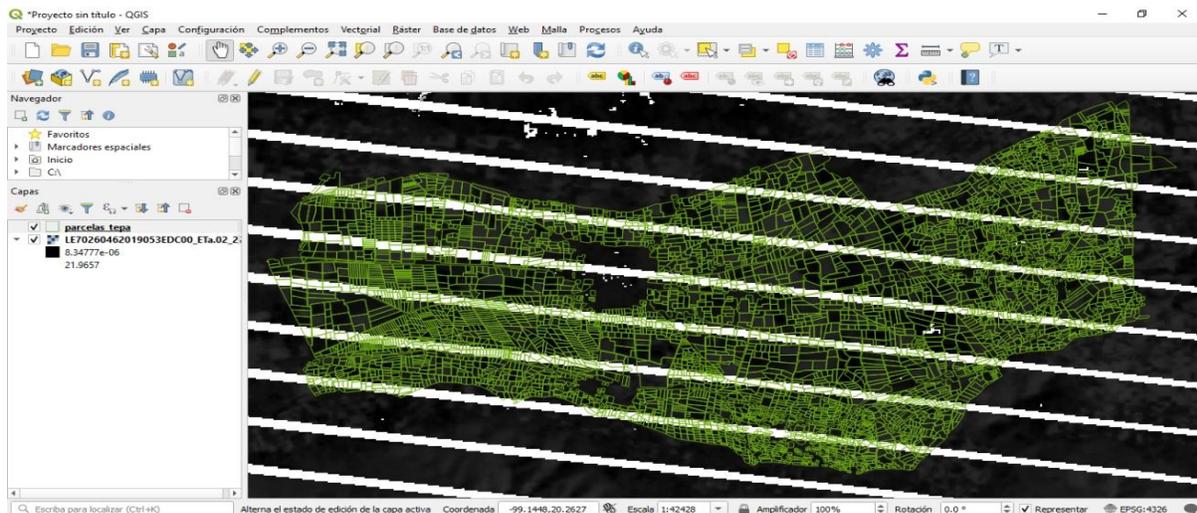


Figura IV.14. Programa QGIS con imagen de enero 2019 descargada de Metric EEFlux y capa de parcelas de Tepantepec.

1. Para obtener un valor representativo se utiliza el promedio de los valores, con la función de estadística de la zona en la carpeta de procesos, donde se coloca

la capa raster que contiene los datos y posteriormente se selecciona la capa a la que serán asignados (Figura IV.15), para finalizar el proceso se da clic en ejecutar.

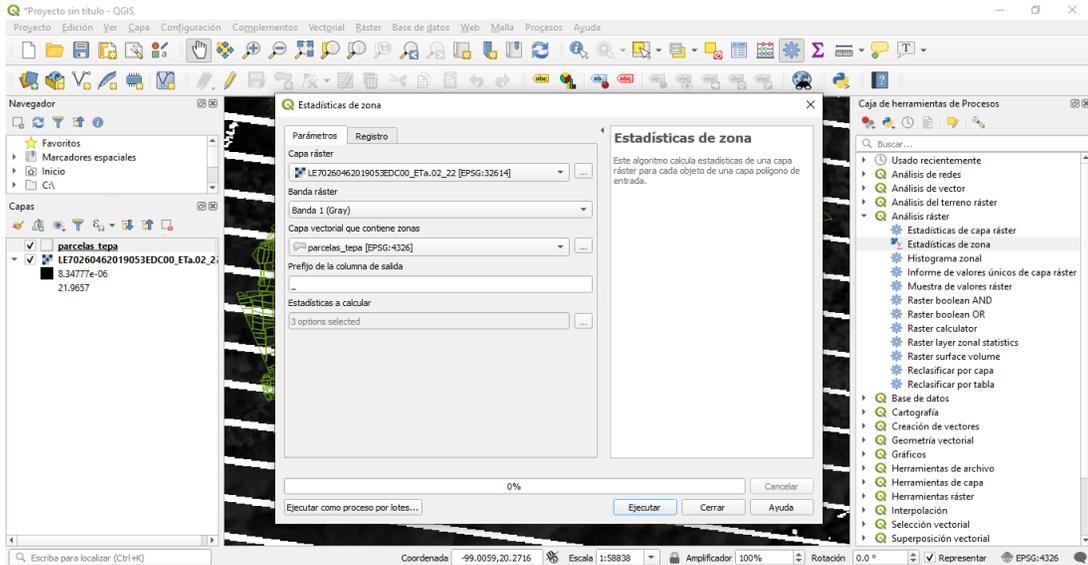


Figura IV.15. Menú estadísticas de zona en Qgis.

2. Para obtener los datos asignados en un formato ordenado en este caso en forma de base de datos se ingresa en la capa de las parcelas en la opción exportar datos (Figura IV.16), y se selecciona guardar los objetos como un formato Excel (xlm.) y de esta forma será más sencillo generar los valores de los promedios de ETr de las 5284 parcelas.

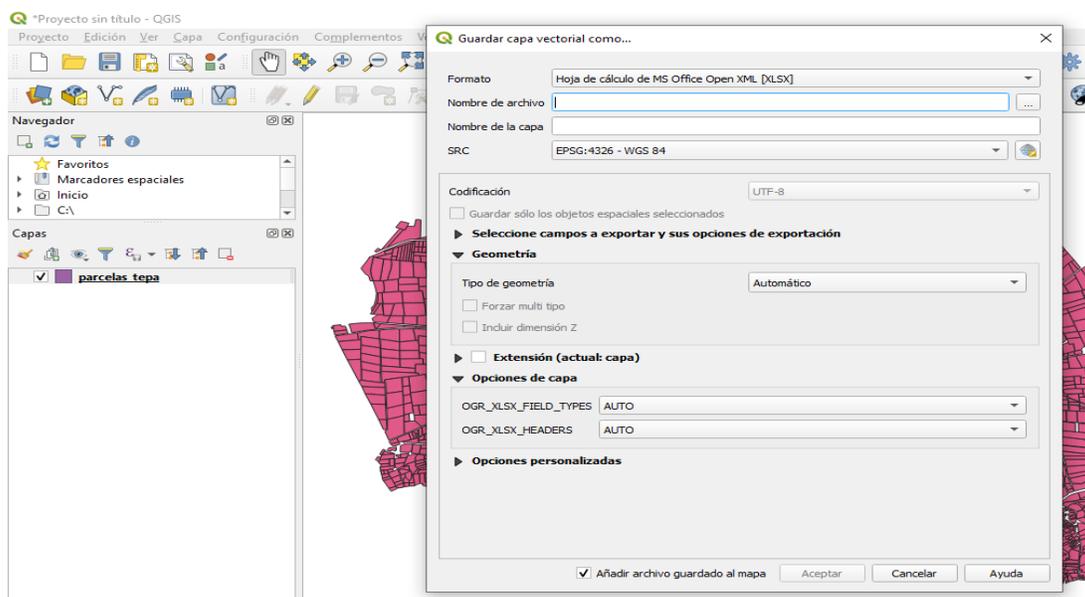


Figura IV.16 Menú de programa QGIS para exportar los datos de la capa a un formato numérico Excel (xlm.).

V RESULTADOS

En el apartado IV.3 se describe de manera detallada el método para obtener la ETr mediante el método METRIC EEFlux y con ayuda del programa QGIS se logra obtener los resultados de manera sencilla, siendo programas fáciles de utilizar y de acceso libre en la red. Una de las grandes ventajas de la percepción remota es poder obtener la información de algún punto de interés, no siendo necesario encontrarse en el sitio, adicional a eso el método brinda información importante como NDVI, albedo, cubierta terrestre entre otras para grandes extensiones de superficie. Teniendo como desventaja que el servidor puede presentar errores al descargar la información.

Se obtuvieron promedios de ETr mensual de todos los píxeles que corresponden a las parcelas regadas en Tepantepec con aguas residuales por medio de la imagen descargada correspondiente a cada mes (Cuadro V.1). Mostrando al mes de julio con el valor máximo de 4.28 (mm/día) y coincidiendo enero y diciembre mostrando los valores más bajos 0.92 y 0.51 (mm/día) respectivamente (Cuadro V.1).

CuadroV.1. Datos de Er promedio mensual mediante el método Metric EEFlux

meses	Etr mm/día
enero	0.92
febrero	1.58
marzo	1.99
abril	1.84
mayo	2.02
junio	2.30
julio	4.28
agosto	3.38
septiembre	2.33
octubre	0.85
noviembre	1.12
diciembre	0.51

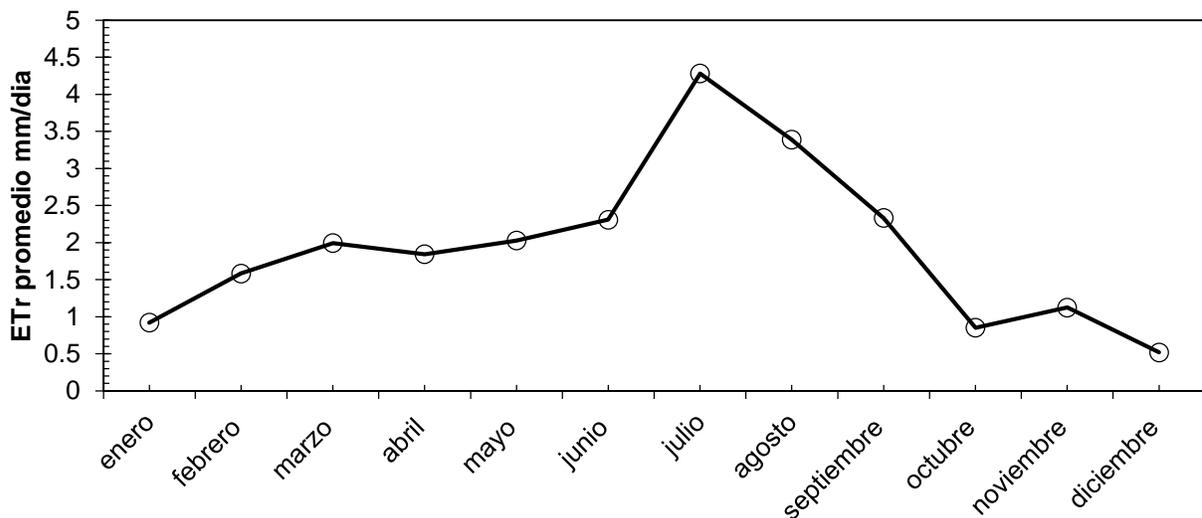


Figura V.1 Estimación de la ETr promedio mensual obtenida por método de METRIC EEFlux.

Se calcularon los valores de ETo promedio mensual en mm/día con el método de Hargreaves-Samani, utilizando la ecuación 7.2 por mes (Cuadro V.2). El comportamiento de la ETo se observa en la Figura 4.2. Siendo el mes de mayo el que presenta un valor

máximo de 5.9 (mm/día) con respecto del resto del año y siendo enero y diciembre los meses con valores mínimos.

Cuadro2. Datos promedios mensuales de ETo obtenida por el método Hargraves- Samani.

meses	Eto mm/día
enero	3.30
febrero	4.22
marzo	5.29
abril	5.71
mayo	5.9
junio	5.34
julio	5.57
agosto	4.55
septiembre	4.31
octubre	3.92
noviembre	3.46
diciembre	3.16

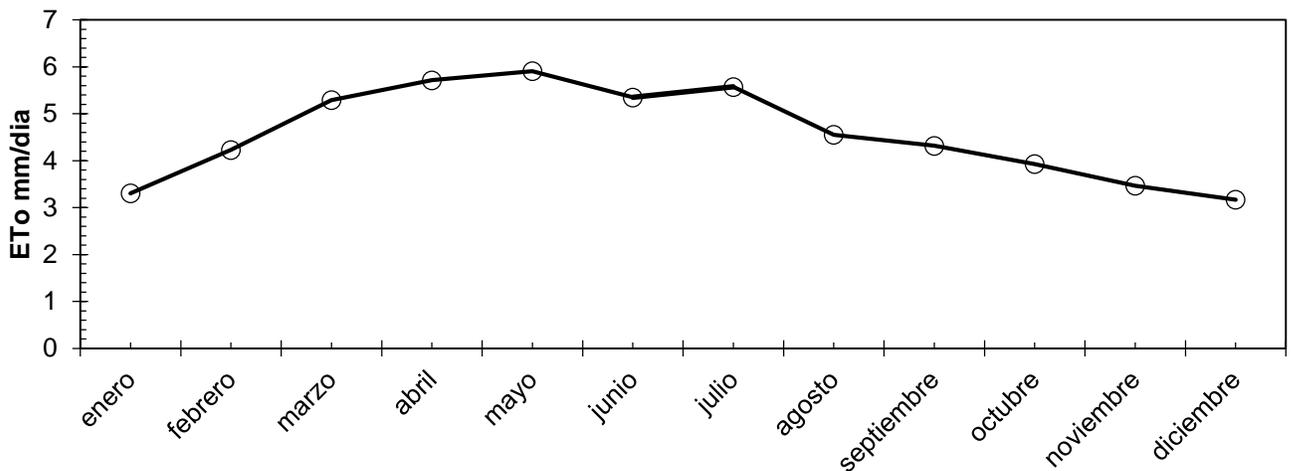


Figura V.2. Estimación de la ETo promedio mensual obtenida por método de Hargreaves-Samani.

Posteriormente se obtuvo la ETr promedio mensual a través de la ecuación 10 substituyendo los valores de Kc correspondientes a el cultivo de maíz (CuadroV.3), los

resultados muestran al mes de julio con el valor máximo de 5.48 mm/día, en contraste octubre mostró el más bajo con 1.93 mm/día (Figura V.3).

Cuadro V.3. Datos de ETo y Kc mensual de maíz para obtener ETr promedio mensual

meses	Eto mm/día	Kc	Etr mm/día
enero	3.30	0.98	3.25
febrero	4.22	1.06	4.50
marzo	5.29	0.93	4.96
abril	5.71	0.49	2.81
mayo	5.9	0.68	4.05
junio	5.34	0.68	3.66
julio	5.57	0.98	5.48
agosto	4.55	1.06	4.85
septiembre	4.31	0.93	4.04
octubre	3.92	0.49	1.93
noviembre	3.46	0.68	2.37
diciembre	3.16	0.68	2.17

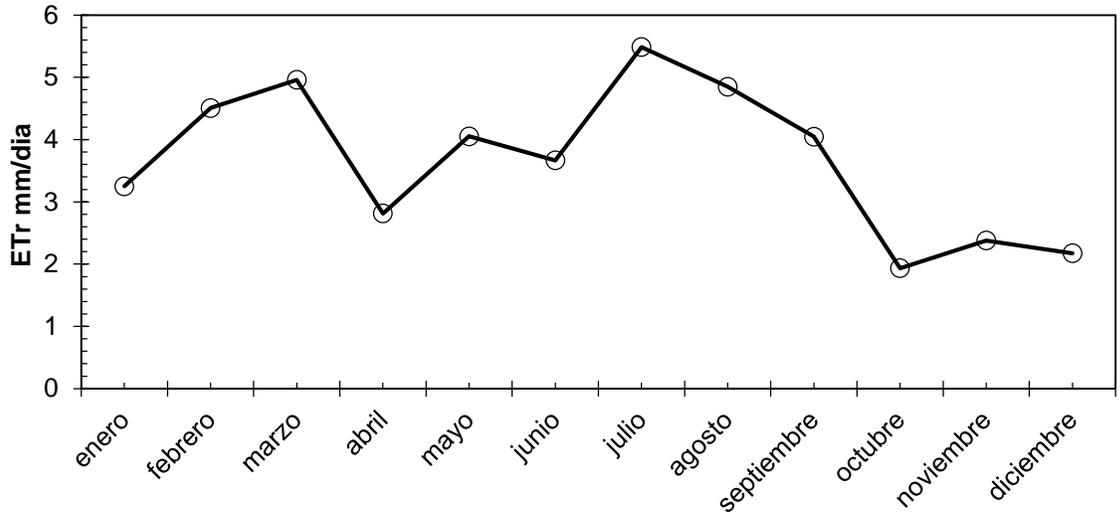


Figura V.3. Estimación de la ETr promedio mensual de maíz obtenida por método de Hargreaves-Samani

Para el análisis de comparación de ambos métodos se colocaron los datos iniciando por el mes de abril, donde se registra que es la primera siembra del año. Al observar el comportamiento de la ETr (Figura V.4), durante el ciclo de cultivo, coinciden en que el mes de julio muestra los datos máximos pero difieren en el valor mínimo; siendo para Metric el mes de diciembre con un valor 0.51 mm/día mientras que para Hargreaves-Samani fue el mes de octubre con 1.93 mm/día.

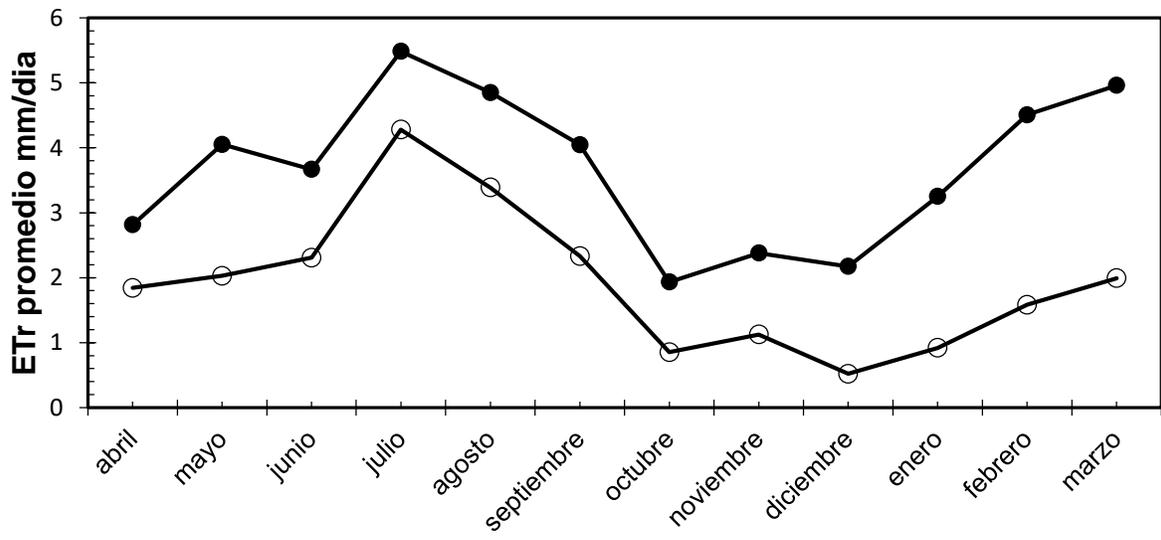


Figura V.4. Comparación de la ETr por método Metric y Hargreaves – Samani .ETr por método de Hargreaves- Samani ETr por método METRIC EEFlux

El comportamiento de los datos por ambos métodos es similar con un aumento de ETr en el tercer mes de crecimiento de cultivo, y disminuyendo en las etapas de maduración, en la primera cosecha de abril a septiembre mostrando también valores más elevados de ETr en julio atribuible a la estación del año ya que la temperatura es mayor lo cual implica una mayor evapotranspiración. En el segundo periodo de siembra presentan un aumento de la ET hasta el mes de febrero y mostrando un aumento para las etapas de maduración.

En este comportamiento se debe tener en consideración varias características que recaen en los resultados mostrados. Las imágenes satelitales se obtienen una vez o quizás dos veces al mes en comparación de las estaciones meteorológicas, las cuales ofrecen datos diarios. Otro de los puntos importantes a considerar es la precisión de la zona ya que las imágenes pueden ser analizadas exclusivamente del lugar de interés, al contrario de las estaciones que se tomaran los datos de manera cercana pero no del sitio de estudio.

Gracias a los resultados anteriores de ETr se puede obtener el requerimiento de riego para el cultivo de maíz (Cuadro V.4), usando la ecuación III.11 tomando, el supuesto de que la precipitación es ausente en la zona, lo cual puede discernir que la evapotranspiración es igual a la lámina regada.

$$R_h = V_{ET} - V_R \quad (\text{III.11})$$

Donde:

R_h : Es el requerimiento hídrico del cultivo (mm/día)

V_{ET} : Es el volumen de agua evapotranspirado por el cultivo (mm/día)

V_R : Es el volumen de riego suministrado al cultivo. (mm/día)

El cual para el año 2020 se registró un volumen de agua concesionado por 190.453 hm³ (REPDA, 2021), para el municipio de Francisco I. Madero. Sin embargo solo se debe

considerar que el municipio sembró un total de 2989.70ha de las cuales, 2630 ha solo fueron designadas para los cultivos de maíz según lo reportado por el Servicio de Información Agroalimentario y Pesquera (SIAP, <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> 2020)

Cuadro V.4.Requerimientos de riego según los métodos METRIC y Hargreaves- Samani para el cultivo de maíz sembrado2020

Mes	Metodo Metric EEFLux			Metodo Hargreaves-Samani		
	V _{ET} (mm/dia)	V _R (mm/dia)	R _h (mm/dia)	V _{ET} (mm/dia)	V _R (mm/dia)	R _h (mm/dia)
Enero	0.92	0.79	-0.13	3.25	0.79	-2.46
Febrero	1.58	0.79	-0.79	4.5	0.79	-3.71
Marzo	1.99	0.79	-1.2	4.96	0.79	-4.17
Abril	1.84	0.79	-1.05	2.81	0.79	-2.02
Mayo	2.02	0.79	-1.23	4.05	0.79	-3.26
Junio	2.3	0.79	-1.51	3.66	0.79	-2.87
Julio	4.28	0.79	-3.49	5.48	0.79	-4.69
Agosto	3.38	0.79	-2.59	4.85	0.79	-4.06
Septiembre	2.33	0.79	-1.54	4.04	0.79	-3.25
Octubre	0.85	0.79	-0.06	1.93	0.79	-1.14
Noviembre	1.12	0.79	-0.33	2.37	0.79	-1.58
Diciembre	0.51	0.79	0.28	2.17	0.79	-1.38

VI. CONCLUSIONES

Se describió un método para la obtención de ETr mediante percepción remota de manera detallada el cual logro ser de gran utilidad ya que permite obtener estos datos sin la necesidad de encontrarse en el lugar de interés, dándonos una ventaja económica para futuros análisis ya que las imágenes son de libre acceso en la red y los programas tienen un acceso gratuito, otra de las ventajas es que se puede llegar a ser tan preciso como lo permita la imagen. Teniendo únicamente como desventaja que al ser un servidor de la red, puede llegar a presentar errores y fallas en la descarga de imágenes.

Se calcularon los valores de ETr del cultivo de maíz, bajo riego en el municipio de Tepantepec, Hidalgo mediante percepción remota en un total de 2630 ha cultivadas oscilando entre 0.51 y 4.28 mm/día. También se obtuvieron resultados utilizando el método Hargreaves-Samani, encontrándose dentro del intervalo 1.93 y 5.48 mm/día.

Estos datos permitieron el cálculo del requerimiento de riego el cual muestra en ambos casos que el agua suministrada por CONAGUA no es suficiente para cubrir las necesidades del cultivo en todas sus etapas de crecimiento, ya que solo se considera

para este trabajo el cultivo de maíz, porque es la mayor parte de área cultivada, pero existen otros cultivos dentro de la zona de estudio, que también requieren el recurso, y aunque se debe mencionar que no se registraron los valores de precipitación efectiva. Se podría suponer que el agua suministrada por precipitación no cubrirá esta diferencia.

La zona de cultivo donde se realizó el presente estudio muestra una mayor demanda de agua en los meses de marzo y julio, debido a las temperaturas ambientales que son más elevadas por las estaciones del año. Al tener conocimiento del requerimiento del agua por cultivo gracias a estos métodos, y a las superficies sembradas, se puede inferir en los valores más cercanos, para evitar un desabasto o un exceso en el suministro de agua, siendo esto último una señal de alerta, ya que al ser aguas residuales, provocan una contaminación de suelo y planta por diversas sustancias entre ellos metales pesados.

VII LITERATURA CITADA

- Ahmad, N. (1983). Vertisols. In: L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall (Eds.). Pedogenesis and Soil Taxonomy. II. Soil Orders. Elsevier. Amsterdam, the Netherlands. 91-123.
- Allen, R. G. Pereira, L. S. Raes, D and Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, R.G. Tasumi, M.; Trezza, R.; Waters, R. y Bastiaanssen, W. G. M. (2002). "SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land): Advanced Training and User's Manual". Version 1.0. Idaho Department of Water Resources. Idaho. USA. 98-100.
- Allen, R.G, Morton, C. Kamble, B., Kilic, A., Huntington J., Thau D., Gorelick N., Erickson T., Moore R., Trezza R., Ratcliffel., Robison C. (2002) EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. ASABE / IA Irrigation Symposium Vol. 10-12 DOI: 10.17398/AERYD.2019.A26
- Andrade, F.H; Sadras, V.O. (Ed.). 2000 Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Pp 155-156
- Aníbal, G. S., (2019) Tesis Modelado del balance hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. <https://doi.org/10.35537/10915/74374>
- Anuario Estadístico Hidalgo Edición (2000) Gobierno del Estado de Hidalgo (Secretaría de Desarrollo Social) - INEGI
- Avilés L. Hernán. (2006). El valor del agua en la agricultura. Revista de Ciencias de la Vida, 5, 28-31

- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang J. Ma. Y Moreno J. F Roerink (1998) A remote sensing surfaceenergy balance algorithmforland (SEBAL). Journal of Hydrology, 213-229 DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00254-6
- Bauer, M. E. & Cipra. J. E. (1973). Identification of agricultural crops by computer processing applications of ERTSMSS data LARS Technical Reports. Paper 20 <https://docs.lib.purdue.edu/larstech/20/>
- Berengena, J., Gavilán, P. 2005. Reference ET estimation in a highly advective semiarid environment. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(2), 147- 163.
- Bhatti, A. U., Mulla, D. J., & Frazier, B. E. (1991). Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. Remote Sensing of Environment, 37(3), 181-191. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90080-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90080-P).
- Bocco, G. (2004). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. 44-45
- Brown, P. 2000. Basics of evaporation and evapotranspiration. Turf irrigation management series: I. the University of Arizona – College of Agriculture. Arizona.
- Campetella, C., Cerne B., Salio P. (2011) Entornos invisibles (ciencia y tecnología) estación meteorológica. 35-37
- Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación empírica de la ETP en la República Mexicana. Ingeniería hidráulica en México, 20(3), 99-110
- Caravaca, F., A. Lax, and J. Albaladejo, 2001 Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse amended semiarid soils Sci. Soc. Am. J. 65:1235-1238.
- Chen, S. B., Liu, Y. F., & Thomas A. (2006). Climatic change on the Tibetan Plateau: Potential evapotranspiration trends from 1961-2000. Climatic Changes, 76(3), 291-319.
- Choque, T. C. E. (2021) Estimación de la evapotranspiración a partir de datos satelitales para la región de Alto Beni, Norte de la Paz. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, La Paz, vol. 8 no.1 pp. 45-83 DOI: <https://doi.org/10.53287/dmrt8855uy51u>
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2010) Manual teórico práctico del observador meteorológico de superficie pp. 5-10
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016). Atlas del Agua en México. CONAGUA. México, D. F.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua), (2018). Estadísticas del agua en México. Ciudad de México, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Cornejo, O. F., López, H. M., Beltrán, H. R., Acevedo S. O., Lucho, C. C., Reyes S. M., (2012) Degradación del suelo en el Distrito de riego 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, México, Revista Científica UDO Agrícola 12 (4): 873-880.
- De Melo, G. L., & Fernández A., L. T. (2012). Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. Engenharia Agrícola Jaboticabal, 32(5), 875-888.
- Delegido, J. y Caselles V. (1993) Evapotranspiración In La Teledetección en el seguimiento de los Fenómenos Naturales Climatología y Desertificación (coordinadores de la edición S. Gandía y J. Melia) p 205-213.
- Di Bella, C., Rebella, C. y Paruelo, J. (2000). Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the pampa region of Argentina. International Journal of Remote Sensing col. 21(4) p 791-797.
- Domínguez, R. (2001), El sistema principal de drenaje del Área Metropolitana del Valle de México, Series del Instituto de Ingeniería, CI 22-34.
- Domínguez, S. J. M., Román, G. A. D., Prieto G. F., Acevedo S. O., Serrano, L. S. S. (2011). Índices de alteración y meteorización de suelos de la región de Denganthza, municipio Tepatepec de Francisco I. Madero, Hidalgo. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. 3(2) pp. 57-65 DOI: 10.5154/r.inagbi.2011.11.003
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. (1976) Las necesidades de agua en los cultivos Estudio FAO: Riego y Drenaje núm. 24 Roma Organización de las Naciones unidas para la Agricultura y Alimentación pp. 9-58
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1977) Cropwater requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 24(rev), 144 pp.
- Faramiñan, A. (2018) Estudio de la pérdida de agua en el suelo por medio del balance de energía y un lisímetro de pesada Facultad de Ciencias Exactas P20-21
- García, G. J. O. (2001). La agricultura de riego y el riego con aguas negras. Economía y Sociedad, VI (10), 155-180.
- García S. Edith M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional. Reg. .29 (54) <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741>.
- González-Piqueras, J.; Villodre, J.; Campos, I.; Calera, A.; Balbontín, C. (2015). Monitoring the latent and sensible heat fluxes in vineyard by applying the energy balance model METRIC. Revista de Teledetección. (43):43-54. doi:10.4995/raet.2015.2310.
- Gordillo, S., V., Flores, M. H., Tijerina, C. L., (2013) Estimación de la evapotranspiración en un cultivo de vida con apoyo de imagen satelital y validación utilizando Eddy covariance. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 5 (1). México. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i1.1017>.

- Guevara, D.J.M. (2006) La fórmula de Penman-Monteith FAO1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo, Terra Nueva Vol. XXII núm. 31 pp31-72 Universidad Central de Venezuela Caracas, Venezuela.
- Hargreaves, G.H., Allen, R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53–63.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- Henríquez-Dole, L., & Miner-Vega, A. J. (2014). Revisión y validación de la evapotranspiración potencial (ETP) media anual y media mensual en Honduras obtenida por métodos ambientales de percepción remota. *Revista Ciencia y Tecnología*, 14(6), 77-98.
- Ikeda, M., Zhang, Z.W., Shimbo, S., Watanabe, T., Nakatsuka, H., Moon, C.S., Matsuda-Inoguchi, N., Higashikawa, K. (2000). Urban population exposure to lead and cadmium in east and south-east Asia. *Science of the Total Environment* 249:373–384
- Inzunza, E., Jayawardena, U. de S. (1994), A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: A study from Sri Lanka: *Engineering Geology*, v. 36 p. 303–310, doi: 10.1016/0013-7952(94)90011-6.
- Jewel, N. (1989). An evaluation of multi-date SPOT data for agriculture and land use mapping in the United Kingdom. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 939-951
- Jiménez B., Chávez, A. (2004) Quality assessment of an aquifer recharged with waste water for its potential use as drinking source: “El Mezquital Vallely” case. *Water Science and Technology*, 50(2), 269-276.
- Llanes, C. O., Norzagaray, C. M., Muñoz, S. N. (2014). Determinación de la evapotranspiración potencial ETP y de referencia ETo como indicador del balance hídrico del corazón agrícola de México. *Juyyaania Enero* 5(1), 119-129
- Maples, M. (1990). “Antecedentes físicos, históricos y socioeconómicos del distrito de desarrollo rural 063 Estado de Hidalgo”. Primer Simposio Nacional. Degradación del Suelo. Memorias. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.
- Martínez-Luna, Domingo, Mora-Flores, José S., Exebio-García, Adolfo A., Arana-Coronado, Oscar A., & Arjona-Suárez, Enrique. (2021). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 39, e544. E pub 05 de abril de 2021. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544>
- 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.

- Melesse, A.M.; Weng, Q.; Thenkabail, P.S.; Senay, G.B. 2007. Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modeling. *Sensors*, 7 (12): 3209-3241
- Moeletsi, M. E., Walker, S., & Hamandawana, H. (2013). Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 66, 4-15
- Montaner, S. M., Sánchez, S. E. (1988) Aproximación, por el método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de Lluvia útil. *Papeles de Geografía No. 14* 223-225
- Montero, M. J., y J. L., Pérez. 2008. Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para el siglo XXI. In: P. Martínez, y A. Aguilar (eds.). *Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor. pp.: 11–21.
- Murcia- Sarmiento, M. L. Calderón-Montoya, O. G. Díaz–Ortiz, J. E. (2014). Impacto de aguas grises en propiedades físicas del suelo. *Tecno Lógicas*, vol. 17 no.32, pp.55-65.
- Network on Participatory Irrigation Management Case Studies Series, disponible en: <http://www.inpim.org> [consultado en junio de 1999].
- Niza, Z.; Khan, M.S., Govind, A.; Marchetti, M.; Lasserre, B.; Magliulo, E.; Manco, A. Evaluation of SEBS, METRIC-EEFlux, and QWaterModel Actual Evapotranspiration for a Mediterranean Cropping System in Southern Italy. *Agronomy* 2021, 11, 345. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020345>.
- Núñez G. A. L. (2015) Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan Hidalgo pp. 35-45.
- Ojeda, B. W. y Flores, V. J., (2015) Calendarización del riego: teoría y práctica *IMTA* p111-113
- Ontiveros, C. R. E., Diakite, D., L., Álvarez, S. M. E. y Coras, M. P. M. (2013). Evaluación de aguas residuales de la ciudad de México utilizadas para riego. *Tecnología y Ciencia del Agua*. IV (4), 127-140
- Ortiz, C. R., Chile A. M. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, vol. 7, núm. 1. DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1450>
- Ortiz-Solorio, C. A. (2011). *Elementos de agrometeorología cuantitativa, con aplicaciones en la República Mexicana* (219 pp.), 5ª ed. México, DF: Universidad Autónoma Chapingo.
- Palacios Vélez, Enrique (1997), *Benefits and Second Generation Problems of Irrigation Management Transfer in México*, 27 de agosto, EDI International

- Peña, F., Vargas, S., Romero, R. (2013) Resistencia a las políticas de gestión del agua en México. La transferencia del distrito de riego Tula, Hidalgo. 19-40
- Pereira, L. S., Valero, J. A., Picornell-Buendía, M. R., & Martín-Benito, J. M. T. (2010). El riego y sus tecnologías (296 pp.). Albacete: CREA.
- Pettifer, R.E. W. Westbury, P.R., y Molyneux, M.J. (1980) Automated meteorological system WMO Instruments and Observing Methods Report. 1-5
- Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario 2017-2022 Hidalgo pp. 17-18
- Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, (2009) Francisco I. Madero, Hidalgo, Clave geoestadística 13023
- Rodríguez, J. A., E. K. Weatherhead, J. W. Knox, and E. Camacho. (2007). Climate change impact on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environ. Change* 7: 149–159.
- Rodríguez-Martínez, N., Sánchez-Herrera, S. G., Martínez-Montoya C. J. (2017) Caracterización Físico - Química de Suelos Agrícolas del Municipio de Francisco I Madero, Hidalgo. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. 2017, 4-11: 1-9.
- Rojas. K. (2009). Radiación Electromagnética. Universidad Pontificia Bolivariana Especialización en Telecomunicaciones.
- Ruiz C. J. A., Medina G. G., Ramírez D. J. L., Flores L. H. E., Ramírez O. G., Manríquez O. J.D., Zarazúa V. P., González E. D. R., Díaz P. G., y Mora O. C. (2011). Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe2), 309-323. Recuperado en 24 de octubre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800011&lng=es&tlng=es.
- Salazar Moreno, R., Rojano-Aguilar, A. & López- Cruz, I.L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*. (V). (2,) pp. 177-183.
- Salgado R.P., Mateos, L.(2019) Evaluación de métodos para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos con vistas a la evaluación del desempeño de distritos de riego, Asociación Española de Riegos y Drenajes y la Universidad de Extremadura DOI:10.17398/AERYD.2019.A26.
- Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 265-267
- Sanchez S. F.J (2017) Hidrología Superficial y Subterránea Bibliotheca de Ciencias Biológicas y Ambientales

- SEMARNAT (SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES). (2007). Programa de saneamiento de aguas en Hidalgo. p. 11
- Silva, P. (2011). Estimación de evapotranspiración mediante métodos de percepción remota y empíricos, en las cuencas de la Región Tacna Universidad de Rio de Janeiro.
- Sina (Portal de Sistemas Nacional de Información del Agua), disponible en Portal de Sistemas de Información del Agua (conagua.gob.mx) y <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php>.
- Squeo F. A. y M.F. León. 2007. Transpiración. En Squeo F.A. y L. Cardemil (eds.). Fisiología vegetal. Ediciones Universidad de La Serena, Chile.
- Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela: ¿Cuál método utilizar? *Bioagro*, 20(2), 89-95. Recuperado en 25 de noviembre de 2021, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000200002&lng=es&tlng=es.
- Tuñón, J. (2000). Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Departamento de Ciencias Experimentales, Universitat Jume I, Catellon. Tesis Doctoral.
- Ureña, F., (1998). Análisis de datos generados por una estación meteorológica automática. Tesis para optar por el grado de licenciatura en meteorología. Universidad de Costa Rica.
- Ureña, F., (2011) Utilización de estaciones meteorológicas automáticas como nueva alternativa para el registro y transmisión de datos. *Revista Posgrado y Sociedad* vol.11 núm. 1 pp33-40 <https://doi.org/10.22458/rpys.v11i1.1881>
- Vásquez-Méndez, R., Ventura-Ramos, E. Jr., & Acosta Gallegos, J. A. (2011). Habilidad de estimación de los métodos de evapotranspiración para una zona semiárida del centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 399-415.
- Vázquez, B. R., (2019) estimación de la evapotranspiración de cultivo de maíz bajo riego mediante percepción remota. 107
- Villa-Nova, N. A., Pereira, A. B., & Shock, C. C. (2007). Estimation of reference evapotranspiration by an energy balance approach. *Biosystems Engineering*, 96(4), 605-615.
- Villalta., C. H. A. y Sorto P. G (2013) Implementación de una estación meteorológica p34-50
- Villegas, H. 2008 Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones GEOLOGICAS Instituto COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS.
- Wionczek, Miguel (1982), "La aportación de la política hidráulica entre 1925 y 1970 a la actual crisis agrícola mexicana", en *Comercio exterior*, 32 (4): 394-409.

Zenteno, C. G. A., Palacios, V. E., Tijerina, C. L., Magdaleno, F. H. (2017) Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, .8 (7) 1575-1586.

ANEXOS

Anexo VIII.1 radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et. al. 1998)

Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.6	17.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	4.1	6.4	9.5	13.1	15.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	4.6	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Anexo VIII.2 Valores de Kc para cultivo de alfalfa perene (Palacios,2002)

dia juliano	Kc										
1	0.60	56	0.79	111	1.02	166	1.13	221	1.09	276	0.94
2	0.61	57	0.79	112	1.02	167	1.13	222	1.09	277	0.94
3	0.61	58	0.79	113	1.03	168	1.13	223	1.09	278	0.93
4	0.61	59	0.80	114	1.03	169	1.13	224	1.08	279	0.93
5	0.62	60	0.80	115	1.03	170	1.13	225	1.08	280	0.93
6	0.62	61	0.80	116	1.04	171	1.13	226	1.08	281	0.92
7	0.62	62	0.81	117	1.04	172	1.13	227	1.08	282	0.92
8	0.63	63	0.81	118	1.04	173	1.13	228	1.08	283	0.92
9	0.63	64	0.81	119	1.05	174	1.13	229	1.07	284	0.91
10	0.63	65	0.82	120	1.05	175	1.13	230	1.07	285	0.91
11	0.64	66	0.82	121	1.05	176	1.13	231	1.07	286	0.91
12	0.64	67	0.83	122	1.06	177	1.13	232	1.07	287	0.90
13	0.64	68	0.83	123	1.06	178	1.13	233	1.06	288	0.90
14	0.65	69	0.83	124	1.06	179	1.13	234	1.06	289	0.90
15	0.65	70	0.84	125	1.07	180	1.13	235	1.06	290	0.89
16	0.65	71	0.84	126	1.07	181	1.13	236	1.06	291	0.89
17	0.66	72	0.84	127	1.07	182	1.12	237	1.05	292	0.89
18	0.66	73	0.85	128	1.08	183	1.12	238	1.05	293	0.88
19	0.66	74	0.85	129	1.08	184	1.12	239	1.05	294	0.88
20	0.67	75	0.85	130	1.08	185	1.12	240	1.05	295	0.88
21	0.67	76	0.86	131	1.09	186	1.12	241	1.04	296	0.87
22	0.67	77	0.86	132	1.09	187	1.12	242	1.04	297	0.87
23	0.68	78	0.87	133	1.09	188	1.12	243	1.04	298	0.87
24	0.68	79	0.87	134	1.10	189	1.12	244	1.04	299	0.86
25	0.68	80	0.88	135	1.10	190	1.12	245	1.03	300	0.86
26	0.69	81	0.88	136	1.10	191	1.12	246	1.03	301	0.86
27	0.69	82	0.89	137	1.10	192	1.12	247	1.03	302	0.85
28	0.69	83	0.89	138	1.10	193	1.12	248	1.03	303	0.85
29	0.70	84	0.90	139	1.10	194	1.12	249	1.02	304	0.85
30	0.70	85	0.90	140	1.10	195	1.12	250	1.02	305	0.85
31	0.70	86	0.91	141	1.11	196	1.12	251	1.02	306	0.84
32	0.70	87	0.91	142	1.11	197	1.12	252	1.02	307	0.84
33	0.71	88	0.92	143	1.11	198	1.12	253	1.01	308	0.84
34	0.71	89	0.92	144	1.11	199	1.12	254	1.01	309	0.83
35	0.71	90	0.93	145	1.11	200	1.11	255	1.01	310	0.83
36	0.72	91	0.93	146	1.11	201	1.11	256	1.01	311	0.83
37	0.72	92	0.94	147	1.11	202	1.11	257	1.00	312	0.82
38	0.72	93	0.94	148	1.11	203	1.11	258	1.00	313	0.82

39	0.73	94	0.95	149	1.11	204	1.11	259	1.00	314	0.82
40	0.73	95	0.95	150	1.11	205	1.11	260	0.99	315	0.81
41	0.73	96	0.96	151	1.12	206	1.11	261	0.99	316	0.81
42	0.74	97	0.96	152	1.12	207	1.11	262	0.99	317	0.81
43	0.74	98	0.97	153	1.12	208	1.10	263	0.98	318	0.80
44	0.74	99	0.97	154	1.12	209	1.10	264	0.98	319	0.80
45	0.75	100	0.98	155	1.12	210	1.10	265	0.98	320	0.80
46	0.75	101	0.98	156	1.12	211	1.10	266	0.97	321	0.79
47	0.75	102	0.99	157	1.12	212	1.10	267	0.97	322	0.79
48	0.76	103	0.99	158	1.12	213	1.10	268	0.97	323	0.78
49	0.76	104	1.00	159	1.12	214	1.10	269	0.96	324	0.78
50	0.76	105	1.00	160	1.12	215	1.10	270	0.96	325	0.77
51	0.77	106	1.00	161	1.13	216	1.09	271	0.96	326	0.77
52	0.77	107	1.01	162	1.13	217	1.09	272	0.95	327	0.76
53	0.78	108	1.01	163	1.13	218	1.09	273	0.95	328	0.76
54	0.78	109	1.01	164	1.13	219	1.09	274	0.95	329	0.75
55	0.78	110	1.02	165	1.13	220	1.09	275	0.94	330	0.75