



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

"Estimación de Evapotranspiración Real y Potencial a Partir de Datos Meteorológicos y NDVI"

Tesis
para obtener el grado de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

Mauricio Corona Avalos

Asesor

SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

Doctora en ingeniería de Camino, Canales y Puertos

Co – asesor

Iván Gonzales Arreguín

Maestro en Ciencias en ingeniería Ambiental

Morelia, Michoacán
AGOSTO 2021

CONTENIDO

RESUMEN.....	A
ABSTRACT.....	B
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS.....	2
OBJETIVOS.....	2
General	2
Particulares	2
1.- ANTECEDENTES.....	3
1.1.- Modelación Hidrológica y Evapotranspiración en México.....	3
1.2.- Antecedentes de la Teledetección	6
1.2.1. <i>Fundamentos de la Teledetección</i>	8
1.2.2. Respuesta Espectral de la Vegetación	11
1.3. Estudios Relacionados	14
2.- ZONA DE ESTUDIO	16
2.1.- Localización	16
2.2.- Orografía	16
2.3.- Hidrografía	21
2.4.- Clima	25
2.5.- Uso de Suelo.....	25

2.5.- Tipo de Suelo.....	25
3.- METODOLOGIA.....	28
3.1.- Materiales	28
3.1.1.- Base de Datos.....	28
3.1.2. Sistema CLICOM.....	29
3.1.3. USGS.....	30
3.1.4. Libra	30
3.1.5. Satélites	31
3.1.5.1. Landsat 7	31
3.1.5.2. Landsat 8	33
3.1.6. Software de Modelación Geográfica.....	34
3.1.6.1. ARCGIS	34
3.1.6.2. QGIS.....	36
3.1.7. Thorntwaite.....	37
3.1.8. Regresión Lineal Simple.....	39
3.1.9. Regresión Lineal múltiple.....	40
3.2.- Métodos.....	41
3.2.1. Obtención de la Información Satelital Básica	41
3.2.2. Corrección de la Información	51
3.2.2.1. Radiométricos.....	51

3.2.2.2. Atmosféricas	52
3.2.3. Extracción de la Zona de Estudio.....	55
3.2.4. Determinación del NDVI.....	58
3.2.5. Interpretación de los Resultados	60
3.2.6. Obtención de los Datos de Temperatura ...	62
3.2.6. Obtención de la Temperatura	66
3.2.7. Obtención de la Evapotranspiración Potencial (ETp)	75
4.- RESULTADOS	81
4.1.- Estimación de la Evapotranspiración Potencial (ETp).....	81
4.2. Estimación de la Evapotranspiración Real (ETr)	104
5.- CONCLUSIONES.....	125
LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	127
REFERENCIAS	128
ÍNDICE DE FIGURAS.....	130
ÍNDICE DE MAPAS.....	132
ÍNDICE DE ECUACIONES	134

RESUMEN

En la actualidad se ha observado el déficit extraído al obtener datos de parámetros relacionados a la Evapotranspiración, la cual se usa para saber el agua que necesitan las plantas para su correcto desarrollo y que, como consecuencia de esto, se puede diseñar todo lo relacionado con el riego, por lo que es necesario calcularlo de una manera más precisa y a distancia sin que exista un contacto material con estos en pocas palabras Teledetección, es aquí donde en este documento se involucrará la Cuenca del río Tepalcatepec que comprende los estados de Jalisco y Michoacán y una duración de estudio de 19 años, el cual pertenece al período del 2000 al 2018 utilizando los satélites lansad 7 y 8.

Esta amplitud en el período seleccionado ha permitido contar con años climáticamente muy diversos, ya que coexisten varios años húmedos y secos con los cuales las diferentes variables van cambiando progresivamente y junto con esta la metodología la cual se resume en 3 pasos fundamentales:

- 1) Obtención de la información satelital básica la cual consistió en descargar las imágenes satelitales de la página oficial de la USGS en el apartado de EarthExplorer
- 2) Cálculo de ETr y de ETp a partir de datos meteorológicos, donde se optó por desarrollar la metodología de Thornthwaite y Blaney – Criddle respectivamente.
- 3) Construcción de ambos modelos a partir de las asociaciones existentes entre la información satelital y la meteorológica (análisis estadístico).

ABSTRACT

Currently, the deficit extracted by obtaining data on parameters related to Evapotranspiration has been observed, which is used to know the water that plants need for their correct development and that, as a consequence of this, everything related to irrigation, so it is necessary to calculate it in a more precise way and at a distance without there being a material contact with them; In a few words, remote sensing.

It is here where the Tepalcatepec Basin River study that includes the states of Jalisco and Michoacán will be involved and with the help of the landsat 7 and 8 satellites it was obtained a study duration of 19 years (2000 to 2018)

This amplitude in the selected period has allowed to have very diverse climatic years, since several wet and dry years coexist with which the different variables are progressively changing and together with this the methodology which is summarized in 3 fundamental steps:

- 4) Obtaining the basic satellite information which consisted of downloading the satellite images from the official USGS website in the EarthExplorer section
- 5) Calculation of ETr and ETp from meteorological data, where it was decided to develop the Thornthwaite and Blaney-Criddle methodology respectively.
- 6) Construction of both models from the existing associations between satellite and meteorological information (statistical analysis).



Introducción



INTRODUCCIÓN

Hoy en día hemos podido observar la desinformación proveniente de las bases de datos para el cálculo de la evapotranspiración debido a múltiples razones como pueden ser malas lecturas y falta de ellas, así mismo pueden llegar a darse debido a equipo en mal estado, repetición de datos, falta de conocimiento sobre la importancia de ellos y que provocan cierto conflicto a la hora de generar un análisis estadístico adecuado.

Que como veremos a continuación es necesario para la manipulación de los datos para el cálculo de la evapotranspiración como lo establece Sánchez-Toribio, 1992 cuya importancia cuantitativa es tal que, el promedio global de evapotranspiración es de 57% de la precipitación anual.

Es aquí donde el termino teledetección se ha vuelto un tema cada vez de más relevancia a nivel mundial ya que esta permite el contacto entre objetos observados sin la necesidad de estar en el sitio.

De acuerdo a Alonso Sarría, 2006 todo esto es gracias a que en nuestro caso el objeto observado es la superficie terrestre, marina o la atmósfera y el observador por su parte es un sensor situado en el aire o el espacio capaz de detectar y almacenar la información para su posterior análisis, por lo que podemos deducir que a través de estos datos que recibimos de sensores de un grupo de radiaciones electromagnéticas podemos llegar a conocer no sólo el grado de salud de una cubierta vegetal si no también llegar a estimar la evapotranspiración de esta.



Objetivos



HIPÓTESIS

Es posible estimar la evapotranspiración real y potencial a partir de datos meteorológicos y NDVI

OBJETIVOS

General

Estimar la correlación de los datos meteorológicos y el NDVI para la obtención de la evapotranspiración real y potencial con imágenes satelitales.

Particulares

- Aplicar una metodología de llenado de vacíos de información meteorológica.
- Observación del grado de estrés hídrico en la zona con el uso del NDVI.
- Desarrollar una metodología para el llenado de vacíos con NDVI.



Antecedentes



1.- ANTECEDENTES

1.1.- Modelación Hidrológica y Evapotranspiración en México

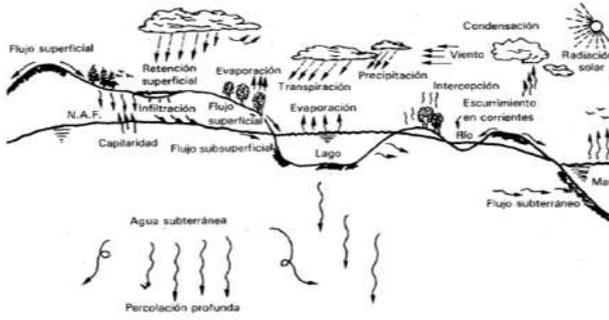


Figura 1.- Ciclo Hidrológico del Agua

Desde el principio de los tiempos siempre se ha usado instrumentos de monumental trascendencia para el análisis de avenidas que se ha extendido por todo el planeta puesto que esta es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática.

En el cual este está representado por una expresión analítica donde el sistema físico real generalmente para estos casos lo representamos como la “cuenca hidrográfica” y con esta todos los elementos del periodo hidrológico.

Es aquí donde empezaremos a hablar de la evapotranspiración (ET) la cual no solo es la segunda variante de más grande trascendencia en el estudio de esta clase de modelos, sino que además es la base para la siguiente investigación.

Donde la definición por parte de Mijares, 2015 establece que es la combinación de dos procesos:

- 1. Evaporación desde el suelo y desde la superficie cubierta por las plantas.**
- 2. Transpiración desde las hojas de las plantas.**

Por lo tanto, el cálculo de la ET se usa para saber el agua que necesitan las plantas para su correcto desarrollo, ya sea en un jardín o en un campo de cultivo.

Como consecuencia de esto... algunas de las condicionantes para que se produzca ET tienen que darse de las siguientes condiciones:

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

Una vez generalizando el proceso podemos describirlo como algo similar al proceso de combustión y profundizando un poco más en donde las fuentes principales son la lluvia o el riego.

En los dos casos, parte del agua que llega al suelo o las plantas queda retenido a modo de gotas sobre las hojas o sobre el área del suelo.

Lo demás del agua se infiltra en el suelo de forma que las plantas tienen la posibilidad de obtenerla mediante sus raíces.

Y el agua líquida que se evapora a partir del área foliar y a partir del área del suelo necesita una enorme proporción de energía para llevarse a cabo.

Esta energía nace de la luz del sol a modo de energía solar donde el vapor de agua se genera en el área de contacto entre agua y aire produciendo un gradiente de presión de vapor cerca de esa área.

Entonces se puede decir que la evapotranspiración es continua en tanto se mantengan las tres condiciones antes comentadas.

En México se ha observado que el uso consultivo o evapotranspiración suele ser de mucha importancia tanto para la determinación en el diseño de sistemas de riego, como para obras de almacenamiento, conducción, drenaje, etc. Donde fundamentalmente se suelen usar el de Thorntwaite y el de Blaney-Criddle (Mijares, 2015, pp. 56)

Donde el primero es el que utilizaremos en el presente estudio ya que este utiliza el uso consultivo como una función de la temperatura mientras que el segundo este hecho para tener un mayor detalle y control de este ya que también utiliza el tipo de cultivo y con este su duración del ciclo vegetativo además de la temporada en que se sembró dicho cultivo.

1.2.- Antecedentes de la Teledetección

La historia de la teledetección se remonta a las primeras plataformas de observación aérea que se usaban en los globos aerostáticos y con la invención de la fotografía en el siglo XIX y posteriormente 1957 con el lanzamiento del satélite Sputnik, primer satélite artificial puesto en órbita alrededor de la Tierra por la Unión Soviética.

Desde entonces en el año 1960 la observación sistemática de la Tierra desde el espacio se inició con el lanzamiento del satélite TIROS-I, primer satélite meteorológico con una cámara de televisión de baja resolución, que permitía a los meteorólogos identificar zonas como lo son las nubes, agua, hielo y nieve.

Luego se inició con el vuelo tripulado Apolo 9 (1969) donde se realizó la primera experiencia de fotografía orbital multiespectral para el estudio de los recursos terrestres.

Posteriormente ya con lo antes mencionado, se encontraron resultados que los llevaron al estudio de recursos naturales terrestres con los datos de los primeros satélites meteorológicos y las misiones espaciales tripuladas las cuales impulsaron el desarrollo por la NASA del programa ERTS (Earth Resources Technological Satellite) conocido también como LANDSAT.

Donde el primer satélite específicamente dedicado a teledetección es el norteamericano LANDSAT 1 que fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972 y estuvo operativo hasta principios de 1978. El último de la serie fue el **Landsat 8** el cual es un satélite de

observación terrestre por parte de los estadounidenses donde este mismo fue lanzado el 11 de febrero del 2013 el cual será el implementado en esta investigación junto con su antecesor **Landsat 7**.

A partir de los datos suministrados por los LANDSAT, numerosos países han decidido disponer de medios propios de teledetección.

Entre estos destacan los satélites SPOT francés, RADARSAT canadiense, el MOS de Japón, el IRS de la India y el ERS de la Agencia Espacial Europea.

Actualmente, hay en órbita decenas de satélites de observación de la Tierra que generan miles de imágenes cada día para aplicaciones de uso civil y militar todos ellos de gran importancia económica y política.



Figura 2.- Representación Descriptiva de la Teledetección

1.2.1. Fundamentos de la Teledetección

De acuerdo con el programa de Sistemas de Información Geográfica de la universidad de Murcia (Alonso Sarría, 2006), la teledetección es la técnica que posibilita obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material.

Para que esto sea viable se necesita que exista una relación entre los objetos observados y un sensor localizado en una plataforma.

Como ya lo hemos descrito la teledetección se entiende como la relación que se crea al utilizar un flujo de radiación electromagnética que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor.

Este flujo se divide para su mejor entendimiento en 3 tipos:

- 1. Radiación solar reflejada por el cuerpo** perteneciente a las bandas de luz visible e infrarrojo reflejado
- 2. Radiación terrestre emitida por el cuerpo** perteneciente a las bandas del infrarrojo térmico
- 3. Radiación emitida por el sensor y reflejada** por el cuerpo perteneciente a las bandas del radar

Las técnicas fundamentadas de los primeros 2 tipos son identificados como **teledetección pasiva** y la última como **teledetección activa**.

Es aquí donde puede decirse que la radiación solar reflejada así sea terrestre o emitida por el sensor y reflejada, llega de la superficie terrestre atravesando la atmósfera y es almacenada en formato digital y una vez recuperados los datos en el interior del control del satélite, se permite obtener información sobre la superficie terrestre y de la atmósfera.

El tipo de información que se recibe dependerá de la longitud de onda en la que el sensor capte la radiación.

Por consiguiente, el estudio de esta información posibilita el reconocimiento de las propiedades de los objetos observados y de los fenómenos que se generan en la superficie terrestre y oceánica y en la atmósfera.

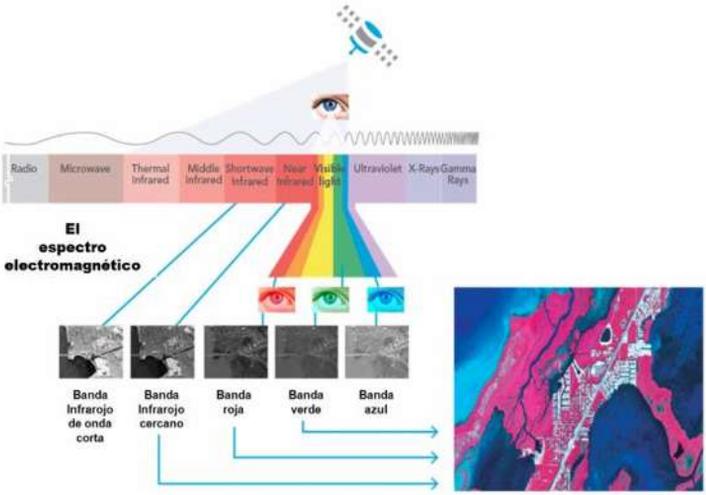


Figura 3.- Espectrograma de la Superficie

1.2.1.1. Interacciones Entre la Radiación y los Objetos

Como ya observamos y a forma de recapitulación todos los objetos independientemente de la radiación que emitan, van a recibir radiación, fundamentalmente del sol que en funcionalidad del tipo de objeto que estemos tomando en cuenta, puede continuar 3 caminos:

1. Reflejarse (ρ)
2. Absorberse (α)
3. Transmitirse (τ)

Una vez conociendo los diferentes caminos que puede tomar la radiación generamos la siguiente ecuación:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \dots\dots\dots (1)$$

En esta fórmula representamos que las tres variables tienen valores entre **0 y 1**, donde la interacción de la radiación con la atmósfera y con los objetos terrestres, es decir los valores de **ρ , τ y α** de un cuerpo concreto, va a depender de la longitud de onda de que se trate y de las características de ese cuerpo.

Para un mejor entendimiento algunos ejemplos del funcionamiento de estas interacciones serían las siguientes:

a) Atmósfera despejada:

1. ρ muy baja para todas las longitudes de onda
2. α depende de la longitud de onda
3. τ depende de la longitud de onda

b) Nubes:

1. ρ muy alta en el visible
2. α depende de la longitud de onda
3. τ depende de la longitud de onda

c) Agua:

1. ρ muy baja en todas las longitudes de onda
2. α depende de la longitud de onda
3. τ depende de la longitud de onda

d) Superficie terrestre:

1. ρ y α muy variable, dependiendo de la longitud de onda y del tipo de cobertura
2. τ nulo

(Alonso Sarría, 2006)

1.2.2. Respuesta Espectral de la Vegetación

Hay algunas respuestas espectrales que variarán dependiendo de su utilización, pero para esta investigación tocaremos una de las más comunes, la cual es la contestación espectral vegetativa sana la cual tiene una reflectividad baja en el visible, aun cuando llega

a presentar un pico en el color verde gracias a la clorofila.

Referente a la reflectividad esta es bastante alta en el infrarrojo próximo gracias a la poca absorción de energía de parte de las plantas en esta banda.

En el infrarrojo medio existe una disminución especialmente fundamental en esas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía y a lo largo del otoño y por lo tanto las hojas pierden los cloroplastos debido a que deja de ser necesarios, por consiguiente, deja de ser la clorofila el pigmento primordial y las plantas adquieren un color amarillento gracias a la cada vez más grande trascendencia relativa de carotenos y otros pigmentos.

Otro dato también a tomar en cuenta se debe a que la curva se debilita en la situación de la vegetación enferma en la que reduce el infrarrojo e incrementa la reflectividad en el rojo y azul.

Se observa además que la reflectividad de una planta es dependiente de su contenido en agua.

Una vez que el contenido de agua incrementa la reflectividad debido a que se incrementa la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

La proporción de energía de los fotones que viajan con longitudes de onda más grandes (infrarrojo cercano) es bastante baja para ser aprovechada por la vegetación por lo cual sólo se absorbe alrededor del 5%, lo demás se transmite (40%) o refleja (55%).

No obstante, la energía transmitida acabará llegando a otra hoja situada por abajo, y por consiguiente el 55% de aquel 40% se volverá a reflejar.

Este proceso es repetido en diferentes capas y provoca que se aumente el tanto por ciento de energía reflejada.

El envejecimiento de la planta conlleva además una reducción en la reflectividad en el infrarrojo donde las variaciones en la composición interna de las hojas son la causa primordial de que los patrones de respuesta espectral sean diferentes de unas especies a otras.

En cuanto al infrarrojo medio, el agua presente en los tejidos vegetales absorbe la radiación en diversas longitudes de onda hasta conseguir valores de $\alpha = 0.9$ que están afectando inclusive a las longitudes de onda vecinas de esas en las que se genera máxima absorción.

Generalmente cuanto menor sea el contenido de agua de una planta, más grande va a ser su reflectividad en el infrarrojo medio (Alonso Sarría, 2006),

1.2.1.2. Índices de Vegetación

Una vez entendiendo la conducta de la respuesta espectral de la vegetación procedemos a conocer el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) que utilizaremos en esta investigación y cuya ecuación es:

$$NDVI = \frac{\rho^4 - \rho^3}{\rho^4 + \rho^3} \dots \dots \dots (2)$$

Este índice se basa en que la vegetación tiene una reflectividad muy alta en la banda 4 de landsat y muy baja en la banda 3.

Por lo tanto, cuanto mayor sea la diferencia entre ambas bandas mayor es el porcentaje de cobertura vegetal y más sana esta.

El dividir el índice entre la suma de ambas reflectividades compensa el efecto de mayor o menor luminosidad como el efecto de la atmósfera.

Se han propuesto distintas variantes para mejorar este índice.

El objetivo fundamental es eliminar la influencia que el suelo puede tener sobre las reflectividades en el rojo y el infrarrojo cercano y que pueda enmascarar las de la vegetación.

Esto ha llevado en muchos casos a ocupar una banda extra en el satélite para evitar el regreso de la reflectividad del suelo (Alonso Sarría, 2006).

1.3. Estudios Relacionados

El presente estudio está basado en el estudio ya realizado de nombre **Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS** proporcionado por la revista de teledetección de la Asociación Española de Teledetección por Marini, F. ^{*1}, Santamaría, M. ²,

Oricchio, P.³, Di Bella, C.M.³, Basualdo, A.⁴, en este establece que ya se han elaborado modelos para el cálculo de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en base a un análisis de regresión múltiple entre dichos parámetros estimados en siete estaciones meteorológicas y dos variables derivadas de imágenes satelitales MODIS: Temperatura de Superficie (TS) e Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (Normalized Difference Vegetation Index -NDVI).

Dichos modelos permitieron estimar ETR y ETP en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) en base al análisis del período 2000/2014.

Ambos fueron calibrados satisfactoriamente en cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Donde se ajustó un modelo de regresión múltiple lineal a la variable ETR, con un coeficiente de determinación de 0.6959.

En el caso de la variable ETP el modelo de regresión ajustado fue no lineal y su coeficiente de determinación de 0.8409.

El análisis de regresión individual de cada una de las estaciones meteorológicas permitió explicar el comportamiento de la regresión basada en el conjunto completo de datos, tanto para la variable ETR como para la variable ETP.

Los resultados refuerzan la ventaja de la teledetección en la estimación de ETR y ETP en zonas en donde no se dispone de datos meteorológicos.



Zona de Estudio



2.- ZONA DE ESTUDIO

2.1.- Localización

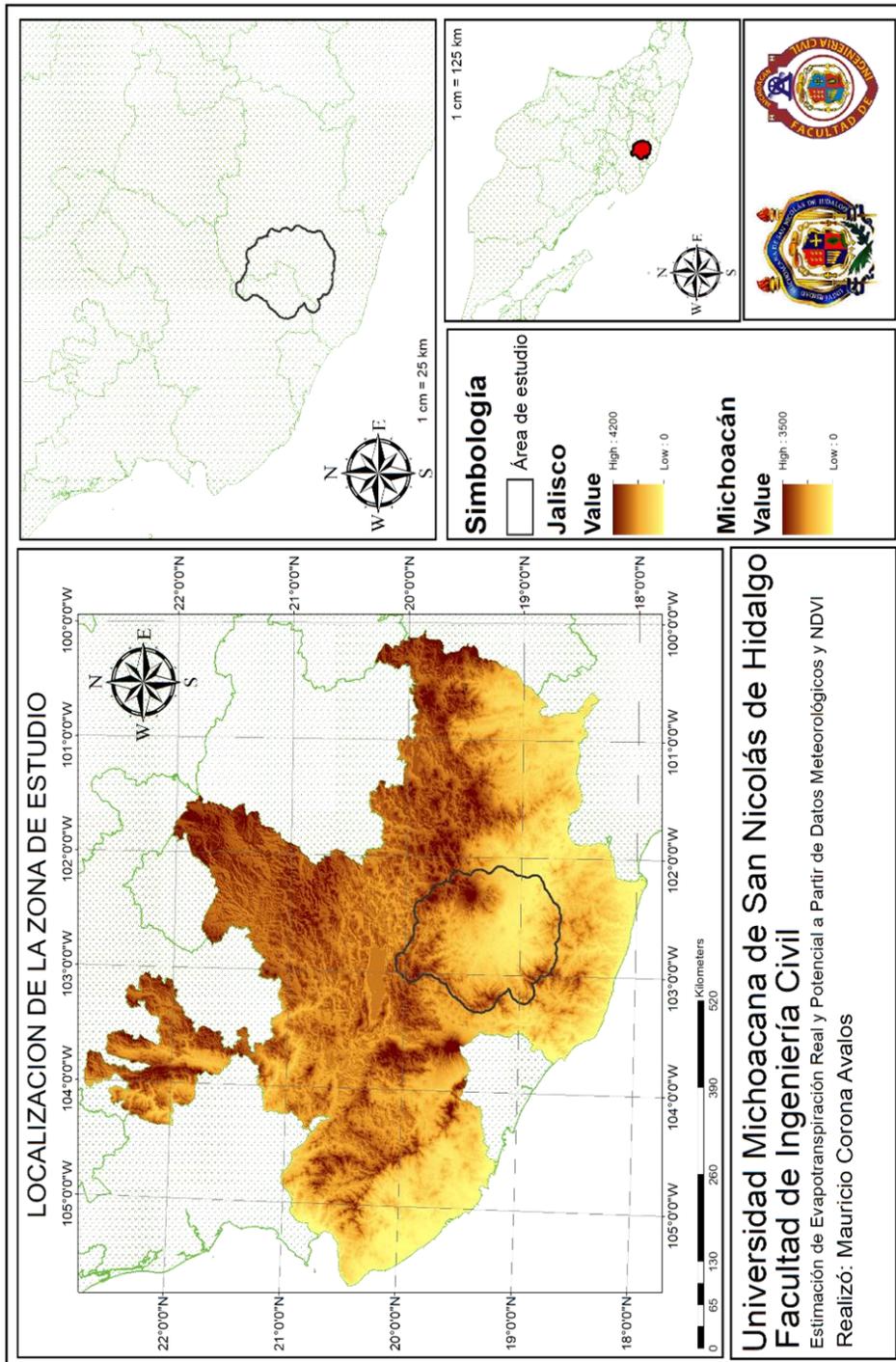
La cuenca del río Tepalcatepec tiene una superficie de 14291.18 km², y se localiza en parte de los estados de Jalisco y Michoacán, entre los 18°36' latitud norte, 103°10' longitud oeste, y 20°0' latitud norte, 102°35' longitud oeste.

2.2.- Orografía

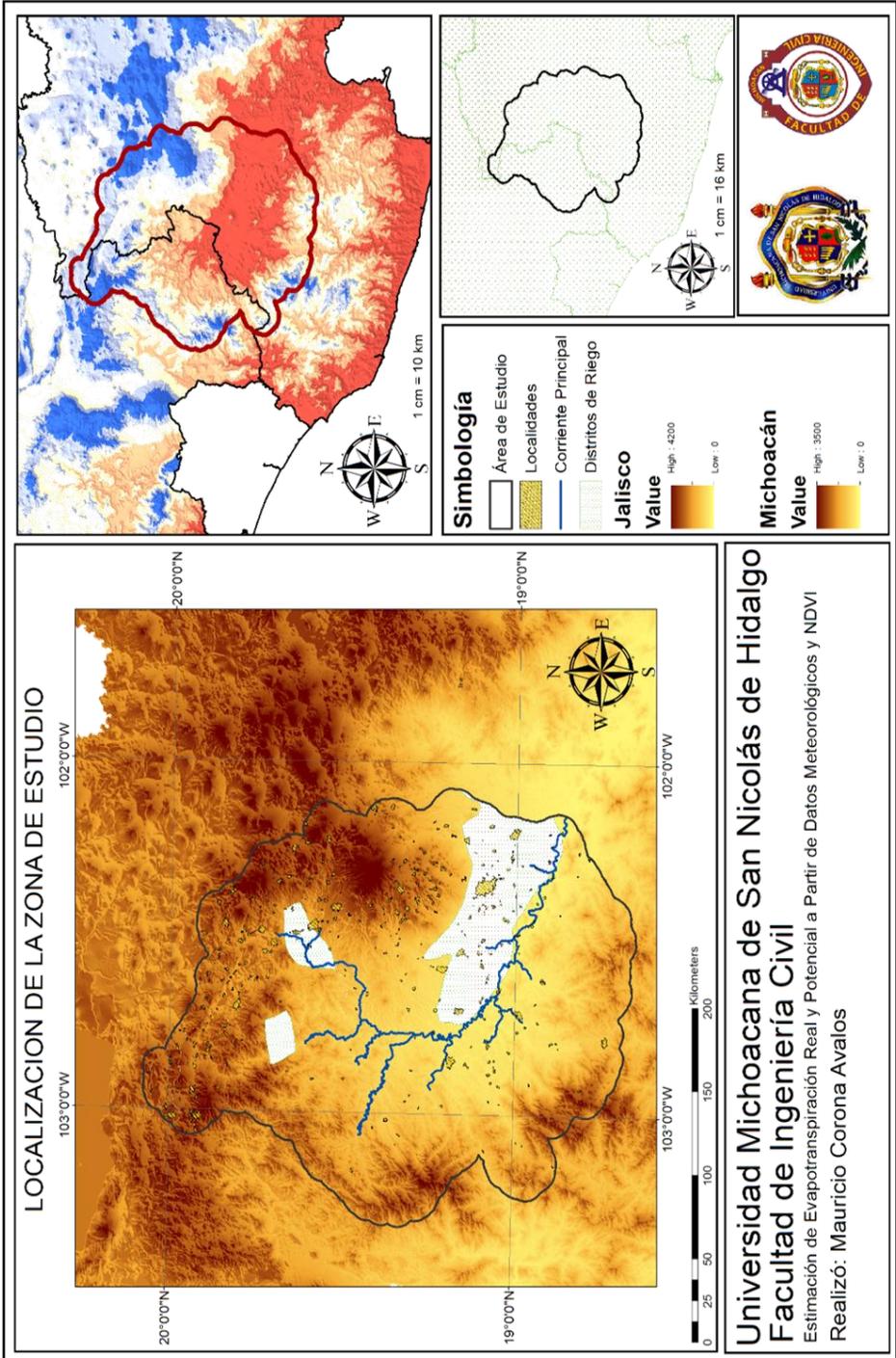
Los principales rasgos fisiográficos de la cuenca son el valle del río Tepalcatepec, la Sierra de Jalmich, el Sistema Volcánico Transversal con el Pico de Tancítaro y la Sierra Madre del Sur.

La altitud en la cuenca varía entre 160 y 3 840 msnm, pero el 90.5% de su superficie se ubica entre los 200 y 2 300 m

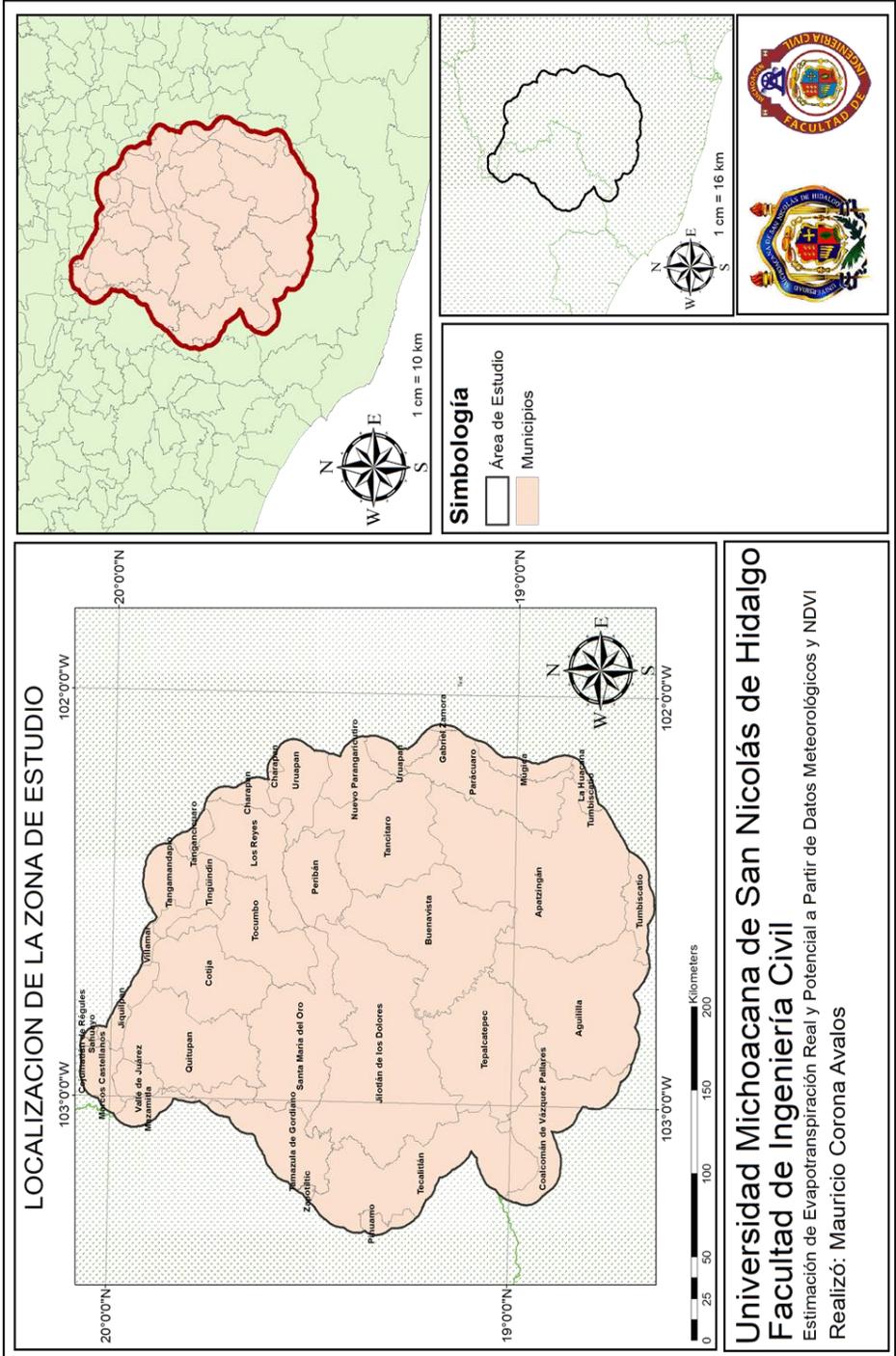
Además, como podemos observar el área de estudio comprende cerca de **35 municipios entre Michoacán y Jalisco** que se muestran a detalle en la tabla 1 con su debido porcentaje en función del área total de la cuenca.



Mapa 1.- Localización de la zona de Estudio 1



Mapa 2.- Localización de la zona de Estudio 2



Mapa 3.- Localización de la zona de Estudio 3

No.	Municipio	Área (Km2)	Perímetro (Km)	% Área de la Cuenca
1	Tumbiscatio	181.67	108.63	1.27
2	Coalcomán de Vázquez Pallares	514.44	172.58	3.60
3	Aguililla	1035.06	190.66	7.24
4	La Huacana	27.93	25.34	0.20
5	Mujica	116.4	77.59	0.81
6	Apatzingán	1598.64	270.92	11.19
7	Tepalcatepec	794.2	196.01	5.56
8	Gabriel Zamora	9.7	20.07	0.07
9	Parácuaro	494.53	169.62	3.46
10	Buenavista	917.52	219.49	6.42
11	Nuevo Parangaricutiro	213.01	74.11	1.49
12	Tancítaro	710.27	155.44	4.97
13	Mazamitla	101.81	62.72	0.71
14	Valle de Juárez	191.39	138.1	1.34
15	Quitupán	669.8	168.21	4.69
16	Tamazula de Gordiano	398.89	152.98	2.79
17	Zapotiltic	13	22.35	0.09
18	Santa María del Oro	771.73	216.22	5.40
19	Tecalitlán	921.2	245.8	6.45
20	Jilotlan de los Dolores	1468.01	311.1	10.27
21	Pihuamo	58.26	52.01	0.41
22	Peribán	329.82	99.7	2.31
23	Uruapan	397.55	170.94	2.78
24	Charapan	108.82	70.9	0.76
25	Los Reyes	475.85	158.18	3.33
26	Tocumbo	501.01	172.65	3.51
27	Tingüindín	172.25	92.49	1.21
28	Cotija	502.86	131.58	3.52
29	Tangamandapio	202.51	68.9	1.42
30	Tangancícuaro	62.54	44.37	0.44
31	Jiquilpan	130.37	78.37	0.91
32	Sahuayo	10.1	15.99	0.07
33	Villamar	34.72	36.04	0.24
34	Marcos Castellanos	146.66	64.42	1.03
35	Coquimatlán de Regules	8.6	22.16	0.06
	Total	14291.12	4276.64	100%

Tabla 1.- Porcentaje del área del municipio dentro de la cuenca

2.3.- Hidrografía

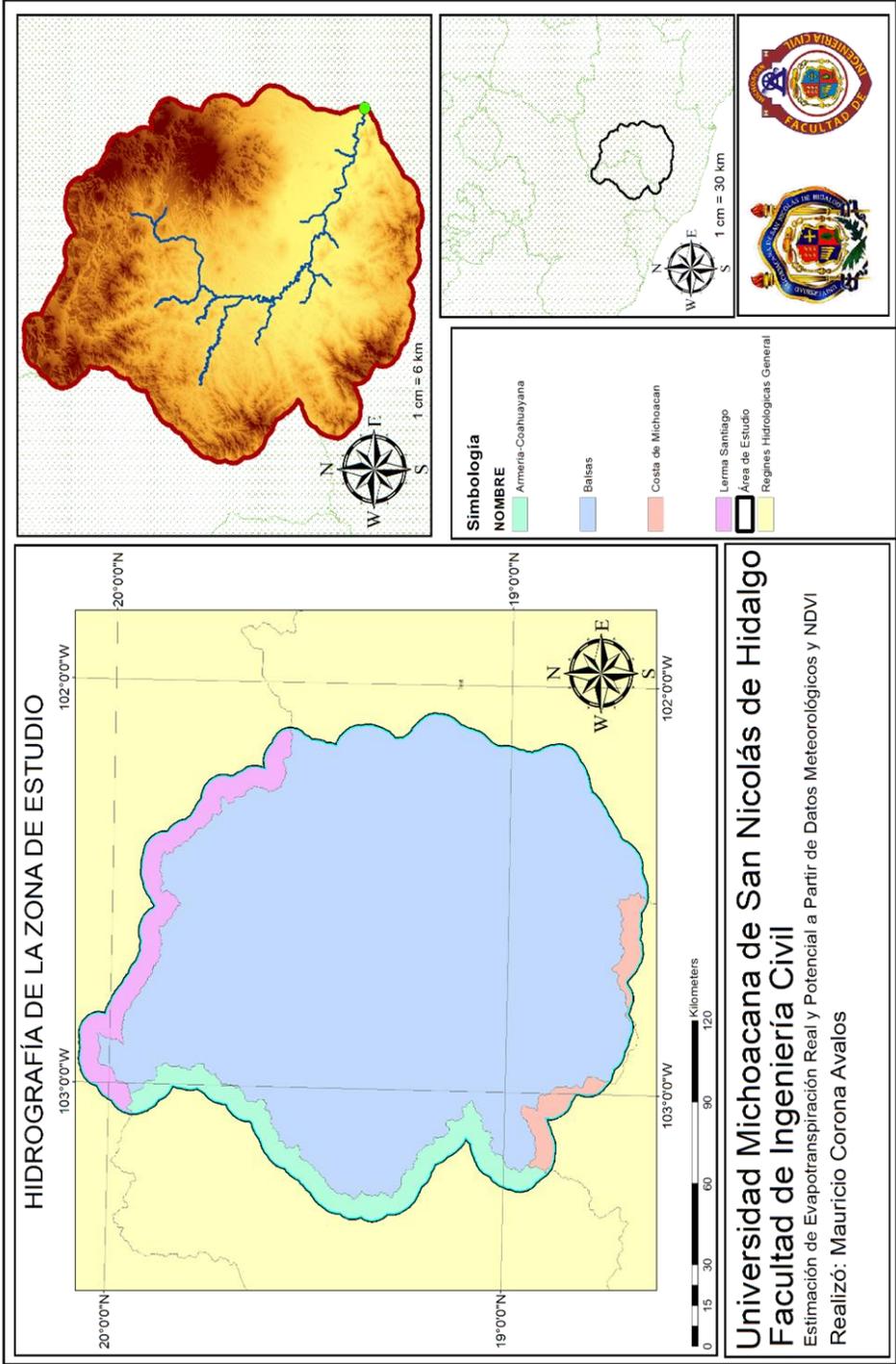
El río Tepalcatepec constituye el segundo curso fluvial más importante en la región hidrológica del río Balsas.

Donde esta cuenca está conformada por 61 subcuencas de las cuales 27 tienen un canal principal y 23 cuentan con más de un canal, por lo que se consideraron marginales. (CONAGUA. 2002)

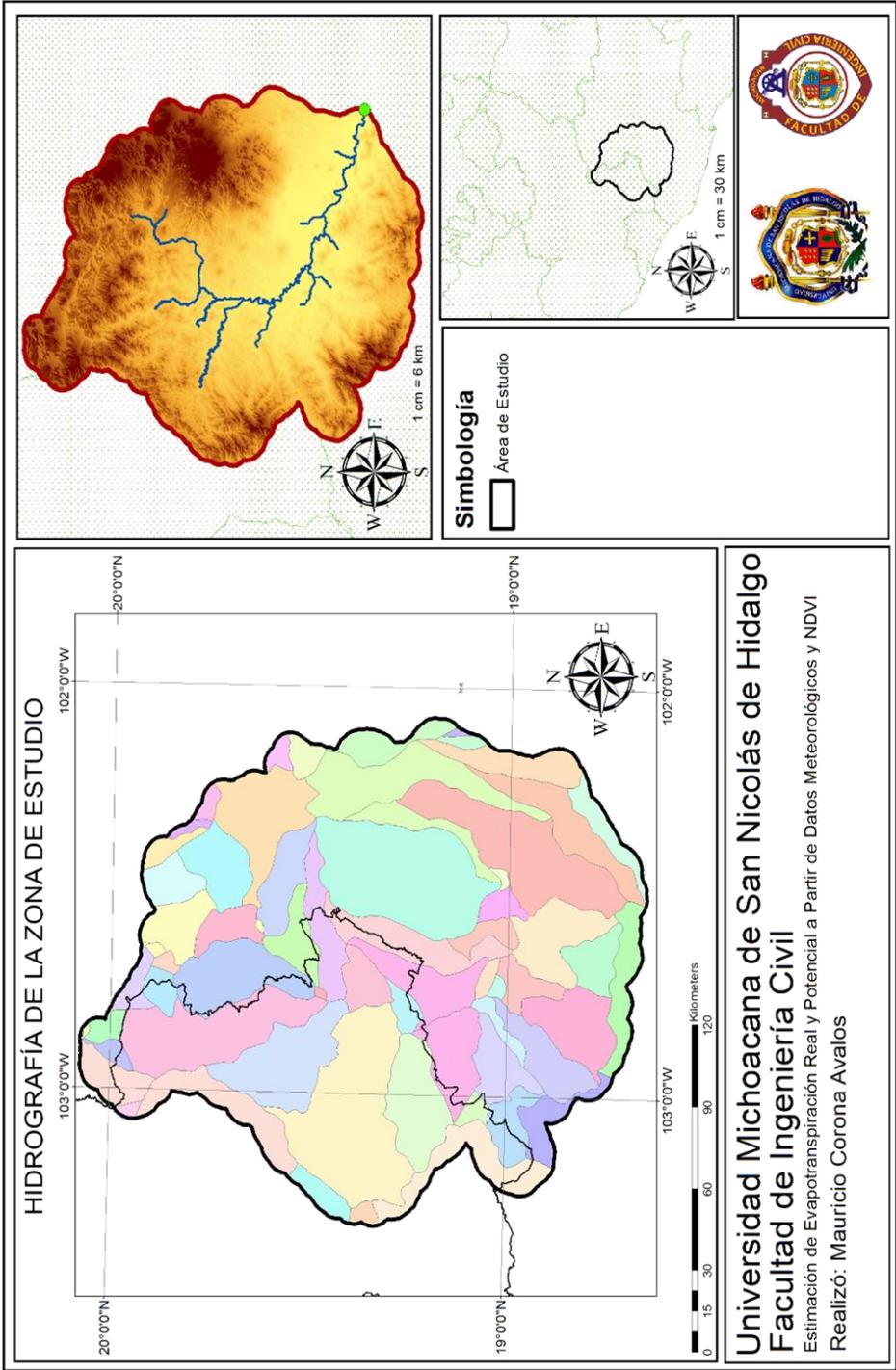
También como podemos observar, esta cuenta con 4 Presas principales (Valle de Juárez, La Lagunilla, Chilatán y Los Olivos) donde el uso primordial de estas presas es para el riego agrícola y el control de las avenidas del Río Tepalcatepec.

Además, la evaporación media anual es de 180 mm, presentándose los valores máximos durante los meses de marzo, abril y mayo. (CONABIO. 2018)

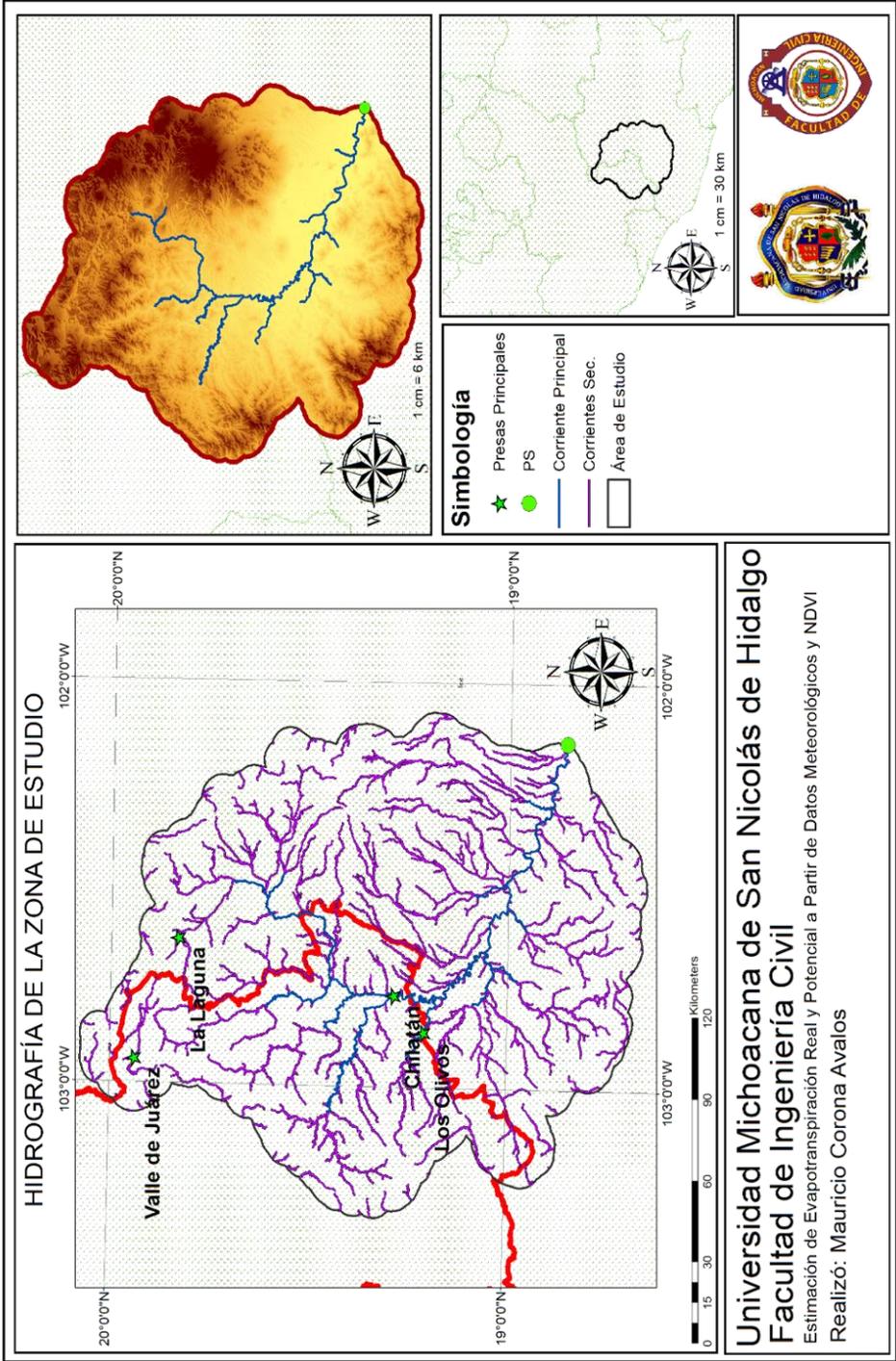
Con una temperatura media anual de 27° C, y sus extremas mayores a 40° C, presentándose durante los meses de mayo y junio. (CONABIO. 2018)



Mapa 4.- Hidrografía de la Zona de Estudio 1



Mapa 5.- Hidrografía de la Zona de Estudio 2



Mapa 6.- Hidrografía de la Zona de Estudio 3

2.4.- Clima

El clima de la cuenca está influido por la altitud y, en resumen, casi la cuarta parte de la cuenca (30.74%) cuenta con clima **Cálido subhúmedo**, más de una tercera parte (40.72%) tiene climas **semi cálidos subhúmedos**, casi otra cuarta parte (0.51%) está representada por los tipos **semi fríos** y el restante (28.24%) corresponde a tipos climáticos **templados subhúmedos**. (CONABIO. 2018)

2.5.- Uso de Suelo

El uso de suelo se compone principalmente de bosques y vegetación secundaria de estos mismos, del distrito de riego 097 y de una zona de pastizales.

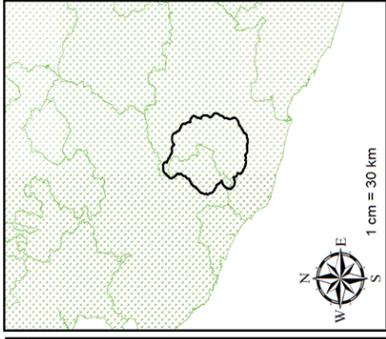
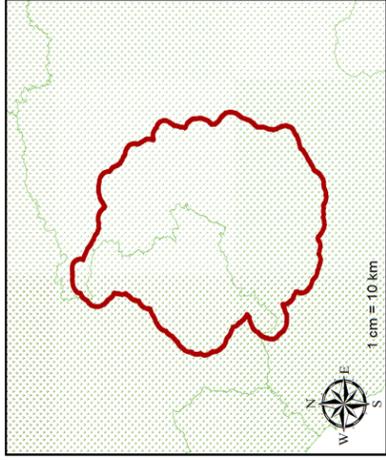
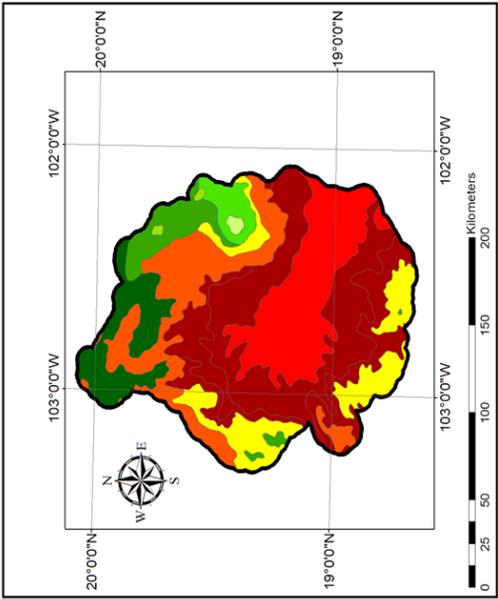
2.5.- Tipo de Suelo

En su mayoría la cuenca tiene un tipo de suelo “C” de acuerdo con la norma 011-CNA-2000 donde establece que cuenta con suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable o bien de arcillas.

CLIMATOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
 Facultad de Ingeniería Civil

Estimación de Evapotranspiración Real y Potencial a Partir de Datos Meteorológicos y NDVI
 Realizó: Mauricio Corona Avalos



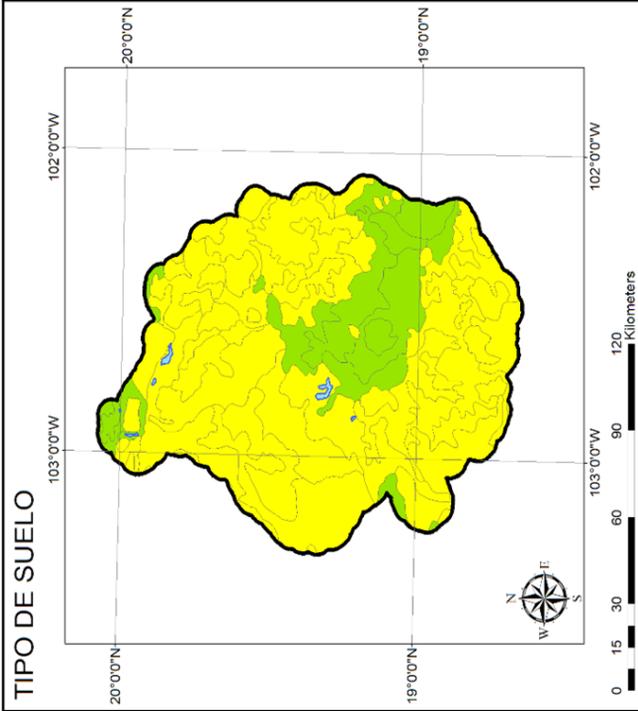
Simbología

- Área de Estudio
- DES_TEM**
- Calido subhurnedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frio mayor de 18°C.
- Semiarido calido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes mas frio mayor de 18°C.
- Semicálido subhurnedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes mas frio menor de 18°C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22°C.
- Semicálido subhurnedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes mas frio menor de 18°C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22°C.
- Semifrio, humedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C, temperatura del mes mas caliente bajo 22°C.
- Semifrio,subhurnedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C, temperatura del mes mas caliente bajo 22°C.
- Templado, humedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C.
- Templado, subhurnedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C.
- Templado,subhurnedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C.

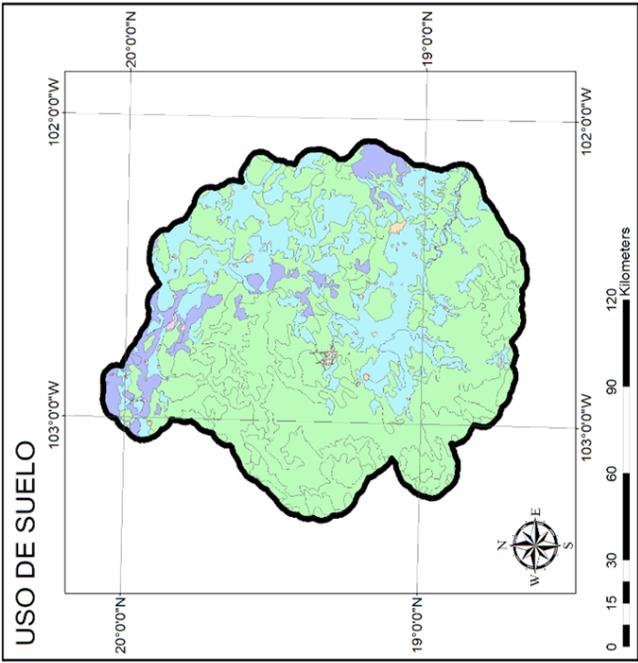


Mapa 7.- Climatología de la Zona de Estudio

USO Y TIPO DE SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Civil
 Estimación de Evapotranspiración Real y Potencial a Partir de Datos Meteorológicos y NDVI
 Realizó: Maurício Corona Avalos



Simbología

[Outline] Área de Estudio
tipo
 CLA_TEX [Blue] Cultivo en Hileras
 [Green] Fina
 [Yellow] Medio

Simbología

uso
Tipo_Norma
 [Light Green] Bosque Cubierto del 25 al 50%
 [Pink] Cuerpo de Agua
 [Light Blue] Cultivo en Hileras
 [Purple] Pastizal del 50 al 75%
 [Orange] Zona Urbana

Mapa 8.- Uso y Tipo de Suelo de la Zona de Estudio



Metodología



3.- METODOLOGIA

3.1.- Materiales

3.1.1.- Base de Datos

Una pequeña referencia de esto es la de **Henry F. Korth, Abraham Silberschatz & S. Sudarshan, 2002, p. 1**; que establece que los sistemas de bases de datos deben proporcionar la fiabilidad de la información almacenada, a pesar de las caídas del sistema o los intentos de acceso sin autorización.

Eso nos lleva a que los sistemas de bases de datos se diseñan para gestionar grandes cantidades de información.

Donde la gestión de datos no solo implica la definición de estructuras para almacenar la información si no también la provisión de mecanismos para la manipulación de esta.

Para el desarrollo del presente trabajo es requerible la estructuración de un conjunto de datos obteniéndose de manera individual para posteriormente ser procesados para conocer las características geográficas, climatológicas y físicas.

Donde estas se obtienen de bases de datos climatológicos de la zona de estudio y sus alrededores por parte de CLICOM e imágenes satelitales proporcionadas por las bases de datos del sistema de Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y Libra.

3.1.2. Sistema CLICOM

CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLImate COMputing Project.

Donde se obtienen observaciones diarias de la base de datos y que representan datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM.

En ella se pueden encontrar cada una de las diferentes estaciones del país que contiene diferentes periodos de información, pero se pueden encontrar datos desde 1920 a 2012.

Ya dentro de la base de datos en la pestaña de Estaciones dentro de CLICOM permite hacer una serie de gráficas (ciclo anual y series de tiempo de temperaturas, precipitación, evaporación y unidades de calor) y descargarlas, así como los datos de las gráficas en formato de texto.

Donde la interfaz de visualización de las gráficas se hace seleccionando primero un estado del país y luego una estación climática directamente del mapa, o bien se hace una búsqueda de una estación por su nombre o código.

También se pueden seleccionar las estaciones con más y menos de 25 años de datos.

Se hace la aclaración que el SMN hace un control de calidad inicial de la base de datos del CLICOM con el motivo de aumentar su confiabilidad.

3.1.3. USGS

Es el Servicio Geológico de los Estados Unidos de América o USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Survey), es una agencia científica del gobierno federal de los Estados Unidos.

Donde los científicos de la USGS estudian el terreno, los recursos y los peligros naturales que los amenazan.

3.1.3.1. Earth Explorer

Es una extensión del portal de datos de la USGS, para obtener un conjunto de datos geoespaciales de las extensas colecciones de la página USGS.

Donde los usuarios pueden navegar a través de un mapa interactivo o búsqueda de texto para obtener imágenes del satélite Landsat en cualquiera de sus versiones, donde se pueden descargar datos de radar, datos de UAS, gráficos de líneas digitales, datos de modelos de elevación digitales, fotos aéreas, datos de satélites Sentinel, algunas imágenes de satélites comerciales, incluidos IKONOS y OrbView3, datos de cobertura terrestre, datos de mapas digitales del Mapa Nacional y muchos otros conjuntos de datos.

3.1.4. Libra

Libra es un navegador para imágenes del satélite Landsat 8 abiertas, desarrollados por astro digital y

development Seed que permite una mejor apreciación de los datos de manera más amigable observando la cantidad de imágenes disponibles del sitio en un rango de fecha lo cual ayuda a rellenar el número de vacíos que no se pueden encontrar o que han sido borrados de la página de la USGS

Esta se utiliza para buscar, filtrar, ordenar y descargar imágenes donde cada círculo marcado del mapa representaba la cantidad de imágenes disponibles en una ubicación establecida.

Y una vez haciendo la búsqueda se puede filtrar para seleccionar un porcentaje de cobertura de nubes y ángulo azimutal del sol.

3.1.5. Satélites

3.1.5.1. Landsat 7

El Landsat 7 es propiedad del gobierno de los Estados Unidos y fue lanzado con éxito el 15 de abril de 1999, desde el Western Test Range de la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, en un vehículo de lanzamiento prescindible Delta-II.

El instrumento de observación de la Tierra del Landsat 7 es un Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que replica las capacidades de los exitosos instrumentos Thematic Mapper en Landsat 4 y 5.

El Landsat7 puede adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81° de latitud norte hasta los 81° de latitud sur y, obviamente, en todas las longitudes del globo terrestre.

Una órbita del Landsat7 es realizada en aproximadamente 99 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra por día, y cubrir la totalidad del planeta en 16 días.

La órbita es descendente, o sea de norte a sur.

El Landsat7 está "helio sincronizado", o sea que siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar.

Un factor importante es que el período de revolución del LANDSAT 7 es igual que el del Landsat 5 de 16 días, y una imagen que cubre un área igual de 185 x 185 km por escena.

La conservación de estos parámetros técnicos facilita que el proceso de captura de imágenes se pueda realizar con la misma grilla de referencia.

Cuenta con 8 bandas distintas las cuales se clasifican de acuerdo con la siguiente manera:

- Banda 1 visible (0,45 - 0,52 μm) 30 m
- Banda 2 visible (0,52 - 0,60 μm) 30 m
- Banda 3 visible (0,63 - 0,69 μm) 30 m
- Banda 4 Infrarrojo cercano (0,77 - 0,90 μm) 30 m
- Banda 5 Infrarrojos de onda corta (1,55 - 1,75 μm) 30 m
- Banda 6 Térmica (10,40 - 12,50 μm) 60 m
Ganancia baja / ganancia alta
- Banda 7 Infrarrojo medio (2,08 - 2,35 μm) 30 m
- Banda 8 Pancromática (PAN) (0,52 - 0,90 μm) 15 m

3.1.5.2. Landsat 8

Landsat 8 fue lanzado en un cohete Atlas-V desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, el 11 de febrero de 2013.

Landsat 8 es el satélite Landsat lanzado más recientemente y lleva los instrumentos Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Landsat 8 orbita la Tierra en una órbita casi polar sincrónica con el sol, a una altitud de 705 km, inclinada a 98.2 grados y completa una órbita terrestre cada 99 minutos.

El satélite tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial a las 10:00 am +/- 15 minutos.

Landsat 8 adquiere alrededor de 740 escenas por día en el sistema de ruta / hilera del Sistema de Referencia Mundial-2 (WRS-2), con una superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 7 por ciento en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 por ciento en latitudes extremas.

El tamaño de una escena de Landsat 8 es de 185 km x 180 km.

Las bandas del Landsat 8 se pueden clasificar como ya vimos en 2 tipos:

1.- Operational Land Imager (OLI): construido por Ball Aerospace & Technologies Corporation donde estas tienen nueve bandas espectrales, incluida una banda panorámica:

- Banda 1 visible (0,43 - 0,45 μm) 30 m
- Banda 2 visible (0,450 - 0,51 μm) 30 m
- Banda 3 Visible (0,53 - 0,59 μm) 30 m
- Banda 4 Roja (0,64 - 0,67 μm) 30 m
- Banda 5 Infrarrojo cercano (0,85 - 0,88 μm) 30 m
- Banda 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65 μm) 30 m
- Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm) 30 m
- Banda 8 Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68 μm) 15 m
- Banda 9 Cirrus (1,36 - 1,38 μm) 30 m

2.-Sensor infrarrojo térmico (TIRS): construido por el Centro de vuelo espacial Goddard de la NASA que contiene dos bandas espectrales:

- Banda 10 TIRS 1 (10,6 - 11,19 μm) 100 m
- Banda 11 TIRS 2 (11,5 - 12,51 μm) 100 m

3.1.6. Software de Modelación Geográfica

3.1.6.1. ARCGIS

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) funciona como una base de datos con información geográfica de una manera alfanumérica que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital.

En pocas palabras a través de un lenguaje alfanumérico se puede dar un valor a un píxel y con este interactuar de una manera más fácil y eficiente ya que se le puede dar múltiples valores con el afán de poder efectuar algunas operaciones a un objeto, a esto se le puede conocer como generación de atributos e,

inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

Entonces se puede definir que la razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial donde el sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.

Es aquí donde entra el software de ArcGIS que es un complemento del sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

ArcGIS permite:

- Crear, compartir y utilizar mapas inteligentes
- Compilar información geográfica
- Crear y administrar bases de datos geográficas
- Resolver problemas con el análisis espacial
- Crear aplicaciones basadas en mapas
- Dar a conocer y compartir información mediante la geografía y la visualización

Los formatos con los que ArcGIS obtiene información son de tipo ráster y vectoriales, siendo el primer elemento discretos, continuos que representan una malla y facilitan la combinación de datos con capas y

el análisis espacial, y el segundo llamado también shapes cuenta con objetos lineales, puntuales y polígonos cerrados.

3.1.6.2. QGIS

QGIS es un sistema de información geográfica de código abierto.

El proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como proyecto en SourceForge en junio del mismo año.

Con el fin de capturar, almacenar, manipular, analizar y visualizar en todas sus formas la información espacialmente referenciada que permitan caracterizar el espacio geográfico para su estudio o gestión.

Aquí es donde entra una de las herramientas más poderosas de software libre: **QGIS**.

Al igual que los demás SIG existentes, QGIS permite la creación de mapas con numerosas capas que pueden ser ensambladas bajo diferentes formatos, dependiendo de la aplicación.

Pero las verdaderas características que hacen de QGIS una potente herramienta son:

- Soporte para la extensión espacial de SpatiaLite, ORACLE Spatial y PostGIS, que añade soporte a objetos geográficos en una base de datos, convirtiéndola en una base de datos espacial.

- Permite la creación de mapas a través de capas ráster o de capas vectoriales soportando numerosos formatos, Shapefile, ArcInfo, MapInfo, GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.
- Puede trabajar bajo cualquier sistema operativo, GNU/Linux, BSD, Unix, Mac OSX y Windows.

Una de las características más sorprendentes de QGIS es su capacidad para adaptarse al usuario con la arquitectura de complemento extensible y las librerías con las que cuenta es posible crear complementos enfocados a la necesidad de cada proyecto, permitiendo crear capas con información realmente interesante en cada mapa.

Incluso es posible crear nuevas aplicaciones bajo código C++ y Python.

3.1.7. Thorntwaite

EL método de Thorntwaite (TW) es el proceso para el cálculo de la evapotranspiración potencial desarrollado en 1944 por su creador Charles Warren Thorntwaite, por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso y que a través de las plantas regresa a la atmosfera a través de vapor y que se le conoce también como Evapotranspiración Potencial (ET_p) donde esta dependerá de dos factores variables que son:

- 1. El contenido de humedad del suelo**
- 2. El desarrollo general de la planta**

Se podría decir que se parece un poco al proceso de evaporación solo que la superficie de donde se escapan las moléculas del agua no es una superficie de agua si no las mismas hojas de las plantas.

En pocas palabras la fórmula considera la temperatura media del aire y un índice de calor anual.

Y se encuentra definida por las siguientes ecuaciones:

$$U_j = 1.6 * K_a * \left(\frac{10 * T_j}{I}\right)^a \dots\dots\dots (3)$$

donde:

U_j = Evapotranspiración Potencial en el mes j en cm

T_j = Temperatura media en el mes j en °C

a, I = Son constantes

K_a = Es una Constante que depende de la latitud y el mes del año (tabla 2)

En cuanto a las constantes de Índice de eficiencia de temperatura (I) y a , se calculan de la siguiente manera

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1.514} \dots\dots\dots (5)$$

j es el número del mes

$$a = 675x10^{-9} * I^3 - 771x10^{-7} * I^2 + 179x10^{-4} * I + 0.492 \dots\dots\dots (6)$$

Latitud grados						
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36
Latitud grados	Julio	Agosto	Septiem- bre	Octubre	Noviem- bre	Diciem- bre
0	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Tabla 2.- Constante Ka para Cálculo de la Evapotranspiración de Thornthwaite

3.1.8. Regresión Lineal Simple

La regresión lineal es una técnica paramétrica (porque hace ciertas suposiciones basadas en el conjunto de datos) utilizada para predecir variables continuas, dado un conjunto de variables independientes.

Matemáticamente la regresión lineal usa una función lineal para aproximar o predecir la variable dependiente dada como $Y = aX + b$; donde Y es la variable dependiente y X es la variable

independiente, **a** y **b** son la constante que debe ser determinada.

El objetivo de este es minimizar la distancia vertical entre todos los datos y nuestra línea, por lo tanto, para usar la mejor línea debemos minimizar la mayor distancia posible de esta con respecto a los datos.

Una vez entendiendo esto ay que comprender que no importa cuán poderoso sea el algoritmo que elijamos, siempre habrá un error irreductible por lo que sabemos que no podemos eliminar por completo el error, pero aun podemos intentar reducirlo al nivel más bajo.

Algunas de las suposiciones que podemos decir del modelo es que existe una relación lineal y esta es adictiva entre las variables dependientes e independientes para este no debe de haber correlación entre las variables independientes y los términos de error deben poseer varianza constante, ni deben correlacionarse y el último punto es que la variable dependiente y los términos de error deben tener una distribución normal

3.1.9. Regresión Lineal múltiple

A comparación de la regresión lineal simple la múltiple utiliza múltiples variables independientes que contribuyen a la variable dependiente por lo que se manejan múltiples coeficientes y es

más compleja debido a las variables añadidas por lo que la vuelve un sistema más complejo.

En esta la ecuación queda de la siguiente manera $Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + b$; donde de igual forma “ $a_1\dots n$ ” son coeficientes y “ $X_1\dots n$ ” son las variables independientes.

Es aquí donde no incluimos todas las variables independientes a la vez y posteriormente comenzamos a minimizar la función de error para esto se debe enfocar en seleccionar las mejores variables independientes que puedan contribuir a la variable por lo que debemos construir una matriz de correlación para todas las variables independientes e incluimos la variable dependiente

3.2.- Métodos

3.2.1. Obtención de la Información Satelital Básica

Para el presente proyecto se inició descargando el periodo de información comprendido del 2000 al 2018 lo cual nos da un total de 19 años de información y tomando en cuenta que fueron un total de 4 escenas por mes de investigación, este nos arroja un total de 912 imágenes de los cuales solamente se encontraron 616 que con el motivo de pre analizar el funcionamiento de estas, eh identificar las diferentes zonas que se pueden observar dentro del margen de la zona de estudio, se procedió a ingresar a la página de la USGS habilitando el apartado de Earth Explorer y utilizando un criterio de búsqueda a partir de una ruta poligonal ya marcada el cual corresponde

a polígonos de apoyo los cuales sus coordenadas fueron:

- **Camino: 28 Ruta: 46**
- **Camino: 28 Ruta: 47**
- **Camino: 29 Ruta: 46**
- **Camino: 29 Ruta: 47**

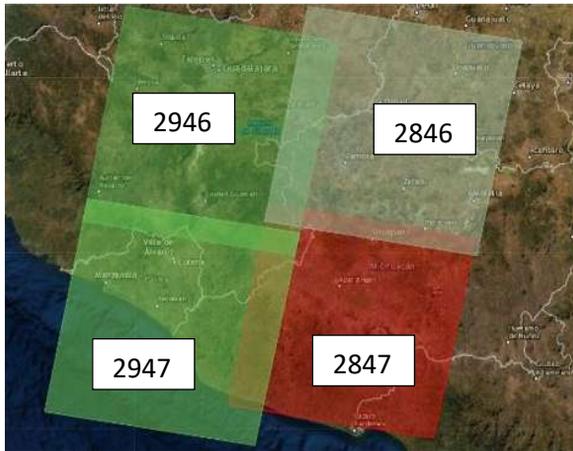


Figura 4.- Selección de la Zona de Estudio

ya con esta información se procedió a darle un periodo de tiempo mes a mes para cada año con él a fin de tener un número suficiente de información y a esta se le aplicó también un periodo de nubosidad del 70 % para no perder la buena visualización de los datos y obtener a su vez un mayor número de información de estos mismos como se observa en la tabla 3 que muestran los años útiles para el presente proyecto.

Landsat 7

	2846	2847	2946	2947	
ene-2000	1	1	1	1	Green
feb-2000	0	0	0	0	Red
mar-2000	0	0	0	0	Red
abr-2000	1	1	1	1	Green
may-2000	1	1	1	1	Green
jun-2000	1	1	1	0	Red
jul-2000	1	1	1	1	Green
ago-2000	1	1	1	1	Green
sep-2000	1	1	1	0	Red
oct-2000	1	1	0	1	Red
nov-2000	1	1	0	1	Red
dic-2000	0	1	1	1	Red
ene-2001	0	1	1	1	Red
feb-2001	1	1	0	1	Red
mar-2001	0	0	1	0	Red
abr-2001	1	1	0	0	Red
may-2001	1	0	0	0	Red
jun-2001	0	0	0	1	Red
jul-2001	0	1	1	1	Red
ago-2001	1	1	1	1	Green
sep-2001	1	1	1	1	Green
oct-2001	0	0	1	1	Red
nov-2001	1	1	0	1	Red
dic-2001	0	0	0	0	Red
ene-2002	1	1	1	1	Green
feb-2002	0	0	0	0	Red
mar-2002	1	1	0	0	Red
abr-2002	1	1	0	1	Red
may-2002	1	1	1	1	Green
jun-2002	1	1	1	1	Green
jul-2002	0	0	1	1	Red
ago-2002	0	0	1	1	Red

sep-2002	1	1	1	1	█
oct-2002	1	0	0	0	█
nov-2002	1	1	1	1	█
dic-2002	1	1	1	1	█
ene-2003	0	0	1	1	█
feb-2003	1	1	1	1	█
mar-2003	1	1	1	1	█
abr-2003	1	1	1	1	█
may-2003	1	1	1	1	█
jun-2003	0	0	0	0	█
jul-2003	1	1	1	1	█
ago-2003	1	1	1	1	█
sep-2003	0	0	0	0	█
oct-2003	0	1	1	1	█
nov-2003	1	1	1	1	█
dic-2003	1	1	1	1	█
ene-2004	1	0	1	1	█
feb-2004	0	0	1	1	█
mar-2004	1	1	0	0	█
abr-2004	1	1	1	1	█
may-2004	1	1	1	1	█
jun-2004	0	0	1	0	█
jul-2004	0	0	1	1	█
ago-2004	0	1	1	1	█
sep-2004	1	1	1	1	█
oct-2004	1	1	1	1	█
nov-2004	1	1	1	1	█
dic-2004	1	1	0	1	█
ene-2005	1	1	1	1	█
feb-2005	1	1	1	1	█
mar-2005	1	1	1	1	█
abr-2005	1	1	1	1	█
may-2005	1	1	1	1	█

jun-2005	1	1	1	1	█
jul-2005	0	0	1	1	█
ago-2005	0	0	1	1	█
sep-2005	1	0	1	1	█
oct-2005	1	1	1	1	█
nov-2005	1	1	1	1	█
dic-2005	1	1	1	1	█
ene-2006	1	1	1	1	█
feb-2006	1	1	1	1	█
mar-2006	1	1	1	1	█
abr-2006	1	1	1	1	█
may-2006	1	1	1	1	█
jun-2006	1	0	1	1	█
jul-2006	0	0	1	1	█
ago-2006	0	0	1	0	█
sep-2006	1	1	1	1	█
oct-2006	1	1	1	1	█
nov-2006	0	0	0	0	█
dic-2006	1	1	1	1	█
ene-2007	1	1	1	1	█
feb-2007	1	1	1	1	█
mar-2007	0	0	1	1	█
abr-2007	0	1	0	0	█
may-2007	1	1	1	1	█
jun-2007	1	0	1	1	█
jul-2007	1	0	0	0	█
ago-2007	1	1	1	1	█
sep-2007	1	1	1	1	█
oct-2007	1	1	1	1	█
nov-2007	1	1	1	1	█
dic-2007	1	1	0	1	█
ene-2008	1	1	1	0	█
feb-2008	1	1	1	1	█

mar-2008	1	1	1	1	█
abr-2008	1	1	1	1	█
may-2008	1	1	1	1	█
jun-2008	0	0	1	1	█
jul-2008	1	1	0	0	█
ago-2008	0	0	0	0	█
sep-2008	1	1	1	1	█
oct-2008	1	1	1	1	█
nov-2008	1	1	1	1	█
dic-2008	1	1	0	0	█
ene-2009	1	1	1	1	█
feb-2009	1	1	1	1	█
mar-2009	1	1	1	1	█
abr-2009	1	1	1	1	█
may-2009	1	1	1	1	█
jun-2009	1	1	1	1	█
jul-2009	1	0	1	1	█
ago-2009	1	1	1	1	█
sep-2009	1	1	0	0	█
oct-2009	1	1	1	1	█
nov-2009	1	1	1	1	█
dic-2009	1	1	1	0	█
ene-2010	1	1	1	1	█
feb-2010	0	0	0	0	█
mar-2010	1	1	1	1	█
abr-2010	1	1	1	1	█
may-2010	1	1	1	1	█
jun-2010	1	1	1	1	█
jul-2010	0	0	0	0	█
ago-2010	0	0	1	0	█
sep-2010	1	0	1	1	█
oct-2010	1	1	1	1	█
nov-2010	1	1	1	1	█

dic-2010	1	1	1	1	█
ene-2011	1	1	1	1	█
feb-2011	1	1	1	1	█
mar-2011	1	1	1	1	█
abr-2011	1	1	1	1	█
may-2011	1	1	1	1	█
jun-2011	1	1	1	1	█
jul-2011	1	1	1	1	█
ago-2011	1	1	1	1	█
sep-2011	1	1	1	1	█
oct-2011	1	1	1	1	█
nov-2011	1	1	1	1	█
dic-2011	1	1	1	1	█
ene-2012	1	1	1	1	█
feb-2012	0	1	1	1	█
mar-2012	1	1	1	1	█
abr-2012	1	1	1	1	█
may-2012	1	1	1	1	█
jun-2012	1	1	1	0	█
jul-2012	1	1	0	0	█
ago-2012	1	0	1	1	█
sep-2012	0	0	1	1	█
oct-2012	1	1	1	1	█
nov-2012	1	1	1	1	█
dic-2012	1	1	1	1	█
ene-2013	1	1	1	1	█
feb-2013	1	1	1	1	█
mar-2013	1	1	0	0	█
abr-2013	1	1	1	1	█
may-2013	1	1	0	1	█
jun-2013	1	1	1	1	█
jul-2013	1	1	0	1	█
ago-2013	1	0	1	1	█

sep-2013	0	0	1	1	Red
oct-2013	1	1	1	0	Red
nov-2013	1	1	1	1	Green
dic-2013	1	1	1	1	Green
ene-2014	1	1	1	1	Green
feb-2014	1	1	1	1	Green
mar-2014	1	1	1	1	Green
abr-2014	1	1	1	1	Green
may-2014	1	1	1	1	Green
jun-2014	1	1	1	1	Green
jul-2014	0	0	1	1	Red
ago-2014	1	1	1	1	Green
sep-2014	1	1	1	1	Green
oct-2014	0	1	1	1	Red
nov-2014	1	1	1	1	Green
dic-2014	1	1	1	1	Green
ene-2015	1	1	1	1	Green
feb-2015	1	1	0	0	Red
mar-2015	1	1	1	1	Green
abr-2015	1	1	1	1	Green
may-2015	1	1	1	1	Green
jun-2015	1	1	1	1	Green
jul-2015	1	1	1	1	Green
ago-2015	1	1	1	1	Green
sep-2015	1	1	1	1	Green
oct-2015	1	1	1	1	Green
nov-2015	1	1	1	1	Green
dic-2015	1	1	1	1	Green

Tabla 3.- Imágenes Satelitales Disponibles (Landsat 7)

Una vez observando que tanto para el Landsat 7 y 8 se encuentran meses vacíos o meses incompletos en este primer vistazo y conociendo que libra solo

contiene datos del satélite Landsat 8 procedemos de igual forma a buscar mes a mes, pero ahora del periodo del 2015 al 2018 solamente con el fin de llenar los vacíos restantes para ampliar nuestra base de datos con lo que nos queda completa como se muestra en la tabla 4.

	2846	2847	2946	2947		Landsat 8
ene-2016	1	1	1	1		
feb-2016	1	1	1	1		
mar-2016	1	1	1	1		
abr-2016	1	1	1	1		
may-2016	1	1	1	1		
jun-2016	1	1	1	1		
jul-2016	1	1	1	1		
ago-2016	1	1	1	1		
sep-2016	1	1	1	1		
oct-2016	1	1	1	1		
nov-2016	1	1	1	1		
dic-2016	1	1	1	1		
ene-2017	1	1	1	1		
feb-2017	1	1	1	1		
mar-2017	1	1	1	1		
abr-2017	1	1	1	1		
may-2017	1	1	1	1		
jun-2017	1	1	1	1		
jul-2017	1	1	1	1		
ago-2017	1	1	1	0		
sep-2017	1	1	1	1		
oct-2017	1	1	1	1		
nov-2017	1	1	1	1		
dic-2017	1	1	1	1		

ene-2018	1	1	1	1	
feb-2018	1	1	1	1	
mar-2018	1	1	1	1	
abr-2018	1	1	1	1	
may-2018	1	1	1	1	
jun-2018	1	1	1	1	
jul-2018	1	1	1	1	
ago-2018	1	1	1	1	
sep-2018	1	1	1	1	
oct-2018	1	1	1	1	
nov-2018	1	1	1	1	
dic-2018	1	1	1	1	

Tabla 4.- Imágenes Satelitales Disponibles (Landsat 8)



Figura 5.- Selección de la Zona de Estudio en Libra (ruta 2846)

3.2.2. Corrección de la Información

En algunos periodos de tiempo se encontraron una serie de errores en las imágenes que en general pueden presentarse desde el lansad 7 en el periodo del 2008, estas correcciones a dichos errores pueden ser de 3 clases:

1. **Radiométricas:** Son las que pueden afectar el valor del píxel debido a fallos en los sensores (nubosidad, aerosoles, etc.).
2. **Atmosféricas:** Son generados por la dispersión y/o absorción de la atmosfera.
3. **Geométricas:** Causados por movimientos bruscos en los sensores o en el satélite que impiden su buena lectura.

3.2.2.1. Radiométricos

Para esto se generaron operaciones utilizadas con la herramienta Semi Automatic Classification Plugin perteneciente al programa Qgis.

Dicho ajuste o calibración de los valores de los píxeles se realizaron con la pestaña de Preprocessing donde se realizó una reducción de las inconsistencias, compensando el mal funcionamiento del sensor y los efectos introducidos por el ángulo de toma y para los efectos atmosféricos se activó la opción de Apply DSO1 Atmospheric Correction.

Donde cabe destacar que, de igual manera para evitar posibles errores futuros, se realizó también ajustes en pixeles con valores de cero por lo que también se dio clic en esa opción de saltar esos valores posteriormente se realizó este procedimiento para cada grupo de bandas correspondiente a cada periodo de tiempo.

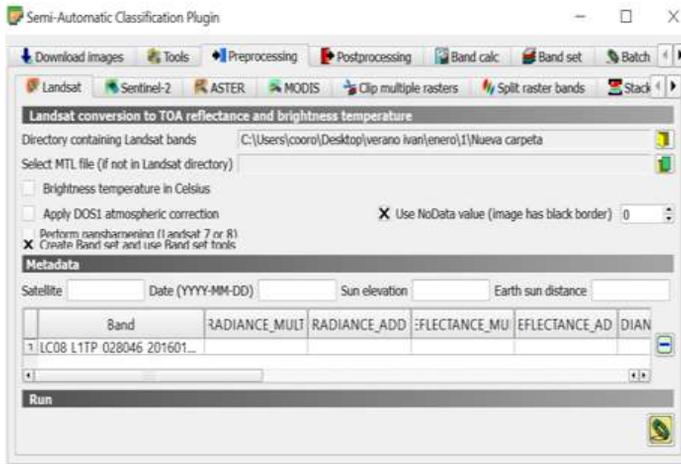


Figura 6.- Corrección Radiométrica

3.2.2.2. Atmosféricas

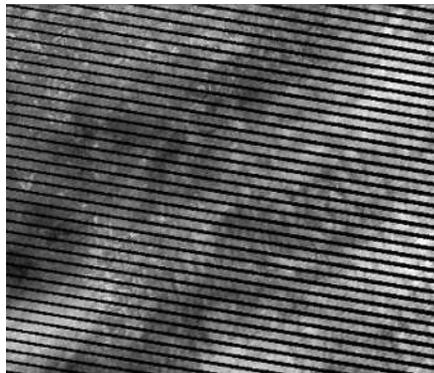


Figura 7.- Error Atmosférico (septiembre 2018)

Como se observa en la Figura 7, esta clase de errores son debidos a un mal funcionamiento de los datos del satélite por lo cual nos arroja valores de vacíos en sitios donde no deberían de estar y también debido a una falla al tomar la información por lo tanto la opción más lógica fue la de interpolar los valores vecinos con el afán de encontrar el fenómeno de autocorrelación.

Para iniciar con esta clase de corrección se procedió a combinar todas las bandas con el fin de obtener el color natural de la zona, este se realizó en el mismo programa Qgis con la herramienta combinar.

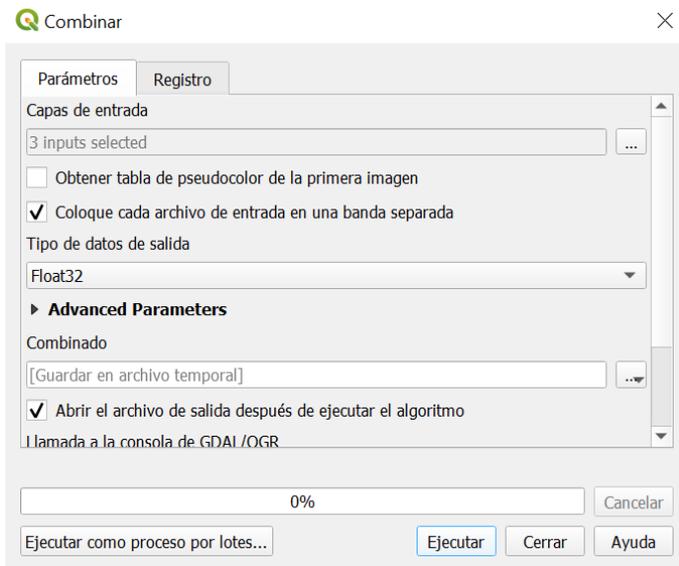


Figura 8.- Herramienta Combinar



Figura 9.- Obtención del Color Natural (septiembre 2018)

Una vez obteniendo esa imagen combinada se procedió a hacer el llenado de los respectivos vacíos con la herramienta rellenar sin datos para cada banda con los cuales se empieza a interpolar creando nuevas bandas ya corregidas y que después combinaremos nuevamente como se muestra en la figura 10.

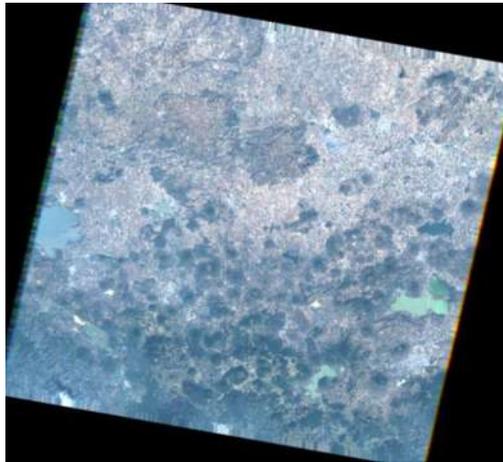


Figura 10.- Corrección Atmosférica

Ahora con la finalidad de hacer uso de ellas las procesamos para quitar ese borde negro alrededor de cada imagen, por lo que finalizamos entrando a propiedades y procedemos a eliminar los valores de 0 por lo cual nos genera una imagen más nítida y con información más apreciable como se muestra en la figura 11.



Figura 11.- Corrección Atmosférica Nítida (septiembre 2018)

3.2.3. Extracción de la Zona de Estudio

Para el siguiente apartado fue necesario preparar las escenas que conformaban la zona de estudio, ya que esta quedaba dentro de las 4 ya mencionadas en el apartado 3.2.1 y el resultado de esto fue la realización de un mosaico para cada mes correspondiente únicamente a las bandas 3 y 4.

Para esto fue necesario el Software conocido como ArcGIS, donde la creación de dichos mosaicos es el

proceso por el cual se fusionan varios modelos de elevación (MDE) o imágenes satelitales con el fin de integrarlo en uno solo.

Así mismo para poder llevarlo a cabo ay que verificar primero que los datos de entrada en este caso las 4 imágenes satelitales comprendidas de los diferentes periodos tengan la misma cantidad de bandas o canales y a su vez también ay que verificar que estén todas georreferenciadas y rectificadas en un mismo tipo de proyección.

Una vez verificadas tenemos que utilizar la herramienta Mosaic to new ráster que podemos encontrar en la galería de arctoolbox en el programa ArcGIS, donde el primer paso de esta es cargar las 4 imágenes, seleccionar su ruta de guardado y su respectivo espacio de georreferencia.

En esa misma pestaña también ay que tener cuidado al teclear el número de bandas de salida ya que estas deben ser iguales a las de las imágenes anteriores, también ay que colocar el tipo de píxel y su respectiva extensión ya que esta es importante para evitar que nos genere imágenes de menor calidad de las que se necesitan, está la podemos obtener fácilmente de las propiedades de la imagen dándoles clic izquierdo y en la pestaña de general.

Ya para finalizar se modifica la última opción para que me tome el resultado como un valor promedio de las 4 ya que estas están encimadas como se muestran a continuación en la figura 12.

Una vez obteniendo cada mosaico se observó que el número de estaciones dentro de la cuenca era muy

poco, por lo que se optó por generar un buffer de la cuenca para incorporar un número mayor de estaciones para el siguiente apartado, este se realizó con una distancia de 5km.

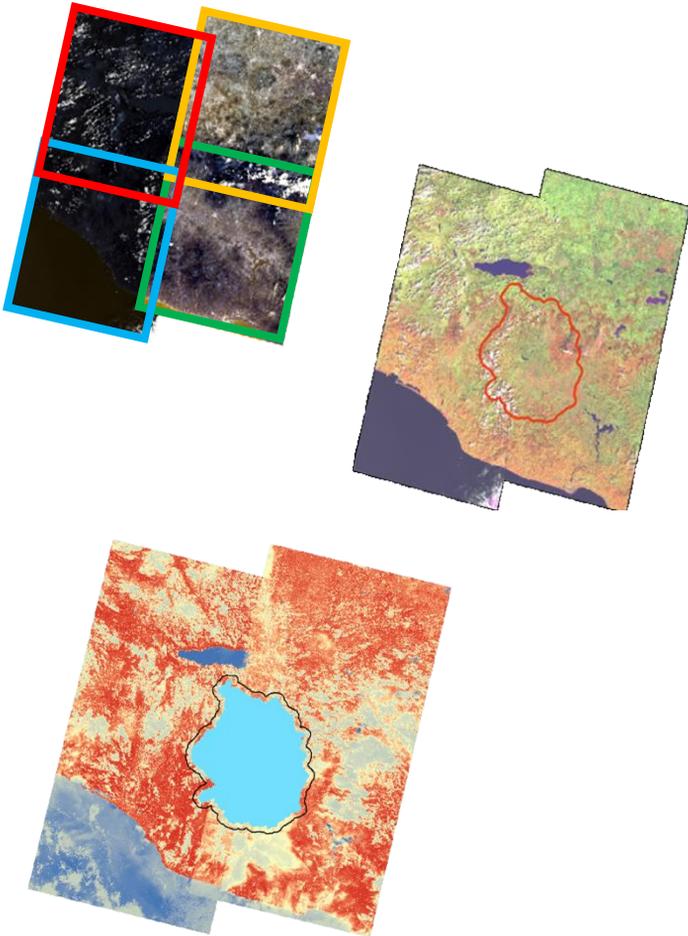


Figura 12.- Generación de Mosaicos (septiembre 2018)

3.2.4. Determinación del NDVI

Una vez obteniendo los mosaicos para cada mes se procede a calcular la siguiente expresión:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

NIR es luz infrarroja cercana

Red es luz roja visible.

Para esto ay que tomar en cuenta que estamos desarrollando este proyecto con 2 tipos de satélites diferentes y semejantes entre sí, por lo que en el apartado 3.1.5 establece el cambio de bandas donde el lansad 7 es la banda 3 y banda 4 y para el 8 serán la banda 5 y banda 4.

Para esto ay que continuar con el programa de ArcGIS ingresando al Arctoolbox en la pestaña de Spatial Analyst Tools en la herramienta Ráster Calculator.

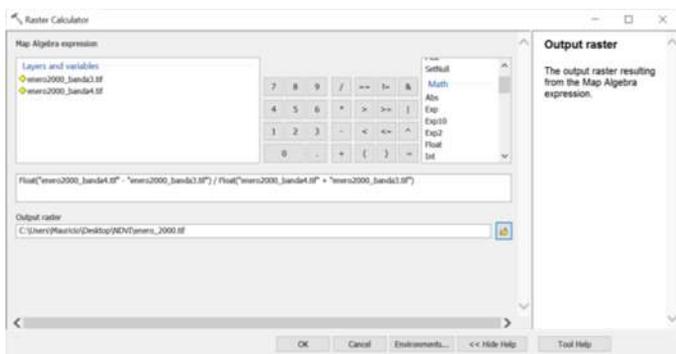


Figura 13.- Calculo del NDVI (enero 2000)

Una vez ingresando a la herramienta procedemos a generar la ecuación como se muestra en la figura 13 y para finalizar elegimos una carpeta de salida y ajustamos los

rangos de clasificación de la imagen resultante para observar el comportamiento del NDVI.

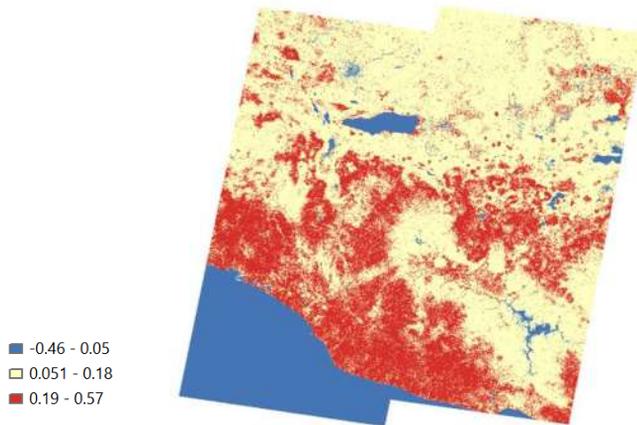


Figura 14.- NDVI (enero 2000)

Como podemos observar en los resultados del cálculo del NDVI varían de -1 a 1 donde algunas de las reglas establecen que:

- Los valores negativos corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras artificiales, rocas y nubes.
- El suelo desnudo o de alguna población cercana generalmente cae dentro del rango de 0.1 a 0.2
- las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0.2 y 1.
- El dosel de vegetación sano y denso debería estar por encima de 0.5, y la vegetación dispersa probablemente caerá dentro de 0.2 a 0.5.

Sin embargo, cabe mencionar que esto es solo una regla general y siempre debe tener en cuenta la temporada, el tipo de planta y las peculiaridades regionales para saber

exactamente qué significan los valores de NDVI como lo observaremos en el siguiente apartado.

3.2.5. Interpretación de los Resultados

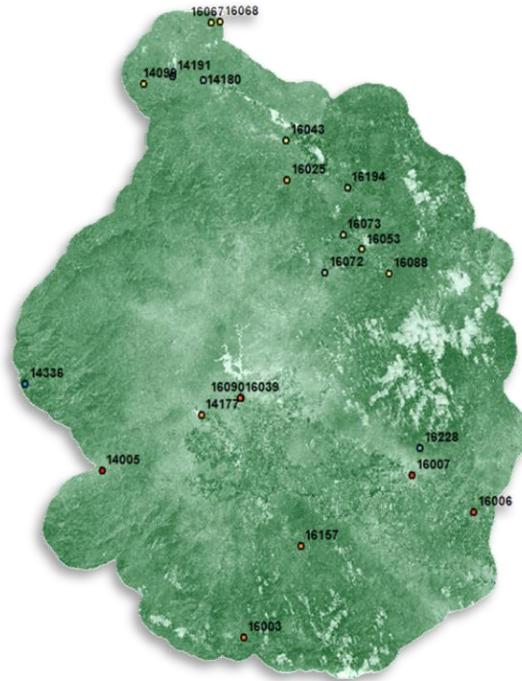


Figura 15.- Extracción del NDVI (septiembre 2018)

Una vez determinando el NDVI para cada uno de los meses realizaremos una pequeña calibración de las imágenes con el fin de conocer el comportamiento de estas para ello tomaremos el año del 2018, donde tomaremos una serie de estaciones climatológicas de la zona al azar tratando de ocupar la mayor área posible.

Para esto haremos un recorte de la zona de estudio y junto con las estaciones extraeremos los datos

correspondientes a cada estación como se muestra en la tabla 6.

Estación	Enero	Marzo	Mayo	Julio	Sept	Nov
16003	0.21	0.15	0.16	0.37	0.33	0.30
16157	0.14	0.12	0.12	0.39	0.36	0.32
16006	0.21	0.16	0.17	0.21	0.21	0.20
16007	0.13	0.04	0.13	0.03	0.04	0.05
16228	0.27	0.25	0.19	0.50	0.47	0.45
14177	0.21	0.21	0.19	0.33	0.27	0.21
16090	0.14	0.12	0.12	0.18	0.16	0.15
16039	0.14	0.11	0.12	0.18	0.16	0.15
16072	0.31	0.28	0.21	0.26	0.32	0.38
16088	0.06	0.07	0.14	0.13	0.12	0.11
16053	0.12	0.21	0.15	0.35	0.24	0.14
16073	0.13	0.11	0.12	0.41	0.29	0.16
16194	0.26	0.20	0.23	0.35	0.28	0.20
16025	0.32	0.32	0.41	0.26	0.28	0.30
16043	0.15	0.27	0.21	0.47	0.35	0.24
14099	0.05	0.06	0.08	0.10	0.08	0.07
14180	0.09	0.09	0.11	0.13	0.12	0.12
14191	0.19	0.19	0.16	0.39	0.32	0.25
16067	0.05	0.18	0.19	0.30	0.28	0.27
16068	0.11	0.08	0.14	0.13	0.19	0.25

Tabla 5.- Concentrado de NDVI (2018)

Como podemos observar la estación marcada con naranja pertenece al municipio de Apatzingán por lo cual nos da valores relativamente bajos ya que se encuentra dentro de la población, mientras que los valores entre 0.1 y 0.4 son pertenecientes a áreas de riego en este caso a las estaciones marcadas con verde y amarillo las cuales son del distrito de riego en las cuales también podemos observar la elevación de algunos meses esto es debido a que ay producción de algún alimento rico en la zona por lo cual

aumenta su índice de vegetación y por ultimo logramos identificar los cuerpos de vegetación densa un ejemplo de esta es la estación que está marcada con el color rojo la cual muy elevados a comparación de las demás zonas.

Otra de las cosas que pudimos observar en la calibración es la delimitación completa del distrito de riego de la zona de estudio esto se realizó al revisar un mes seco contra uno húmedo en donde también se puede observar el aumento mes a mes de la vegetación y el crecimiento de este.

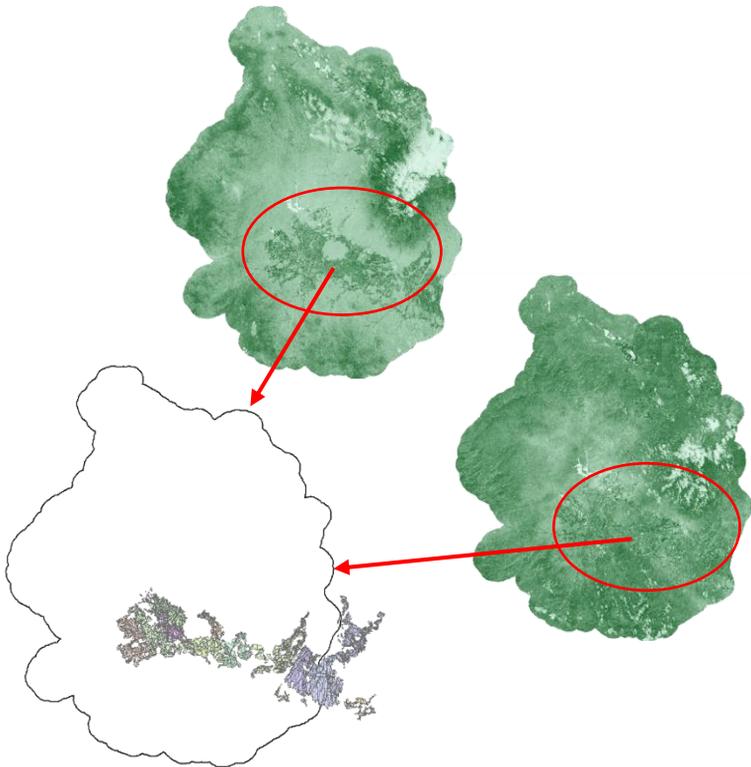


Figura 16.- Delimitación del Distrito de Riego (marzo - septiembre 2018)

Una vez calculado el NDVI se procede a hacer un análisis de las estaciones las cuales son herramientas fundamentales para el monitoreo, almacenamiento y registro de una serie de datos como lo son la temperatura, humedad del aire, radiación solar, precipitación, infiltración, etc.

Donde para el presente analisis solo se tomo en cuenta la variable correspondiente a la temperatura las cuales se utilizarán despúes para el analisis estadistico.

Para el inicio de este apartado se comenzó con la obtención de estos datos, para ello fue necesario entrar a la página oficial del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), En donde se descargó el formato .KMZ que contiene todas las estaciones climatológicas del país, una vez realizado esto, se procedió a ingresar al programa ArcGIS donde se realizó un recorte de las estaciones climatológicas de la zona de estudio como se muestra en el siguiente mapa.

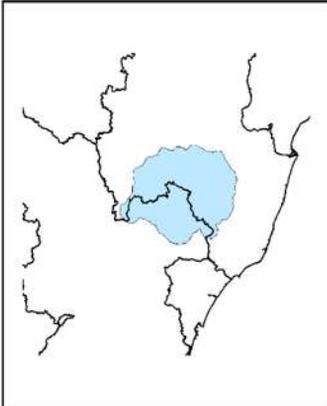
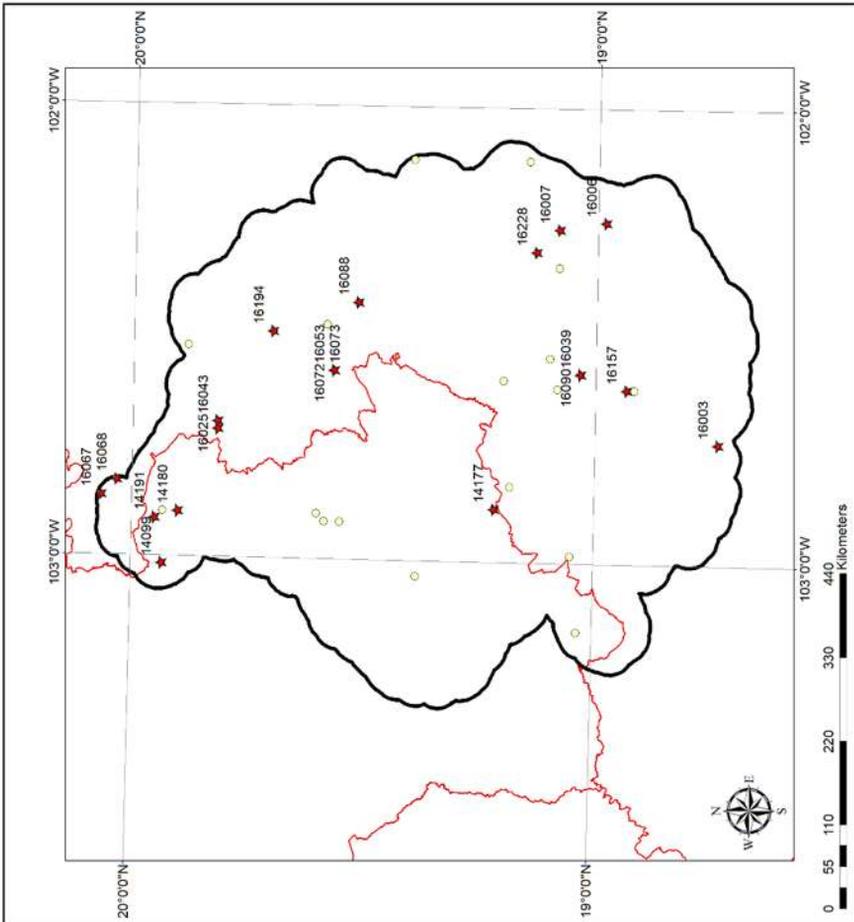
Ya con este Recorte pudimos observar que cerca del 76 % de las estaciones corresponden al estado de Michoacán mientras que el restante 24% corresponde al estado de jalisco dando un total de 38 estaciones pertenecientes al área en cuestión dando un resultado de 29 estaciones y 9 estaciones respectivamente para cada estado como se muestra a continuación.

No.	ESTACION	NOMBRE	SITIO
1	16067	LA RAYA, SAHUAYO	Mich.
2	16068	LAS FUENTES, SAHUAYO	Mich.
3	14160	VALLE DE JUAREZ (DGE)	Jal.
4	14191	VALLE DE JUAREZ (SMN)	Jal.
5	14099	MAZAMITLA, MAZAMITLA	Jal.
6	14119	QUITUPAN, QUITUPAN (CFE)	Jal.
7	14180	QUITUPAN, QUITUPAN (DGE)	Jal.

8	16106	SAN ANGEL, TINGUINDIN	Mich.
9	16025	COTIJA, COTIJA	Mich.
10	16043	EL PUERTO, COTIJA	Mich.
11	16194	E.T.A. 39 TOCUMBO, (SMN)	Mich.
12	14120	RANCHO EL CUISICHE, ZAP.	Jal.
13	14095	MANUEL M. DIEGUEZ (CFE)	Jal.
14	16077	LOS REYES, LOS REYES	Mich.
15	16073	LOS LIMONES, LOS REYES	Mich.
16	16072	LOS CHORROS DEL VARAL,	Mich.
17	16053	INGENIO SAN SEBASTIAN,	Mich.
18	16088	PERIBAN, PERIBAN	Mich.
19	16259	TZINDIO, SAN JUAN NUEVO	Mich.
20	14348	JILOTLAN, JILOTLAN	Jal.
21	14177	LOS OLIVOS, JILOTLAN	Jal.
22	16216	BUENAVISTA, BUENAVISTA	Mich.
23	16128	TEPALCATEPEC,	Mich.
24	16085	PARACUARO, PARACUARO	Mich.
25	16228	ACAHUATO, APATZINGAN	Mich.
26	16011	BUENAVISTA, BUENAVISTA	Mich.
27	16101	PUNTA DE AGUA, BUENAVISTA	Mich.
28	16150	APATZINGAN, APATZINGAN	Mich.
29	16149	APATZINGAN, APATZINGAN	Mich.
30	16007	APATZINGAN, APATZINGAN	Mich.
31	16038	EL CARRIZO, TEPALCATEPEC	Mich.
32	16090	P. BLANCAS, BUENAVISTA	Mich.
33	16039	P. BLANCAS, BUENAVISTA	Mich.
34	16006	ANTUNEZ, PARACUARO	Mich.
35	16157	CHILA, AGUILILLA	Mich.
36	16158	EL CAJON, TEPALCATEPEC	Mich.
37	16037	EL CAJON, TEPACALTEPEC	Mich.
38	16003	AGUILILLA, AGUILILLA	Mich.

Tabla 6.- Listado de Estaciones Meteorológicas

ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO



Simbología

- ★ Estaciones en Operación
- Estaciones Fuera de Servicio
- ▭ Área de Estudio



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Civil

Estimación de Evapotranspiración Real y Potencial a Partir de Datos Meteorológicos y NDVI

Realizó: Mauricio Corona Avalos

Mapa 9.- Estaciones Climatológicas de la Zona de Estudio

3.2.6. Obtención de la Temperatura

Una vez conociendo el listado de estaciones procedemos a descargar la información, para esto debemos ingresar a la página de clicom con el motivo de descargar cada una de las estaciones colocando la variable de temperatura promedio.

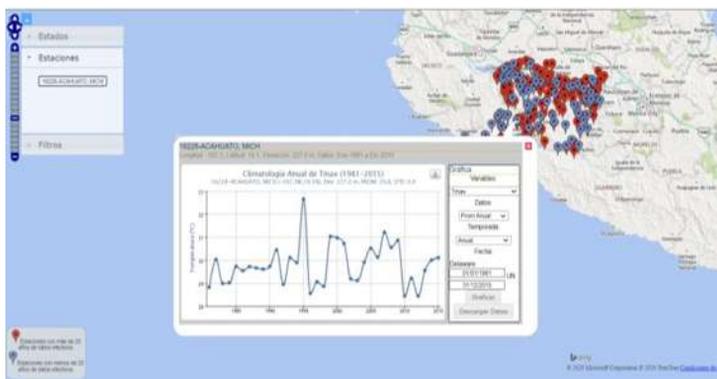


Figura 17.- Obtención de la Temperatura

Ya con esta información que determinamos mes a mes pudimos generar una serie de tablas del promedio anual que nos permiten observar la falta de años en todo el registro histórico a lo cual definiremos a partir de ahora como vacíos en el sistema.

Estos vacíos equivalen al 51.17% de toda la información como se muestra en las tablas por lo que es notorio el desabasto de información de las estaciones.

	16259	16228	16216	16194	16158	16157	16149	16128
1981		22.83	27.15	14.14	26.66	26.91	27.07	28.76
1982	15.68	23.66	28.15	15.71	27.63	27.86	27.96	29.93
1983	16.59	22.78	26.97	16.58	26.31	26.84	26.82	28.54
1984	17.38	22.71	26.87	14.83	26.27	26.66	27.50	
1985	17.53	23.14	26.95	11.93	28.35	26.48	27.42	
1986		22.97	26.64	15.01				
1987		23.31	26.97	17.26	29.21			
1988		23.17	26.72	18.88				
1989		23.00	27.98	17.23				
1990		23.28	28.80	17.04				
1991		23.39		13.48				
1992		22.51		16.46				
1993		23.15		17.04				
1994		23.26		19.61				
1995		24.91		12.64				
1996		22.91		14.60				
1997		23.48	22.70	12.89	26.71			
1998		23.52	26.09	13.16				
1999		24.34	25.84	14.45				
2000		23.56		13.54				
2001		22.44		13.92				
2002		22.77		14.39				
2003		22.58						
2004		22.74			28.51			
2005		23.19			29.34			
2006		22.86			29.06			
2007		23.15			29.21			
2008		22.39			28.51			
2009		22.49			29.74			
2010		20.80			28.34			
2011		21.28			29.03			
2012		20.71			28.86			
2013		22.00			28.84			
2014		24.36			28.92			
2015		24.93			29.33			

	16106	16101	16090	16088	16085	16077	16073	16072
1981	16.29	27.51	27.71	19.29	25.65	21.30	20.82	23.98
1982	17.13	28.62	29.49	19.91	26.33	21.79	21.30	24.66
1983	16.70	27.10	28.04	18.96	25.43	21.13	20.10	23.34
1984	16.45	27.65	28.17	19.06	25.30	21.48	20.37	23.27
1985	16.40	27.55	28.76	19.37	25.73	21.67	20.64	23.69
1986	16.32		28.65	19.65	25.80	21.74	20.70	23.95
1987	16.71		28.97	19.83	26.21	21.88	21.00	24.38
1988	16.80		28.52	20.60	26.20		21.38	24.60
1989	16.67		28.48	20.23	26.71		20.93	24.15
1990	16.87		28.78	19.89	22.95		20.59	23.81
1991	19.13		28.68	20.53			21.14	24.34
1992			27.74	19.46	25.70		20.35	23.52
1993			28.55	18.97			21.02	22.45
1994			29.42	19.09			21.54	23.98
1995			28.16	18.99			21.30	
1996			28.17	19.90	26.91		20.72	
1997			28.67	19.69			21.09	
1998			28.53	19.75	27.37		17.15	
1999			28.31		27.51			
2000			28.30		25.25			
2001			28.45		25.95			
2002			28.15					
2003								
2004					25.62			
2005					25.30			
2006					25.00			
2007					24.74			
2008					24.92			
2009					25.55			
2010					23.95			
2011					24.59			
2012					24.30			
2013					24.42			
2014					24.63			
2015					25.18			

	16068	16067	16043	16039	16038	16025	16007	16006
1981	16.01	14.82	16.87	27.71	24.71	14.84	27.09	25.62
1982	15.93	15.16	19.49	28.56	25.82	14.70	27.97	26.66
1983	16.15	14.72	18.00	28.03	24.54	16.28	26.89	25.00
1984	15.82	15.15	18.54	28.08	26.14	24.34	26.98	25.45
1985	15.72	15.72	18.52	28.74	26.37	21.04	27.41	25.95
1986	15.05	15.32	18.67	28.66			27.29	25.88
1987	14.37	13.60	18.84	28.98			27.65	26.59
1988	18.21	16.32	19.26	28.50			27.46	26.95
1989	16.85	16.14	19.04	28.49			27.42	26.47
1990			19.10	28.88			27.59	27.40
1991			19.13	28.69			27.85	26.92
1992			18.37	27.73			26.69	26.81
1993			18.95	28.57			27.79	27.47
1994			18.87	29.42			28.53	28.10
1995			19.01	28.25			28.29	27.13
1996			18.94	28.22			27.29	27.08
1997	12.36		19.23	28.75			27.92	27.94
1998	11.18		19.46	28.52			27.68	27.72
1999			19.08	28.31			27.19	27.70
2000	20.76	15.51	18.96	28.26			26.63	27.26
2001	14.08	16.47		28.43			27.45	25.02
2002	15.75		19.24	28.30			26.98	27.06
2003	15.88		19.16	28.20			26.72	27.99
2004	16.89		18.81	28.38			26.52	27.69
2005	15.51		19.39	29.42			26.78	27.55
2006	17.70		19.25	29.16			26.87	27.23
2007	16.17		19.17	28.97			27.02	27.36
2008	19.43			28.62			26.54	27.05
2009	17.83			28.64			27.12	27.45
2010	19.57		18.69	27.48			26.21	26.34
2011	18.71		19.39	28.25			26.90	27.05
2012	20.42		19.08	27.95			26.94	26.83
2013	18.46			27.90			26.90	26.90
2014	19.26			27.93			27.02	27.12
2015	16.55			28.28			27.44	27.53

	16003	14348	14191	14180	14177	14160	14119	14099
1981	22.99	25.05	18.15	20.15	27.27		20.15	16.10
1982	22.51	25.61	18.58	20.36	28.17		20.36	16.62
1983		24.20	18.54	19.67	26.95		21.02	15.57
1984		25.31	18.96	19.92	27.12		20.61	15.48
1985		24.90	19.41	20.32	27.74	18.78	20.22	15.93
1986		24.76	19.86	20.32	27.96	16.67	20.31	16.43
1987		25.13	18.42	20.60		17.79	20.66	16.36
1988		25.12	19.52	18.45		20.28	16.66	16.71
1989		25.07	20.25	18.50				16.08
1990								16.12
1991		24.88		23.22				15.73
1992		24.61		22.56		15.93		15.36
1993		24.36		20.33		16.62		16.32
1994		24.99		21.27		17.21		16.73
1995		25.07		20.25	27.25	17.65		17.02
1996		24.60		20.14	26.28	17.05		16.52
1997		24.76		19.74	26.54	16.68		16.44
1998		24.44		20.12	26.58	17.34		17.35
1999		24.50		20.44	26.79	16.29	20.44	17.48
2000		23.35		20.67		17.67	20.84	
2001		16.37		20.32		16.63	20.32	
2002		14.55		20.67		21.39	20.67	
2003		14.71		20.50		17.21	20.50	
2004		14.37		19.54		17.53	19.54	
2005		13.80		20.68		17.67	20.82	
2006		15.00		20.22			19.64	
2007		14.06		20.05		17.87		
2008		13.51		19.62				
2009		16.61		20.09				
2010				19.50		18.30	15.30	
2011						18.45		
2012				19.97		18.39		
2013				20.13		17.46		15.61
2014			19.45	19.70		15.24		15.83
2015	22.68							

Tabla 7.- Promedio Anual

Para evitar esto fue necesario generar un relleno de datos de toda la información descargada de cada estación mes a mes por lo cual iniciamos generando una tabla de estadísticos de toda la información que posteriormente compararemos.

	Media	Mediana	Sesgo	Desv. Est.
16259	16.94	17.59	-1.11	1.71
16228	22.99	22.83	-0.09	2.04
16216	27.04	26.94	-0.23	1.95
16194	15.24	17.32	-1.52	6.61
16158	28.36	28.43	-0.14	2.18
16157	26.99	26.71	0.31	1.95
16149	27.33	27.23	0.03	2.17
16128	29.07	28.85	-0.05	2.14
16106	16.82	17.35	-0.37	2.32
16101	27.70	27.66	0.02	2.13
16090	28.49	28.38	-0.14	1.72
16088	19.61	19.52	0.01	1.73
16085	25.37	25.55	-0.17	1.87
16077	21.50	21.81	-0.28	2.04
16073	20.86	21.02	-0.31	1.86
16072	23.96	23.61	0.39	1.87
16068	16.89	17.30	-0.32	3.51
16067	15.28	15.92	-0.23	2.24
16043	18.92	19.56	-0.43	2.44
16039	28.44	28.42	-1.12	1.80
16038	25.44	25.20	-0.20	2.26
16025	17.21	15.83	0.77	3.89
16007	27.23	27.35	-0.17	1.96
16006	26.96	26.75	0.26	2.30
16003	22.78	22.81	0.20	1.65
14348	21.41	23.54	-0.94	5.50
14191	19.06	19.23	-0.57	2.14
14180	20.32	20.77	-0.48	2.60
14177	27.14	26.98	-0.08	1.94
14160	17.49	17.81	-0.36	2.37
14119	20.37	20.98	-0.57	2.44
14099	16.28	16.21	-0.02	2.08
14095	24.28	24.67	-0.28	2.05

Tabla 8.- Estadísticos

Una vez obtenida esta tabla se generó un promedio mensual de cada estación con el propósito de rellenar los vacíos de la tabla 7

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
16259	15.33	14.88	16.29	17.27	18.43	18.30
16228	20.98	22.02	23.84	25.45	25.76	24.30
16216	24.96	25.63	27.14	28.90	29.32	28.60
16194	15.00	15.26	12.42	18.02	19.61	15.38
16158	25.78	26.73	28.46	30.66	31.35	30.40
16157	24.03	25.35	27.57	29.32	29.71	29.09
16149	24.13	25.39	27.93	30.01	30.74	29.81
16128	25.74	27.60	28.99	31.58	31.90	32.09
16106	12.94	14.28	16.42	18.39	19.43	19.29
16101	24.36	25.66	27.65	30.11	30.45	30.09
16090	25.98	27.35	28.98	30.46	31.13	29.96
16088	17.29	18.08	19.78	21.51	21.96	20.82
16085	22.85	23.88	25.24	27.10	27.76	27.00
16077	18.21	19.10	20.98	23.48	24.30	23.64
16073	17.98	19.00	20.62	22.63	23.57	22.88
16072	21.70	22.76	24.54	26.70	27.11	25.73
16068	13.13	14.55	16.88	18.90	19.99	19.29
16067	12.43	13.21	15.26	17.19	18.23	17.94
16043	15.08	16.25	18.47	20.83	22.00	21.63
16039	25.84	27.20	28.72	30.32	30.89	30.00
16038	22.01	23.83	26.26	28.33	28.28	27.66
16025	16.77	17.45	17.90	19.08	20.41	16.76
16007	24.35	25.58	27.46	29.38	29.99	29.01
16006	24.10	25.10	27.60	29.80	30.12	28.89
16003	20.37	21.29	22.71	24.19	24.62	23.83
14348	17.35	18.09	20.03	21.88	23.77	24.42
14191	15.17	16.96	19.00	20.78	21.44	20.58
14180	16.36	17.92	20.03	22.28	23.27	22.94
14177	24.13	25.54	27.28	29.15	29.72	29.26
14160	14.36	15.88	17.57	19.63	20.12	19.27
14119	16.39	18.34	20.07	22.48	23.20	22.70
14099	13.35	14.58	16.75	18.71	19.02	18.01
14095	20.68	22.05	23.76	26.11	27.00	26.64

	Jul	Ago.	Sep.	Oct	Nov	Dic
16259	18.58	18.31	18.41	17.74	16.91	14.57
16228	22.96	22.73	22.37	22.17	21.63	21.22
16216	27.25	27.43	27.54	26.84	26.39	24.89
16194	15.84	15.17	15.88	11.61	12.96	15.68
16158	28.39	28.31	28.34	28.14	26.98	25.75
16157	26.87	26.75	27.05	26.95	26.00	24.56
16149	27.32	27.40	27.34	27.60	26.15	24.63
16128	28.84	29.18	29.30	29.15	28.01	26.52
16106	18.02	18.27	17.89	16.66	14.97	13.65
16101	27.77	27.86	28.24	28.00	26.61	24.78
16090	28.51	28.41	28.21	28.34	27.65	26.54
16088	19.93	20.00	19.59	19.30	18.56	17.85
16085	25.78	25.65	25.48	25.07	24.13	23.13
16077	22.10	22.13	22.19	21.75	20.25	19.21
16073	21.46	21.51	21.23	20.67	19.98	18.68
16072	23.71	23.68	23.42	23.33	22.93	22.08
16068	18.21	18.33	18.08	16.50	15.00	12.69
16067	16.33	16.27	15.49	14.67	13.54	12.43
16043	20.24	20.13	19.99	18.79	17.12	15.62
16039	28.63	28.63	28.36	28.32	27.56	26.41
16038	25.50	25.41	25.76	25.24	24.03	21.66
16025	16.71	15.06	15.65	16.01	16.16	16.41
16007	27.72	27.58	27.42	27.09	25.99	24.61
16006	27.61	27.22	26.51	26.27	25.35	24.34
16003	22.21	22.85	21.85	22.63	22.84	19.91
14348	23.15	22.80	23.02	21.87	19.64	19.33
14191	19.39	19.56	19.71	18.78	17.79	15.69
14180	21.94	21.74	21.37	20.17	18.27	16.86
14177	27.53	27.34	27.23	26.90	26.06	24.87
14160	18.09	18.66	18.24	16.90	15.45	14.59
14119	21.63	21.64	21.44	20.22	18.30	16.55
14099	16.59	16.66	16.31	15.75	15.02	13.95
14095	24.98	24.81	24.76	24.13	22.96	21.47

Tabla 9.- Promedio Mensual

Ya con el relleno de esta información se volvió a generar los estadísticos con el propósito de analizar el cambio entre ellas, pero al no haber un cambio grande se aceptó el relleno de datos con el promedio mensual.

	Media	Mediana	Sesgo	Desv. Est.
16259	17.08	17.73	-0.68	1.44
16228	22.95	22.78	-0.04	2.03
16216	27.07	27.14	-0.19	1.60
16194	15.23	15.84	-1.79	5.20
16158	28.27	28.33	0.04	1.97
16157	26.94	26.87	0.09	1.77
16149	27.37	27.34	0.07	2.02
16128	29.07	29.00	0.07	1.94
16106	16.68	17.30	-0.36	2.20
16101	27.63	27.77	-0.12	1.96
16090	28.46	28.36	-0.03	1.63
16088	19.56	19.59	0.08	1.55
16085	25.26	25.28	-0.05	1.75
16077	21.44	21.78	-0.22	1.88
16073	20.85	21.00	-0.21	1.75
16072	23.98	23.61	0.54	1.73
16068	16.80	17.23	-0.32	3.05
16067	15.25	15.49	-0.08	2.01
16043	18.85	19.53	-0.36	2.42
16039	28.41	28.40	-1.05	1.81
16038	25.33	25.41	-0.22	2.12
16025	17.03	16.71	1.27	1.86
16007	27.18	27.34	-0.13	1.97
16006	26.91	26.71	0.28	2.29
16003	22.44	22.63	-0.19	1.40
14348	21.28	22.67	-0.95	4.84
14191	18.74	19.00	-0.46	1.97
14180	20.26	20.75	-0.43	2.58
14177	27.08	27.23	-0.05	1.76
14160	17.40	17.75	-0.28	2.19
14119	20.25	20.86	-0.47	2.34
14099	16.23	16.30	0.03	1.94
14095	24.11	24.52	-0.22	1.96

Tabla 10.- Segundos Estadísticos

3.2.7. Obtención de la Evapotranspiración Potencial (ETp)

Para este apartado iniciamos definiendo la evapotranspiración potencial como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

Que de acuerdo con Thornthwaite él lo establecía como la cantidad de agua que puede ser evaporada, en caso de tener una fuente limitada de agua bajo las condiciones atmosféricas existentes todo esto de acuerdo con la condición de no considerar el potencial de transpiración de las diferentes plantas y formaciones vegetales.

Esto es representado con las fórmulas descritas en el apartado 3.1.7 de este documento con las cuales se generó una tabla de cálculo en la cual se implementó la tabla de temperaturas mensuales que determinamos en el apartado anterior con lo cual se pudo concretar el proceso de obtención en cm de dicha evapotranspiración para cada estación y finalmente calculamos el promedio anual de todo el conjunto de datos para saber su respectivo comportamiento.

Evapotranspiración 16256				
		ij	Ka	Uj
Ene	15.3	5.45	0.95	4.97
Feb	14.9	5.21	0.90	4.47
Mar	16.3	5.98	1.03	5.97
Abr	17.3	6.53	1.05	6.73
May	18.4	7.21	1.13	8.08
Jun	18.3	7.13	1.11	7.84
Jul	18.6	7.30	1.14	8.27
Ago.	18.3	7.14	1.11	7.85
...				

Tabla 11.- Cálculo de la Evapotranspiración Potencial

	16259	16228	16216	16194	16158	16157	16149	16128
1981	6.53	9.47	15.41	5.89	14.59	15.01	15.41	19.64
1982	6.43	10.39	17.71	6.98	16.70	17.16	17.47	23.67
1983	6.36	9.47	15.11	7.26	13.92	14.88	14.96	19.10
1984	6.55	9.18	14.27	6.39	13.62	13.95	16.50	20.58
1985	6.72	9.63	14.50	5.18	17.14	13.76	15.56	19.93
1986	6.41	9.30	13.80	6.30	17.43	14.51	15.49	19.93
1987	6.53	9.96	14.85	7.56	17.27	14.92	16.01	20.64
1988	6.53	9.58	13.86	8.26	17.92	14.92	16.01	20.64
1989	6.50	9.43	17.59	7.59	17.86	14.89	15.96	20.58
1990	6.41	9.55	18.81	7.43	17.43	14.51	15.49	19.93
1991	6.41	9.91	14.66	5.61	17.43	14.51	15.49	19.93
1992	6.53	9.09	15.03	7.11	17.92	14.92	16.01	20.64
1993	6.53	9.68	15.03	7.56	17.92	14.92	16.01	20.64
1994	6.50	10.01	14.98	7.88	17.86	14.89	15.96	20.58
1995	6.41	12.05	14.66	5.53	17.43	14.51	15.49	19.93
1996	6.41	9.42	14.66	6.23	17.43	14.51	15.49	19.93
1997	6.53	10.07	13.83	5.89	16.64	14.92	16.01	20.64
1998	6.53	10.20	13.45	5.82	17.92	14.92	16.01	20.64
1999	6.50	11.17	13.72	6.21	17.86	14.89	15.96	20.58
2000	6.41	10.01	14.66	5.61	17.43	14.51	15.49	19.93
2001	6.41	8.85	14.66	5.50	17.43	14.51	15.49	19.93
2002	6.53	9.52	15.03	5.64	17.92	14.92	16.01	20.64
2003	6.53	9.17	15.03	6.11	17.92	14.92	16.01	20.64
2004	6.50	9.36	14.98	6.11	18.31	14.89	15.96	20.58
2005	6.41	9.70	14.66	6.03	20.06	14.51	15.49	19.93
2006	6.41	9.37	14.66	6.03	19.21	14.51	15.49	19.93
2007	6.53	10.04	15.03	6.11	20.27	14.92	16.01	20.64
2008	6.53	9.11	15.03	6.11	17.97	14.92	16.01	20.64
2009	6.50	9.21	14.98	6.11	21.51	14.89	15.96	20.58
2010	6.41	7.39	14.66	6.03	17.73	14.51	15.49	19.93
2011	6.41	7.80	14.66	6.03	19.34	14.51	15.49	19.93
2012	6.53	7.50	15.03	6.11	18.87	14.92	16.01	20.64
2013	6.53	8.61	15.03	6.11	19.17	14.92	16.01	20.64
2014	6.50	11.13	14.98	6.11	19.46	14.89	15.96	20.58
2015	6.41	11.73	14.66	6.03	18.76	14.51	15.49	19.93

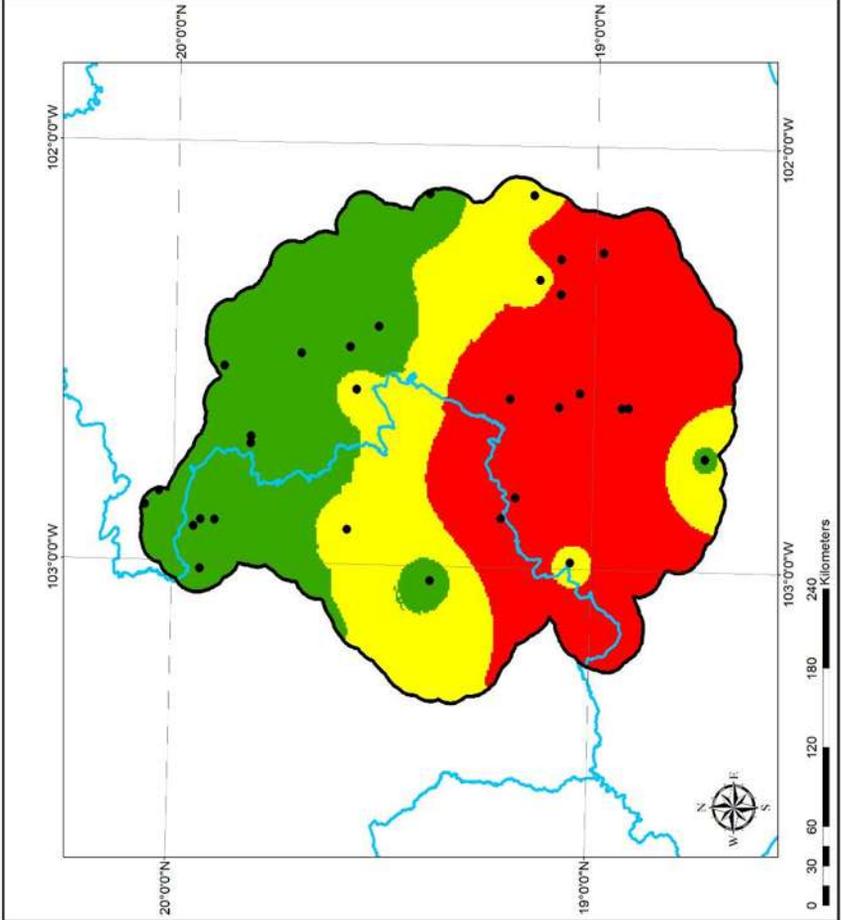
	16106	16101	16090	16088	16085	16077	16073	16072
1981	6.35	16.45	16.67	7.42	12.68	8.44	8.14	10.63
1982	6.90	19.38	21.63	7.80	13.83	8.96	8.61	11.55
1983	6.48	15.51	17.54	7.11	12.33	8.37	7.59	9.85
1984	6.24	15.84	17.27	7.04	11.70	8.37	7.57	9.56
1985	6.22	15.70	18.77	7.23	12.45	8.55	7.78	10.21
1986	6.18	16.01	18.43	7.31	12.58	8.40	7.84	10.32
1987	6.60	16.56	19.80	7.75	13.57	8.55	8.28	10.99
1988	6.51	16.56	17.97	8.17	13.08	8.57	8.23	10.74
1989	6.40	16.49	18.44	7.98	14.02	8.54	8.12	10.77
1990	6.52	16.01	18.86	7.62	11.67	8.34	8.10	10.66
1991	7.33	16.01	18.55	8.15	11.66	8.34	8.21	10.82
1992	6.59	16.56	17.15	7.40	11.97	8.57	7.71	9.92
1993	6.59	16.56	18.53	7.06	11.97	8.57	8.27	10.62
1994	6.55	16.49	20.26	7.13	11.92	8.54	8.73	10.67
1995	6.40	16.01	18.28	6.94	11.66	8.34	8.35	10.32
1996	6.40	16.01	16.88	7.50	12.00	8.34	7.70	10.32
1997	6.59	16.56	19.14	7.58	11.97	8.57	8.43	10.56
1998	6.59	16.56	18.68	7.50	12.59	8.57	8.10	10.56
1999	6.55	16.49	18.01	7.49	12.01	8.54	8.12	10.56
2000	6.40	16.01	17.08	7.36	11.13	8.34	7.95	10.32
2001	6.40	16.01	17.85	7.36	12.02	8.34	7.95	10.32
2002	6.59	16.56	18.17	7.50	11.97	8.57	8.15	10.56
2003	6.59	16.56	18.38	7.50	11.97	8.57	8.15	10.56
2004	6.55	16.49	18.35	7.49	12.26	8.54	8.12	10.56
2005	6.40	16.01	17.93	7.36	11.41	8.34	7.95	10.32
2006	6.40	16.01	17.93	7.36	11.23	8.34	7.95	10.32
2007	6.59	16.56	18.38	7.50	11.08	8.57	8.15	10.56
2008	6.59	16.56	18.38	7.50	11.47	8.57	8.15	10.56
2009	6.55	16.49	18.35	7.49	12.61	8.54	8.12	10.56
2010	6.40	16.01	17.93	7.36	9.82	8.34	7.95	10.32
2011	6.40	16.01	17.93	7.36	10.68	8.34	7.95	10.32
2012	6.59	16.56	18.38	7.50	10.38	8.57	8.15	10.56
2013	6.59	16.56	18.38	7.50	10.62	8.57	8.15	10.56
2014	6.55	16.49	18.35	7.49	10.88	8.54	8.12	10.56
2015	6.40	16.01	17.93	7.36	11.56	8.34	7.95	10.32

	16068	16067	16043	16039	16038	16025	16007	16006
1981	6.28	5.97	6.65	16.67	11.54	6.16	15.45	12.79
1982	6.41	6.20	8.04	20.79	13.21	5.50	17.49	14.63
1983	6.40	6.08	7.30	17.53	11.34	6.40	15.08	11.72
1984	5.94	5.96	7.35	17.09	13.07	8.72	14.53	12.19
1985	6.32	5.99	7.31	18.72	12.90	8.09	15.54	12.82
1986	6.45	6.10	7.43	18.46	12.09	6.86	15.29	12.72
1987	6.75	6.21	7.90	19.81	12.45	6.89	16.45	14.52
1988	6.72	6.40	7.88	17.87	12.45	6.89	15.46	14.84
1989	6.17	6.26	7.85	18.47	12.39	6.93	15.93	14.23
1990	6.57	6.04	7.72	18.99	12.09	6.86	15.91	15.26
1991	6.57	6.04	7.73	18.56	12.09	6.86	16.56	15.03
1992	6.78	6.21	7.33	17.08	12.45	6.89	14.61	15.35
1993	6.78	6.21	7.67	18.60	12.45	6.89	16.92	15.30
1994	6.72	6.17	7.74	20.23	12.39	6.93	18.53	17.49
1995	6.57	6.04	7.65	18.41	12.09	6.86	17.53	15.07
1996	6.57	6.04	7.50	16.96	12.09	6.86	14.81	14.77
1997	4.17	6.21	8.01	19.34	12.45	6.89	16.78	17.14
1998	4.40	6.21	8.21	18.68	12.45	6.89	16.67	17.14
1999	6.72	6.17	7.84	18.01	12.39	6.93	15.56	16.84
2000	6.72	6.11	7.43	16.98	12.09	6.86	13.46	15.05
2001	6.64	6.42	7.53	18.14	12.09	6.86	15.49	14.45
2002	6.78	6.21	8.04	18.36	12.45	6.89	15.27	15.38
2003	6.91	6.21	7.97	17.71	12.45	6.89	14.49	17.50
2004	6.54	6.17	7.50	17.85	12.39	6.93	13.78	16.41
2005	5.78	6.04	7.92	20.55	12.09	6.86	14.23	15.83
2006	7.18	6.04	7.83	19.83	12.09	6.86	14.34	15.18
2007	6.42	6.21	7.65	19.61	12.45	6.89	15.15	15.83
2008	8.19	6.21	7.76	18.35	12.45	6.89	13.90	14.84
2009	7.47	6.17	7.71	18.73	12.39	6.93	15.08	15.80
2010	8.42	6.04	7.56	15.66	12.09	6.86	13.16	13.63
2011	7.83	6.04	7.92	17.39	12.09	6.86	14.44	14.85
2012	8.80	6.21	7.86	16.85	12.45	6.89	14.70	14.46
2013	7.86	6.21	7.76	16.96	12.45	6.89	14.77	14.92
2014	8.39	6.17	7.71	16.84	12.39	6.93	14.92	15.21
2015	6.19	6.04	7.53	17.44	12.09	6.86	15.52	15.71

	16003	14348	14191	14180	14177	14160	14119	14099
1981	9.66	10.86	6.93	7.82	15.70	6.66	7.82	6.29
1982	8.63	10.80	7.30	8.03	17.97	6.66	8.03	6.61
1983	8.96	11.04	7.05	7.48	15.12	6.66	7.72	5.98
1984	8.96	11.31	6.91	7.37	14.77	6.63	7.46	5.77
1985	8.81	9.32	7.68	7.72	16.23	6.58	7.63	6.02
1986	8.81	11.33	7.61	7.73	15.78	6.12	7.73	6.24
1987	8.96	12.15	6.99	8.17	15.18	7.04	8.19	6.29
1988	8.96	11.64	7.66	7.79	15.18	7.60	7.94	6.47
1989	8.96	12.11	7.87	7.93	15.11	6.63	7.86	6.22
1990	8.81	7.32	7.16	7.68	14.72	6.49	7.67	6.16
1991	8.81	11.41	7.16	9.45	14.72	6.49	7.67	5.91
1992	8.96	9.19	7.34	9.63	15.18	6.27	7.93	5.74
1993	8.96	11.15	7.34	7.96	15.18	6.20	7.93	6.35
1994	8.96	11.90	7.31	8.73	15.11	6.54	7.86	6.63
1995	8.81	11.22	7.16	7.70	15.09	6.49	7.67	6.70
1996	8.81	10.66	7.16	7.37	12.87	6.01	7.67	6.26
1997	8.96	11.73	7.34	7.59	14.22	6.23	7.93	6.46
1998	8.96	11.41	7.34	8.06	14.15	6.80	7.93	7.09
1999	8.96	11.32	7.31	8.10	14.58	5.93	8.10	6.70
2000	8.81	9.26	7.16	7.78	14.72	6.36	7.88	6.19
2001	8.81	3.52	7.16	7.74	14.72	6.56	7.74	6.19
2002	8.96	2.90	7.34	8.35	15.18	6.85	8.35	6.33
2003	8.96	3.05	7.34	8.24	15.18	6.55	8.24	6.33
2004	8.96	2.98	7.31	7.22	15.11	6.51	7.20	6.32
2005	8.81	2.85	7.16	8.07	14.72	6.68	7.68	6.19
2006	8.81	3.09	7.16	7.66	14.72	6.49	7.76	6.19
2007	8.96	2.63	7.34	7.90	15.18	7.00	7.93	6.33
2008	8.96	2.77	7.34	7.49	15.18	6.66	7.93	6.33
2009	8.96	4.66	7.31	7.76	15.11	6.63	7.86	6.32
2010	8.81	7.32	7.16	6.96	14.72	6.88	7.60	6.19
2011	8.81	7.32	7.16	7.68	14.72	7.20	7.67	6.19
2012	8.96	7.63	7.34	7.51	15.18	7.13	7.93	6.33
2013	8.96	7.63	7.34	7.86	15.18	6.74	7.93	6.35
2014	8.96	7.55	7.01	7.36	15.11	6.54	7.86	6.03
2015	8.57	7.32	7.16	7.68	14.72	6.49	7.67	6.19

Tabla 12.- Promedio Anual de ETp

Evapotranspiración Promedio Anual (Potencial)



Mapa 10.- Evapotranspiración Promedio Anual (cm)



Resultados



4.- Resultados

4.1.- Estimación de la Evapotranspiración Potencial (ETp)

Una vez que ya hemos descrito la ET se divide en ETp y ETr, de esta última la ETr es la que se produce realmente bajo las condiciones meteorológicas, de humedad de suelo y de vegetación existentes en un lugar y durante un tiempo dado.

Para esto ocuparemos un análisis estadístico el cual consistió en la aplicación de un análisis de regresión para describir el comportamiento de cada una de las variables, ETR y ETP en relación con la temperatura y el NDVI.

Para esto se evaluó a partir de diagramas de dispersión bidimensionales donde la tendencia de los datos en su conjunto es separada por estaciones meteorológicas.

Todo esto mediante la técnica de regresión lineal múltiple en la cual esta permite generar un modelo lineal en el que el valor de la variable dependiente o respuesta (Y) se determina a partir de un conjunto de variables independientes llamadas predictores ($X^1, X^2, X^3 \dots$).

En pocas palabras es una extensión de la regresión lineal simple, por lo que es fundamental comprender esta última.

Para iniciar con esto conoceremos primero el comportamiento de cada variable donde este lo podremos observar en las siguientes gráficas que representan un promedio mensual de cada estación con respecto al tiempo comprendido de enero del 2000 a diciembre del 2018, por lo cual nos arroja las siguientes tablas:

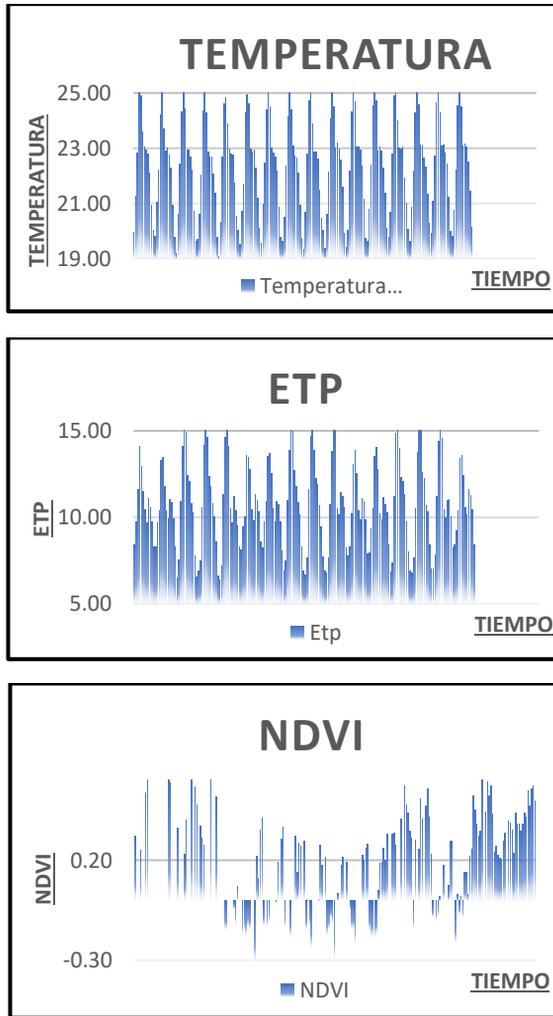


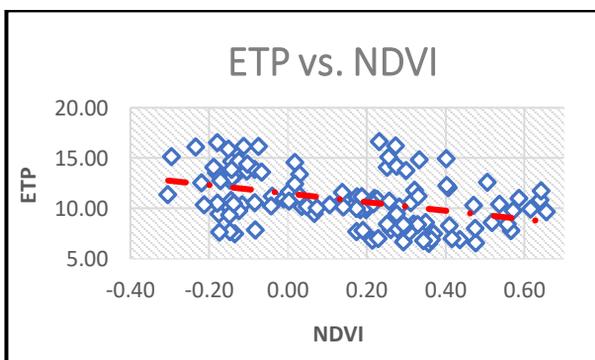
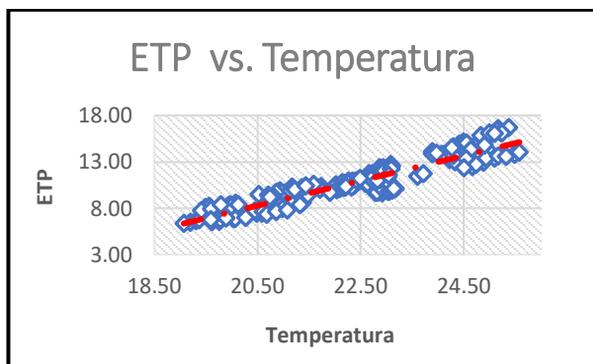
Figura 18.- Variabilidad Individual

Una vez observando los valores máximos de cada gráfico y sus comportamientos podemos empezar a aplicar el modelo de regresión múltiple donde este puede emplearse para predecir el valor de la variable dependiente o para evaluar la influencia que tienen los predictores sobre ella (esto último se debe analizar con cautela para no malinterpretar en pocas palabras causa y efecto).

Una vez descomponiendo la variabilidad de la variable respuesta en una variabilidad explicada por el modelo más un variabilidad no explicada o residual, nos permitió contrastar si el modelo de regresión es significativo o no.

Para este último apartado tuvimos que juntar en una sola tabla todas las variables independientes de esta misma (Temperatura, Evapotranspiración y el NDVI).

Las cuales las correlacionamos entre sí para arrojarlos las siguientes graficas:



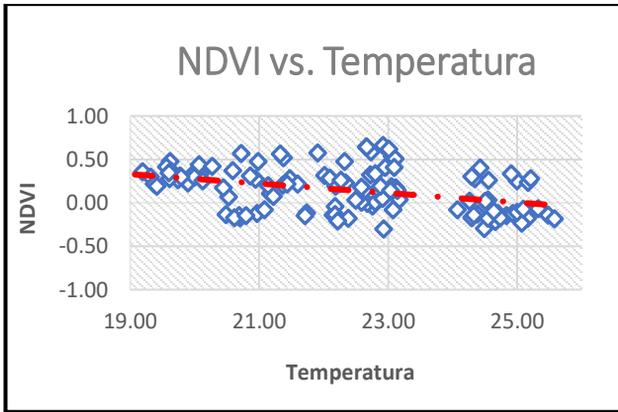


Figura 19.- Correlación Entre Variables

Ya obteniendo esto podemos observar los diagramas de dispersión bidimensional que permitieron establecer la relación entre la variable respuesta ETP y las variables TS y NDVI.

Dichos gráficos evidencian una alta asociación lineal de la variable independiente TS con ETR, mientras que NDVI no parece tener una relación muy marcada para predecir ETP.

Para un mejor entendimiento de este se obtuvo una matriz de correlación muestral para establecer la magnitud de la relación lineal entre ETP y TS donde la correlación fue de 0.93, mientras que entre ETR y NDVI resultó de -0.40 lo cual se puede considerar como baja mientras que la correlación muestral entre las variables consideradas independientes (TS y NDVI) arrojó también un valor de -0.40, lo que exhibe un poca falta de asociación lineal pero no esta tan mal por lo cual nos permitirá poder realizar el ajuste de regresión.

	Ts	NDVI	ETp
Ts	1.00	-0.40	0.93
NDVI	-0.40	1.00	-0.40
ETp	0.93	-0.40	1.00

Tabla 13.- Matriz de Correlación Principal

Este análisis de regresión se inició de manera global en el cual la ecuación generada fue la siguiente:

$$\text{NDVI} = 0.9405 + (-0.0250 * \text{Ts}) + (-0.0215 * \text{ETP}) \dots\dots\dots (8)$$

Por lo que se pudo observar una elevación en la matriz de correlación ya que esta subió un poco más en el análisis:

	Ts	NDVI	ETp
Ts	1.00	-0.49	0.93
NDVI	-0.49	1.00	-0.48
ETp	0.93	-0.48	1.00

Tabla 14.- Matriz de Correlación Secundaria

Como se sigue por debajo del nivel medio (0.5) de correlación se optó por generar el ajuste de regresión lineal múltiple para cada estación por lo que se hizo la siguiente tabla de correlaciones de cada estación para determinar cuál de ellas se eliminarían por falta de correlación entre ellas.

		NDVI-Ts	ETp-Ts	NDVI-ETp	
1	16067	-0.37	0.91	-0.32	Green
2	16068	-0.40	0.95	-0.35	Green
3	14160	-0.52	0.93	-0.49	Green
4	14191	-0.47	0.91	-0.45	Green
5	14119	-0.20	0.95	-0.23	Red
6	14099	-0.32	0.90	-0.22	Green
7	14180	-0.37	0.95	-0.42	Green
8	16106	-0.18	0.93	-0.18	Red
9	16025	-0.59	0.87	-0.50	Green
10	16043	-0.12	0.92	-0.17	Red

11	16194	-0.16	0.93	-0.16	Red
12	14095	-0.23	0.94	-0.20	Red
13	16077	-0.29	0.93	-0.28	Red
14	16073	-0.41	0.91	-0.38	Green
15	16072	-0.55	0.94	-0.50	Green
16	16088	-0.16	0.88	-0.20	Red
17	14177	-0.56	0.95	-0.51	Green
18	16216	-0.34	0.93	-0.27	Red
19	16128	-0.25	0.96	-0.21	Red
20	16085	-0.16	0.94	-0.16	Red
21	16228	-0.51	0.95	-0.47	Green
22	16101	-0.46	0.96	-0.44	Green
23	16007	-0.14	0.93	-0.12	Red
24	16038	-0.36	0.95	-0.37	Green
25	16090	-0.51	0.94	-0.45	Green
26	16039	-0.49	0.94	-0.45	Green
27	16006	-0.05	0.95	-0.07	Red
28	16157	-0.23	0.95	-0.21	Red
29	16158	-0.43	0.95	-0.41	Green
30	16003	-0.35	0.91	-0.36	Green
31	16259	0.16	0.01	-0.17	Red
32	14348	0.12	0.38	0.02	Red

Tabla 15.- Valoración de Estaciones

Una vez eliminadas todas aquellas estaciones que están por debajo del valor de correlación de 0.3 nos arroja un valor global de:

	Ts	NDVI	ETp
Ts	1.00	-0.57	0.93
NDVI	-0.57	1.00	-0.55
ETp	0.93	-0.55	1.00

Tabla 16.- Matriz de Correlación Corregida

EL cual ya se encuentra por encima de la media lo cual es muy útil para poder predecir los valores de ETP como lo veremos en las siguientes graficas en cual podemos observar que tienen un excelente comportamiento.

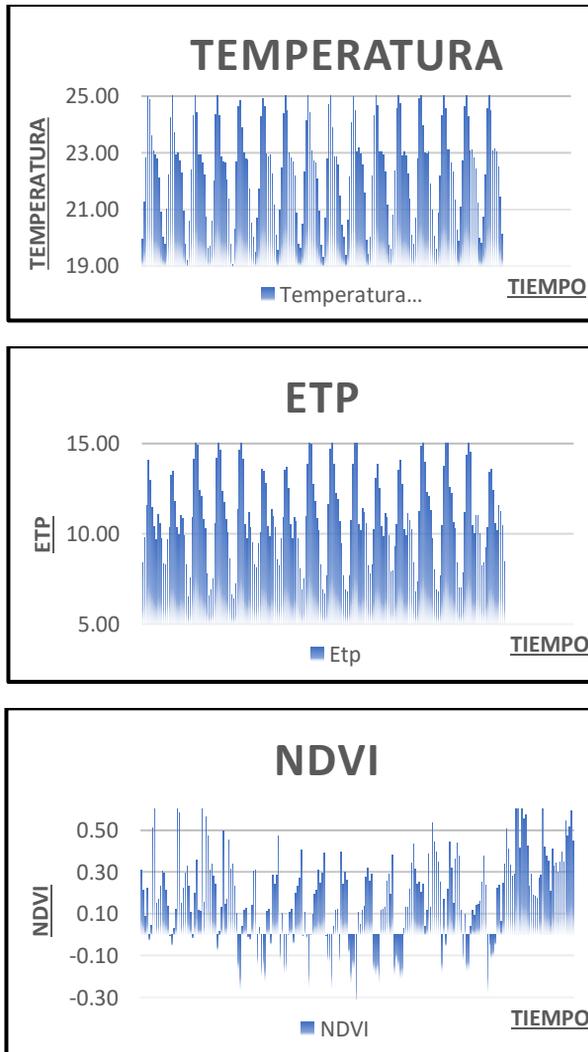


Figura 20.- Variabilidad Individual Corregida

Una vez observando que el comportamiento ya pasa de la media podemos estimar los valores de ETp del periodo del 2016 al 2018.

Esto se hizo a partir de un análisis de regresión lineal simple entre los datos de NDVI y la ETp la cual nos arrojó la siguiente ecuación:

$$ETp = 11.7213 + (-6.6384 * NDVI) \dots\dots\dots (9)$$

	ETp	NDVI		ETp	NDVI
ene/16	8.355	0.51	oct/17	9.237	0.37
feb/16	8.983	0.41	nov/17	9.389	0.35
mar/16	9.502	0.33	dic/17	10.33	0.21
abr/16	9.872	0.28	ene/18	8.994	0.41
May/16	9.799	0.29	feb/18	9.525	0.33
jun/16	7.735	0.60	mar/18	9.439	0.34
jul/16	5.634	0.92	abr/18	9.716	0.30
Ago./16	8.98	0.41	May/18	9.414	0.35
Sep./16	7.438	0.65	jun/18	9.096	0.40
oct/16	8.041	0.55	jul/18	9.403	0.35
nov/16	7.92	0.57	Ago./18	8.091	0.55
dic/16	8.904	0.42	Sep./18	8.593	0.47
ene/17	10.18	0.23	oct/18	8.292	0.52
feb/17	9.787	0.29	nov/18	7.791	0.59
mar/17	10.48	0.19	dic/18	8.748	0.45
abr/17	10.5	0.18			
May/17	10.57	0.17			
jun/17	9.922	0.27			
jul/17	9.83	0.28			
Ago./17	5.634	0.92			
Sep./17	8.939	0.42			

Tabla 17.- Estimación Futura de la ETp

Una vez obteniendo todos los valores de la estimación de la ETp se procedió a generar los datos de promedio y tablas correspondientes de cada una con el motivo de generar un nuevo mapa de estimación de promedio anual de la ETp como se observará en la sección de resultados.

MES	ETp	NDVI
Enero	7.65	0.34
Febrero	8.51	0.14
Marzo	10.66	0.06
Abril	13.30	0.01
Mayo	14.28	-0.05
Junio	12.85	0.05
Julio	10.73	0.20
Agosto	10.18	0.31
Septiembre	10.62	0.22
Octubre	10.21	0.26
Noviembre	9.17	0.33
Diciembre	7.98	0.33

Tabla 18.- Promedio Mensual

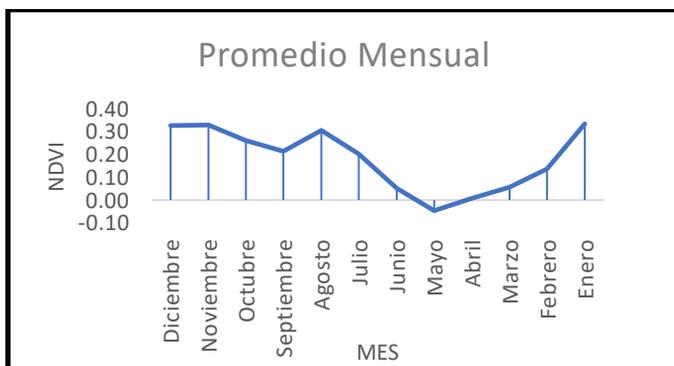


Figura 21.- Promedio Mensual (NDVI)

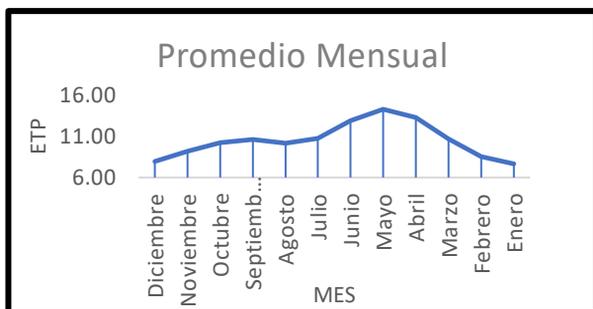


Figura 22.- Promedio Mensual (ETp)

Año	NDVI	ETp
2000	0.24	10.67
2001	0.22	10.59
2002	0.27	10.87
2003	0.23	10.89
2004	0.08	10.76
2005	0.05	10.74
2006	0.08	10.69
2007	0.13	10.95
2008	0.08	10.79
2009	0.02	11.03
2010	0.07	10.48
2011	0.07	10.72
2012	0.28	10.89
2013	0.24	10.93
2014	0.06	10.98
2015	0.09	10.82
2016	0.50	8.43
2017	0.32	9.57
2018	0.42	8.93

Tabla 19.- Promedio Anual

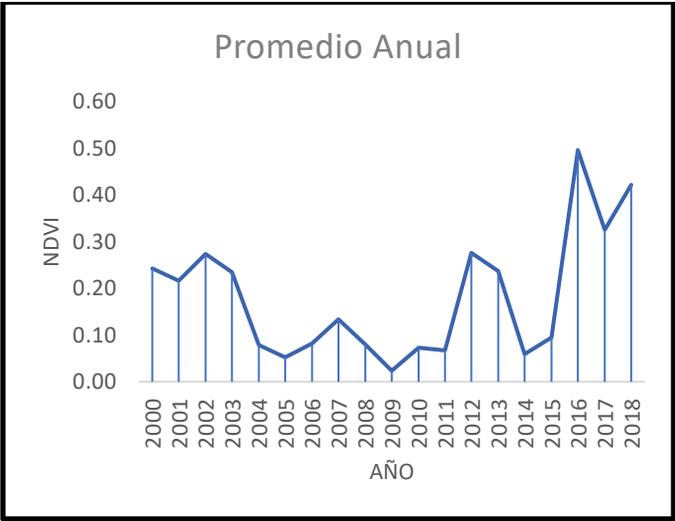


Figura 23.- Promedio Anual (NDVI)

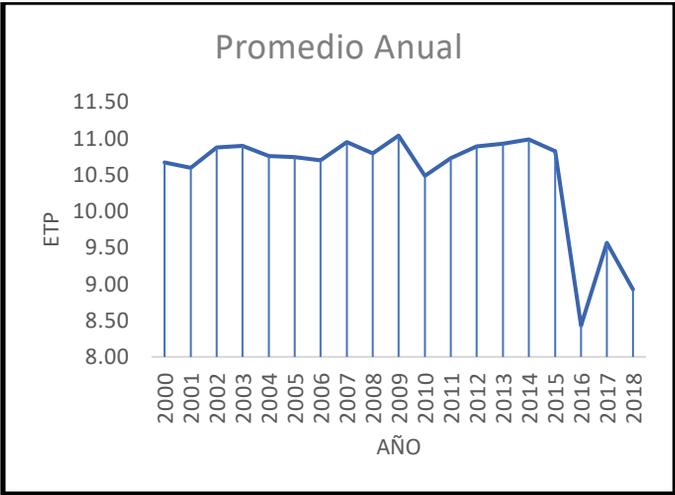
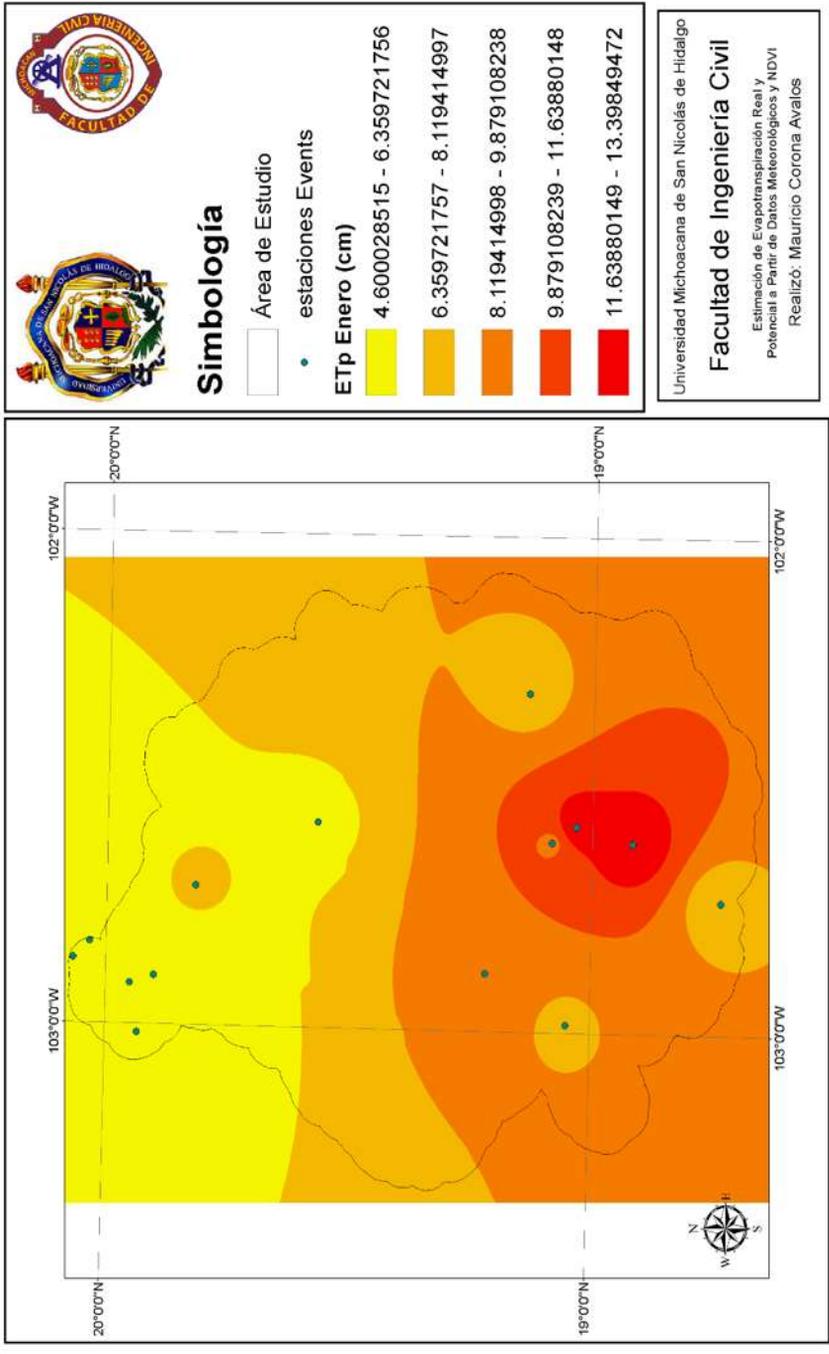


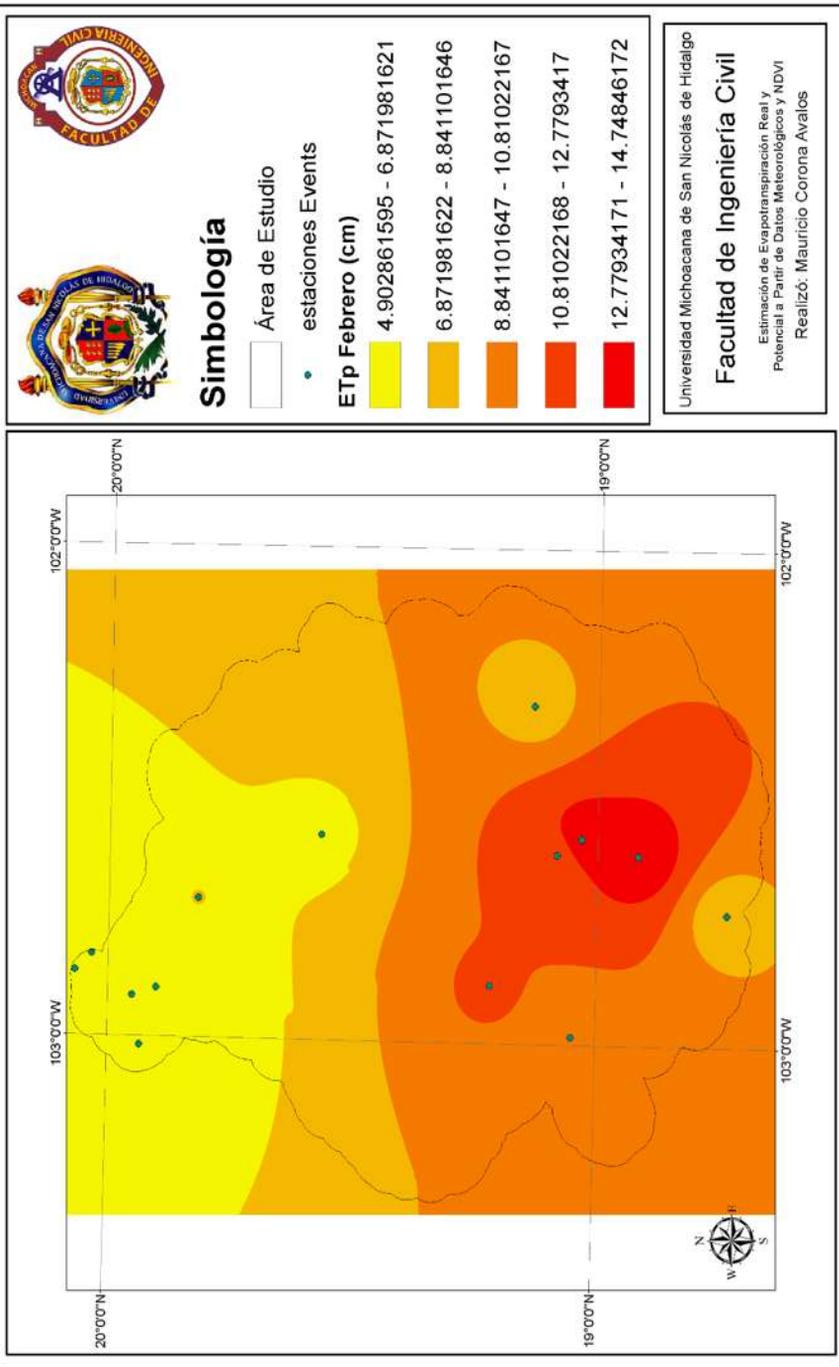
Figura 24.- Promedio Anual (ETp)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Enero)



Mapa 11.- ETp Promedio Mensual (enero)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Febrero)



Mapa 12.- ETp Promedio Mensual (febrero)

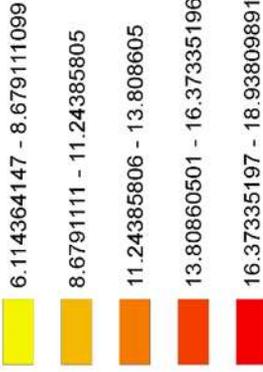
Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Marzo)



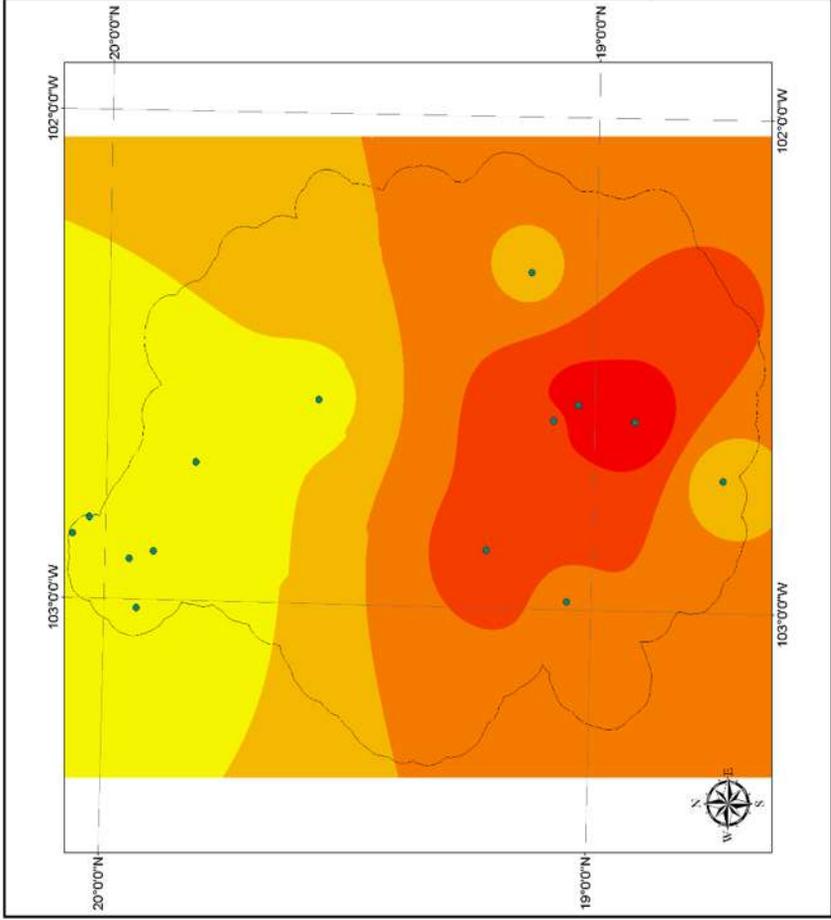
Simbología

- Área de Estudio
- estaciones Events

ETp Marzo (cm)

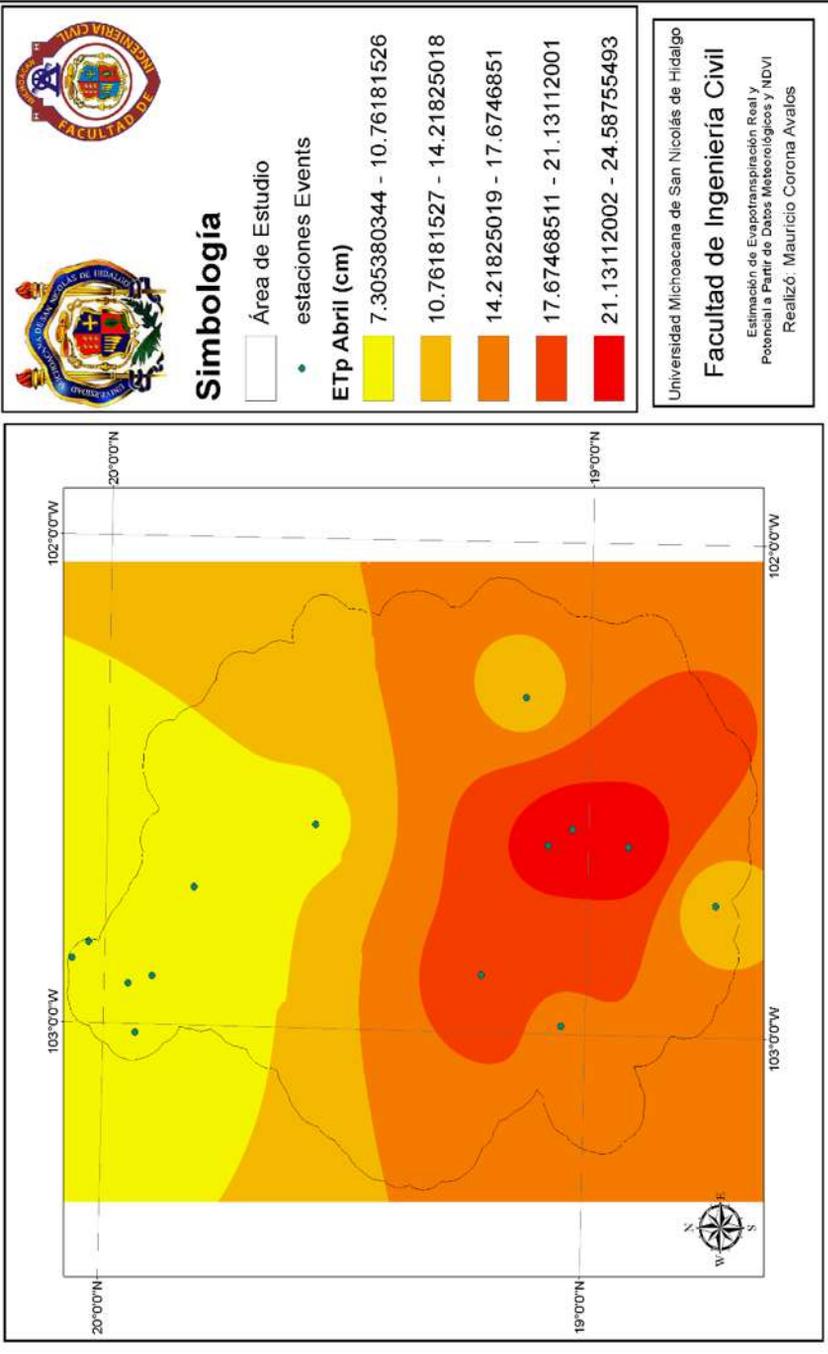


Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Civil
Estimación de Evapotranspiración Real y Potencial a Partir de Datos Meteorológicos y NDVI
Realizó: Mauricio Corona Avalos



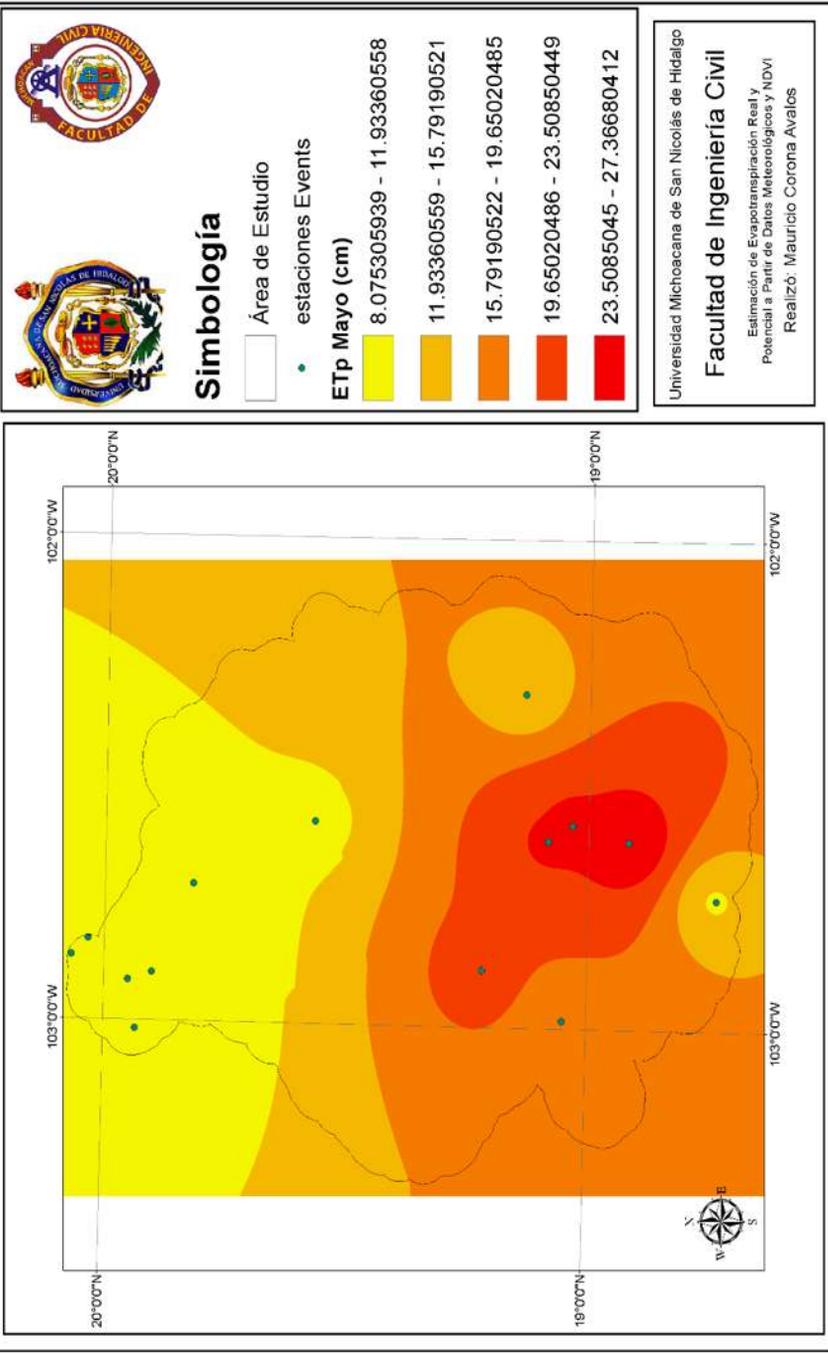
Mapa 13.- ETp Promedio Mensual (marzo)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Abril)



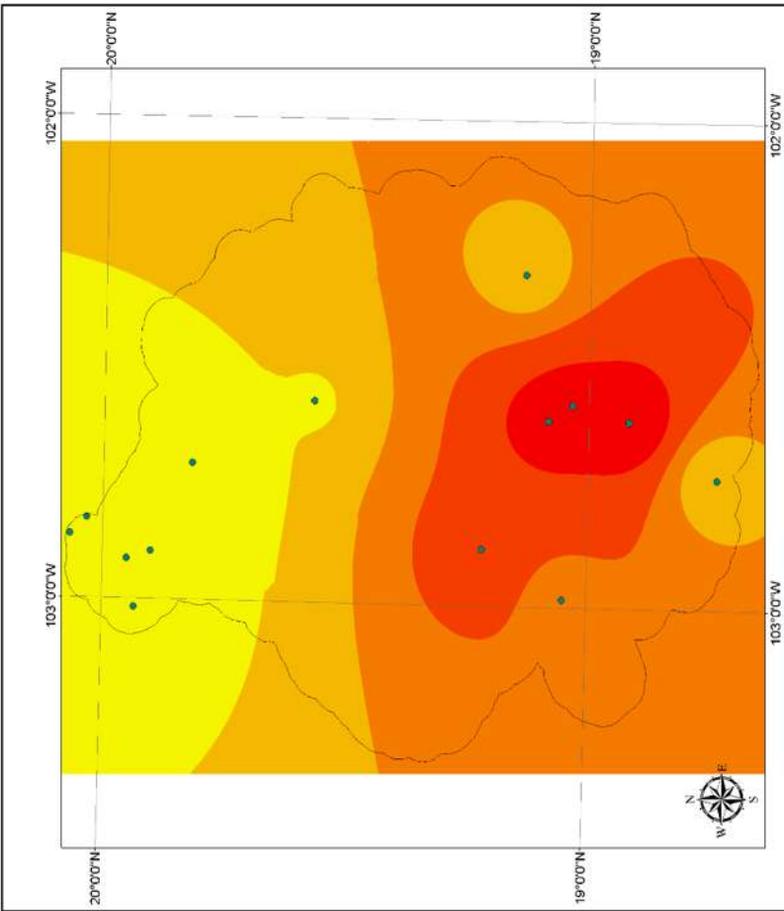
Mapa 14.- ETp Promedio Mensual (abril)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Mayo)



Mapa 15.- ETp Promedio Mensual (mayo)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Junio)



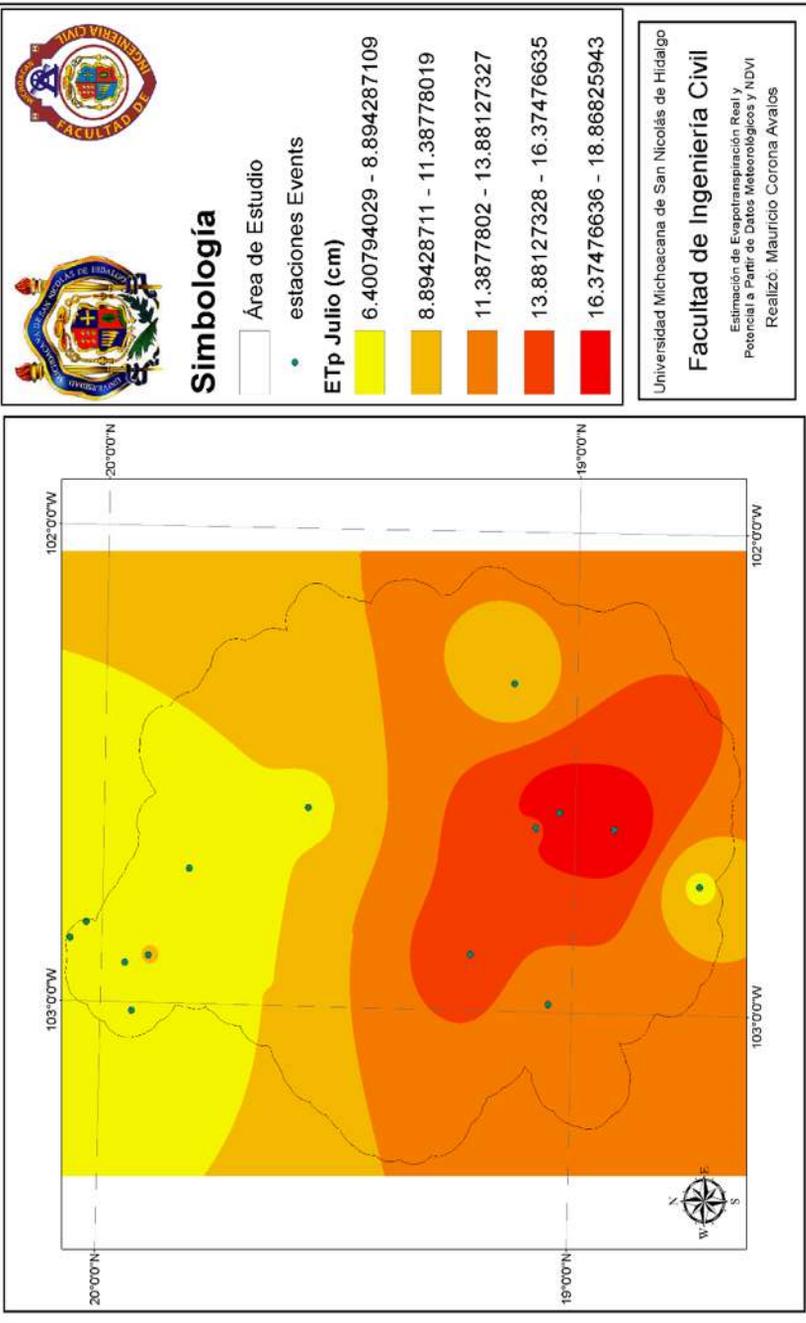
Simbología

- Área de Estudio
- estaciones Events
- ETp Junio (cm)
 - 6.672481537 - 10.1494812
 - 10.14948121 - 13.62648087
 - 13.62648088 - 17.10348053
 - 17.10348054 - 20.58048019
 - 20.5804802 - 24.05747986

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Civil
Estimación de Evapotranspiración Real y Potencial a Partir de Datos Meteorológicos y NDVI
Realizó: Mauricio Corona Avalos

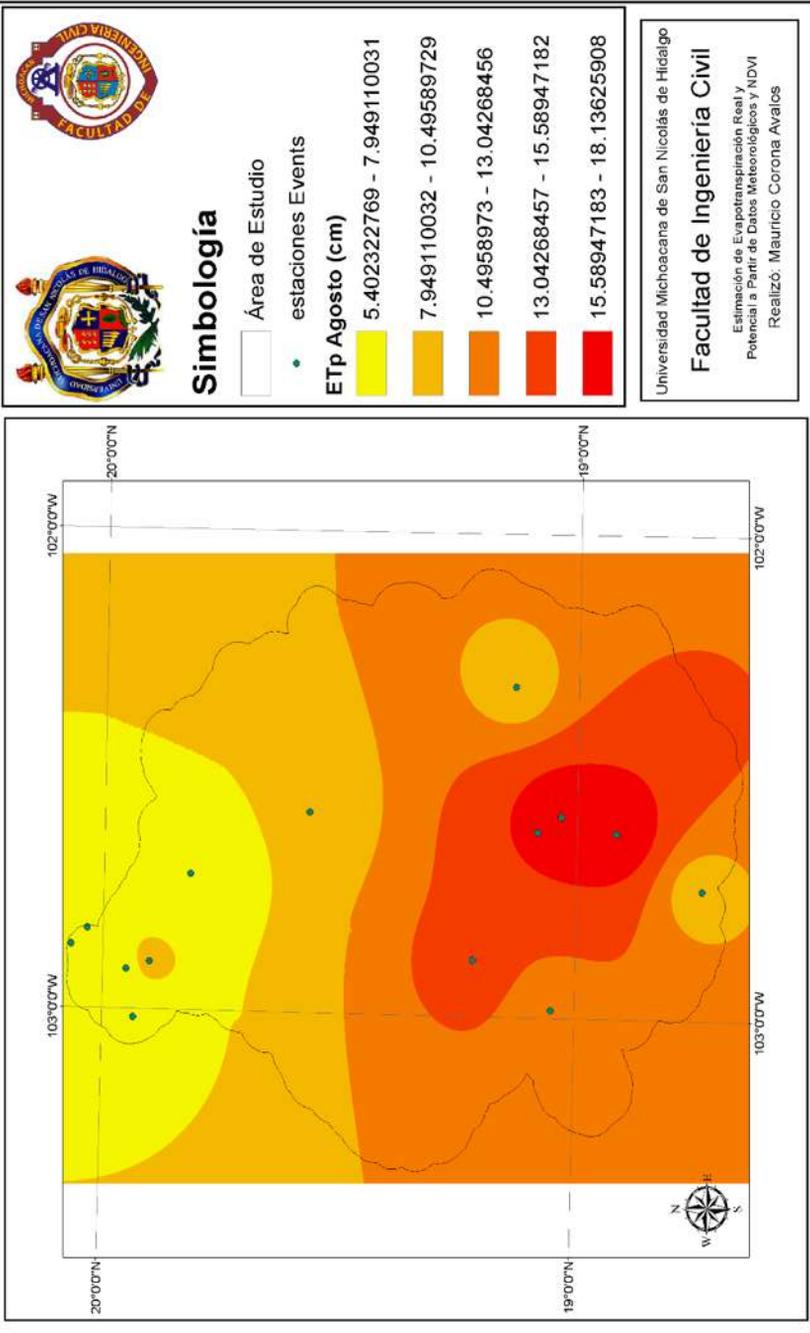
Mapa 16.- ETp Promedio Mensual (junio)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Julio)



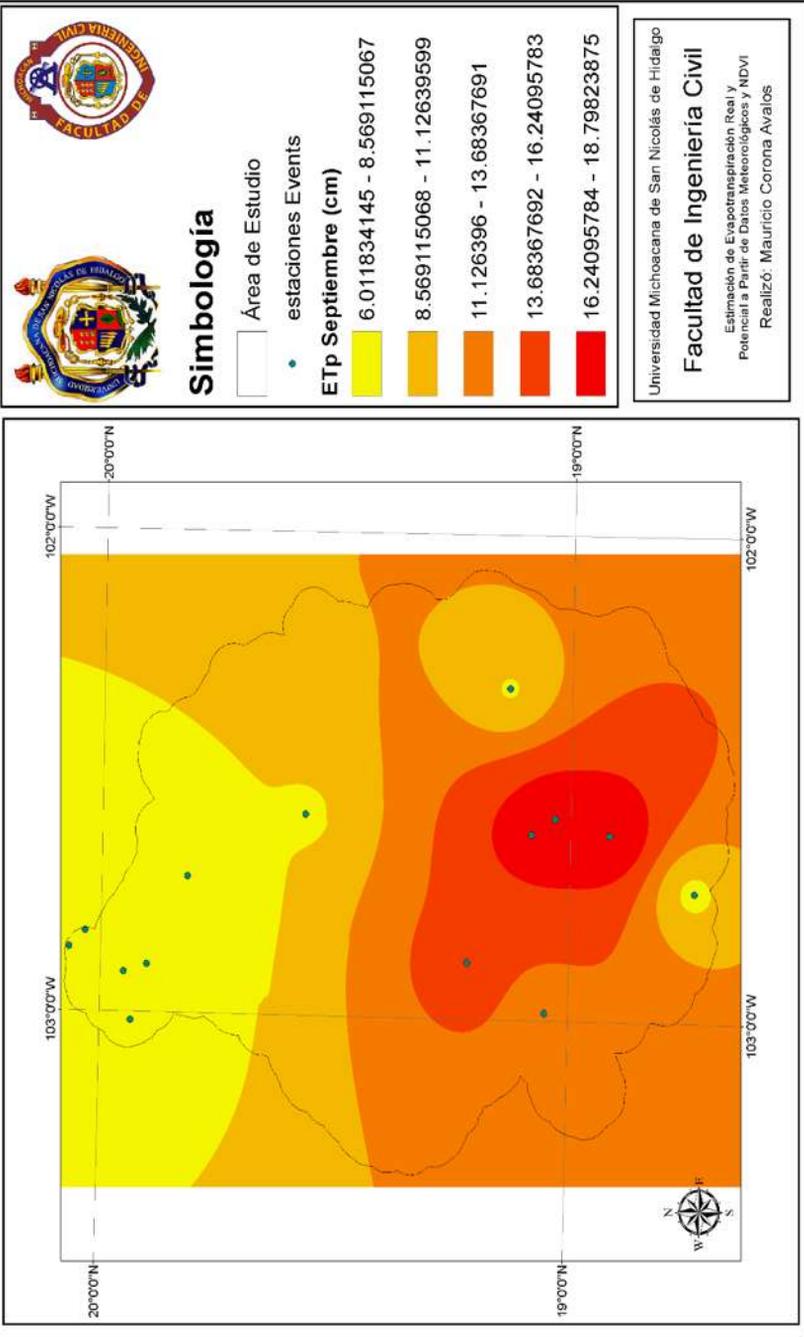
Mapa 17.- ETp Promedio Mensual (Julio)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Agosto)



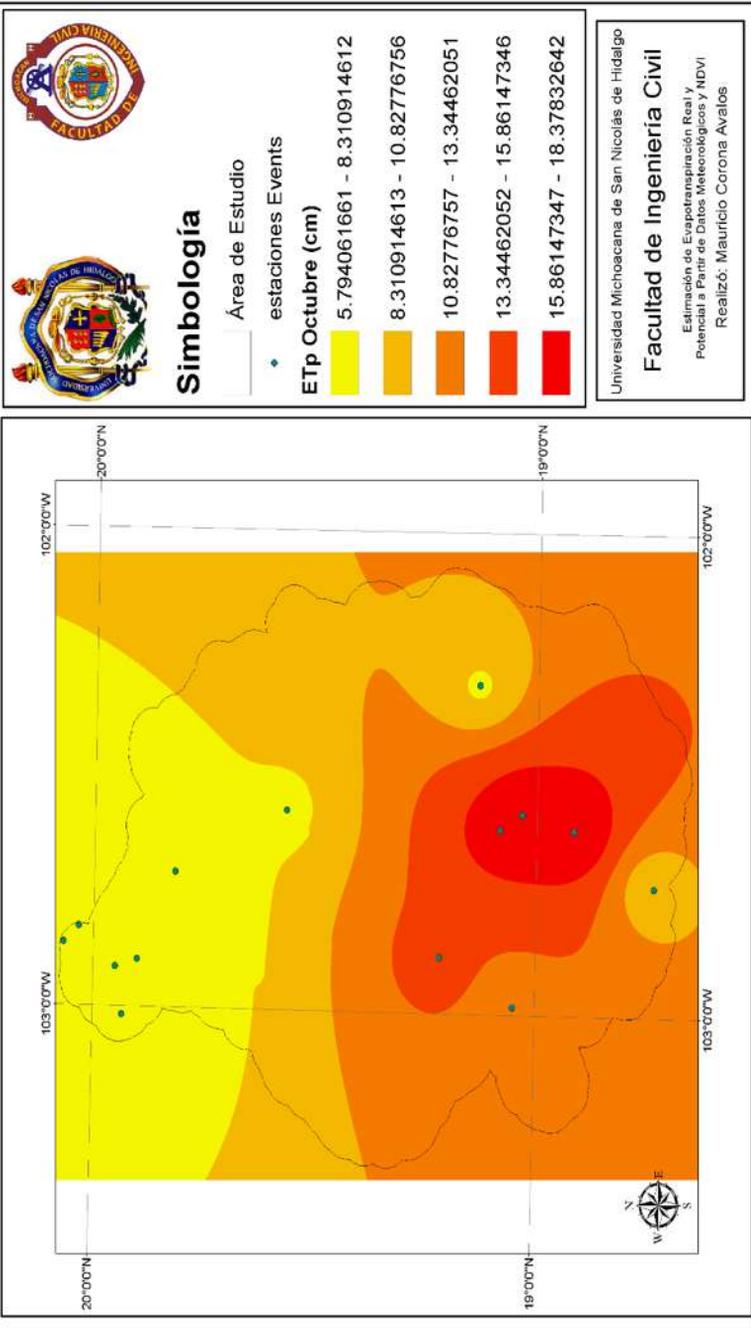
Mapa 18.- ETp Promedio Mensual (agosto)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Septiembre)



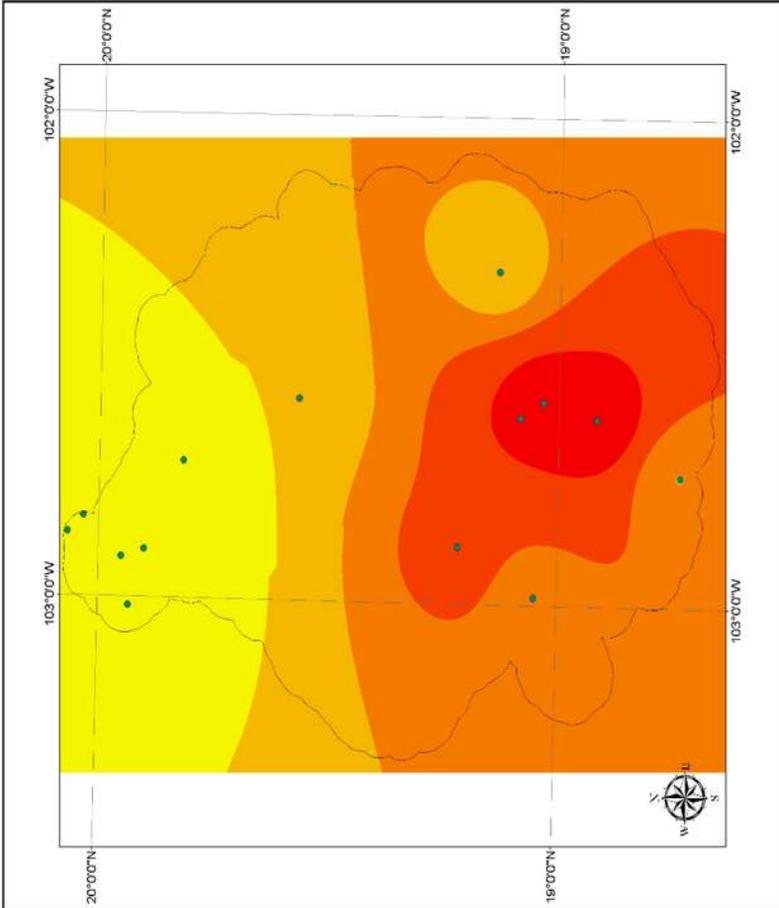
Mapa 19.- ETp Promedio Mensual (septiembre)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Octubre)



Mapa 20.- ETp Promedio Mensual (octubre)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Noviembre)



Simbología

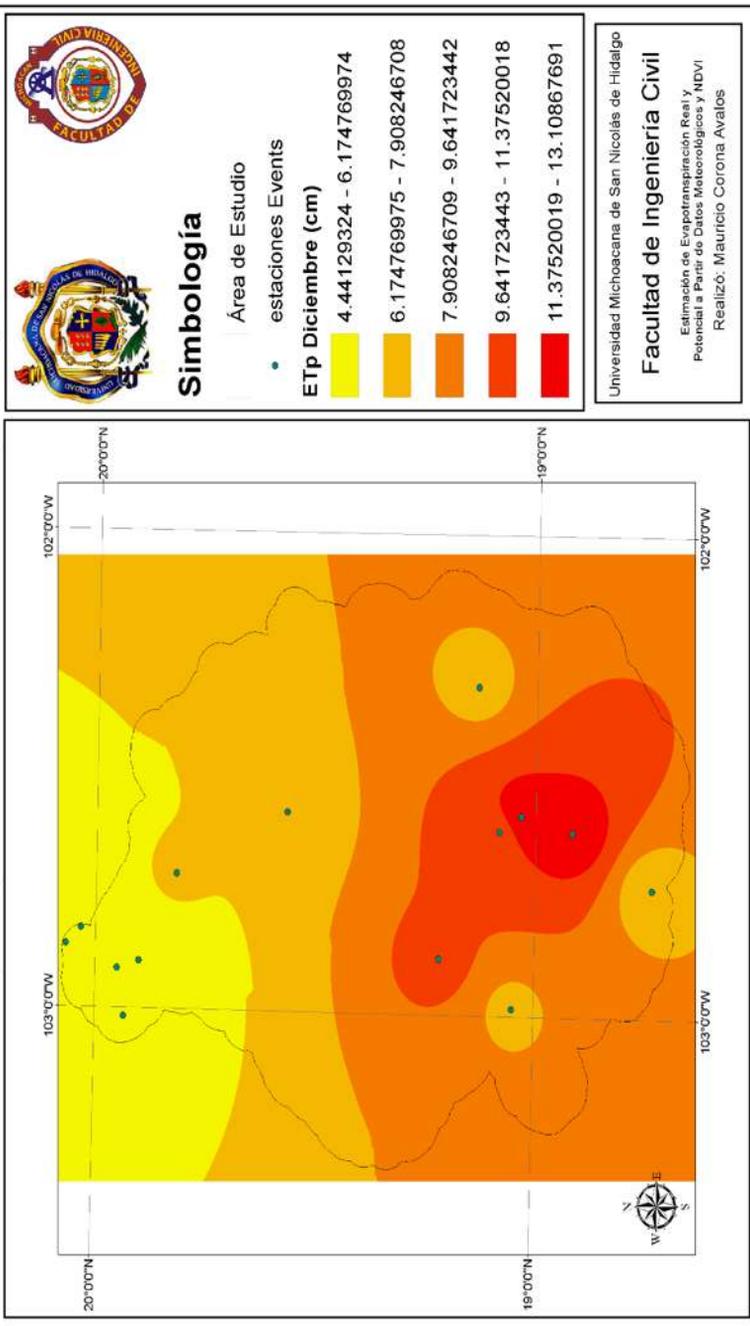
- Área de Estudio
- estaciones Events

ETp Noviembre (cm)
5.362085342 - 7.447411346
7.447411347 - 9.53273735
9.532737351 - 11.61806335
11.61806336 - 13.70338936
13.70338937 - 15.78871536

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Civil
 Estimación de Evapotranspiración Real y
 Potencial a Partir de Datos Meteorológicos y NDVI
 Realizó: Mauricio Corona Avalos

Mapa 21.- ETp Promedio Mensual (noviembre)

Evapotranspiración Potencial Promedio Mensual (Diciembre)



Mapa 22.- ETp Promedio Mensual (diciembre)

4.2. Estimación de la Evapotranspiración Real (ETr)

Para este apartado comenzaremos analizando el método del cálculo de la evapotranspiración por el método de Blaney-Criddle (1950) donde se estableció una fórmula aplicada en las condiciones del oeste de los Estados Unidos de América, en la cual se emplean la temperatura media mensual, el fotoperiodo diario y un factor de cultivo, con lo cual se puede estimar el uso consuntivo (Mijares, 2015)

$$ETr = KF \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

K = Coeficiente Global de Desarrollo

F = Factor de Temperatura y Luminosidad

Cabe decir que para este proyecto se ha decidido tomar en consideración un factor K general que dependerá no tanto del desarrollo de una planta o cultivo si no será un factor que dependerá del uso y tipo de suelo de la región todo esto con el apoyo de los servicios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en la cual se clasifican los suelos de la cuenca de estudio en tres diferentes tipos, establecidos en la **Tabla 21**.

Mientras que el factor de temperatura y luminosidad F se calcula de la siguiente manera:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

n = número de meses del año

$$fi = Pi \left(\frac{Ti + 17.8}{21.8} \right) \dots\dots\dots (12)$$

Pi = porcentaje de horas sol del mes con respecto al año

Ti = Temperatura media del mes (°C)

Cabe mencionar que para este sitio de interés el cual es la cuenca del río Tepalcatepec, se encuentra en una zona árida por lo cual es necesario aplicar además un factor de corrección que denominaremos como Kti, donde se determina con la siguiente ecuación:

$$Kti = (0.03114 * Ti) + 0.2396 \dots\dots\dots (13)$$

Como resultado nos arroja la siguiente tabla para cada estación

16259					
MES	i	T	Pi	Kti	fi
ene-81	1	15.33	7.77	0.72	8.46
feb-81	2	14.88	7.268	0.70	7.66
mar-81	3	16.29	8.41	0.75	9.82
abr-81	4	17.27	8.514	0.78	10.65
may-81	5	18.43	9.126	0.81	12.34
jun-81	6	18.30	8.982	0.81	12.04
jul-81	7	18.58	9.22	0.82	12.59
ago-81	8	18.31	8.936	0.81	11.99
...					

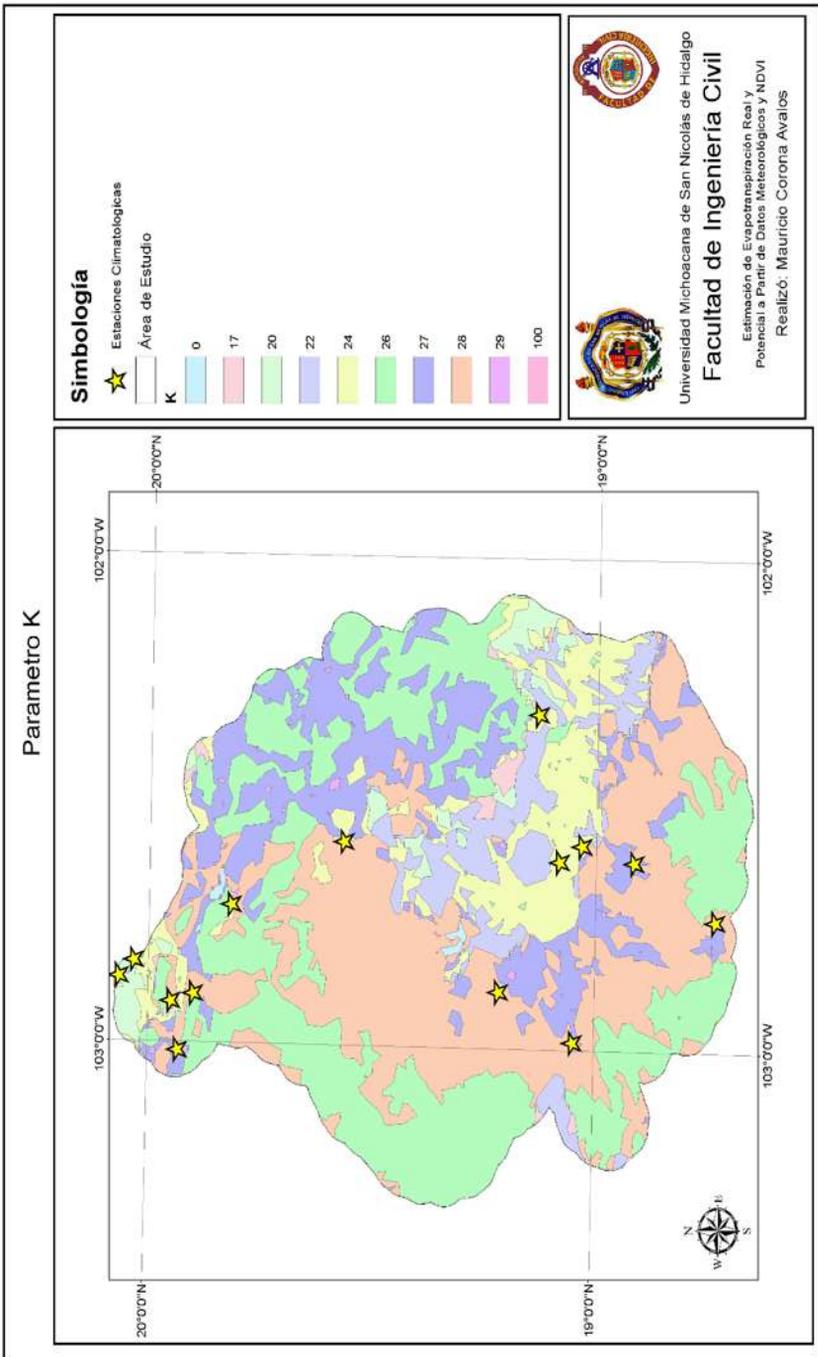
Tabla 20.- Calculo de la Evapotranspiración Real con Blaney

Una vez obteniendo el factor fi para cada estación solo quedo generar el plano del factor K por el cual se multiplicarán.

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hílera			
El Hílera	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular -	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo -	0,24	0,28	0,30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

Tabla 21.- Caracterización del Uso y Tipo de Suelo

Para ello se extranjero los datos de dichos puntos con el shp de las estaciones con las cuales trabajamos en el inciso anterior con lo cual nos arrojó el siguiente mapa y los siguientes resultados.



Mapa 23.- Parámetro K

Estación	K
16228	0.22
16158	0.27
16101	0.24
16090	0.28
16073	0.24
16072	0.24
16068	0.2
16067	0.2
16039	0.28
16038	0.28
16025	0.26
16003	0.28
14191	0.26
14180	0.28
14160	0.26
14099	0.27

Tabla 22.- Extracción de Parámetro K por Estación

Una vez determinado el factor K para cada estación se procede a generar la multiplicación entre K y F para concluir con la determinación de la evapotranspiración por este método y proceder al análisis de regresión para la estimación de la ETr como se tenía contemplado.

1981	4.33	1989	4.39
1982	4.46	1990	4.40
1983	4.28	1991	4.43
1984	4.31	1992	4.37
1985	4.46	1993	4.39
1986	4.42	1994	4.43
1987	4.41	1995	4.44
1988	4.41	1996	4.32
1997	4.32	2008	4.39

1998	4.35	2009	4.42
1999	4.39	2010	4.38
2000	4.39	2011	4.41
2001	4.39	2012	4.39
2002	4.40	2013	4.39
2003	4.39	2014	4.41
2004	4.37	2015	4.41
2005	4.42		
2006	4.42		
2007	4.42		

Tabla 23.- Promedio Anual de ETr

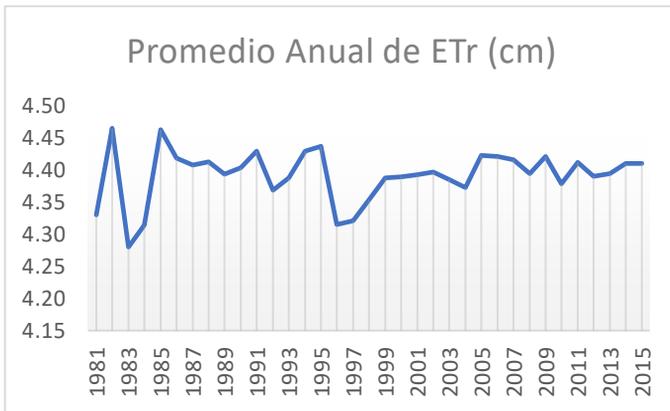


Figura 25.- Promedio Anual de ETr (cm)

ene	3.46
feb	3.48
mar	4.46
abr	5.00
May	5.54
jun	5.22
jul	4.94
ago.	4.77

sep.	4.39
oct	4.23
nov	3.74
dic	3.47

Tabla 24.- Promedio Mensual de ETr

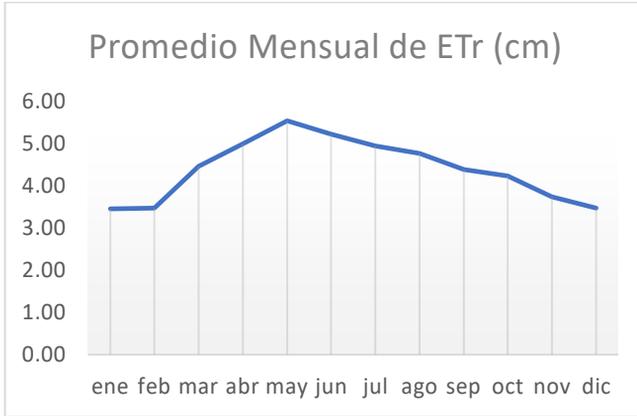


Figura 26.- Promedio Mensual de ETr (cm)

Para ello se utilizó de nuevo la metodología de la regresión lineal simple con lo cual se logró estimar la ETr para el periodo comprendido del 2016 al 2018 lo cual nos arrojó los siguientes resultados que finalmente comparamos con los ya obtenidos de la ETP con el método de Thornthwaite.

	ETR	ETP	NDVI
ene-16	3.74	8.36	0.507
feb-16	3.91	8.98	0.413
mar-16	4.05	9.50	0.334
abr-16	4.15	9.87	0.279
may-16	4.13	9.80	0.290
jun-16	3.57	7.73	0.601
jul-16	2.99	5.63	0.917
ago-16	3.91	8.98	0.413

sep-16	3.49	7.44	0.645
oct-16	3.65	8.04	0.554
nov-16	3.62	7.92	0.573
dic-16	3.88	8.90	0.424
ene-17	4.23	10.18	0.233
feb-17	4.12	9.79	0.291
mar-17	4.31	10.48	0.188
abr-17	4.32	10.50	0.184
may-17	4.34	10.57	0.174
jun-17	4.16	9.92	0.271
jul-17	4.14	9.83	0.285
ago-17	2.99	5.63	0.917
sep-17	3.89	8.94	0.419
oct-17	3.97	9.24	0.374
nov-17	4.02	9.39	0.351
dic-17	4.27	10.33	0.209
ene-18	3.91	8.99	0.411
feb-18	4.05	9.53	0.331
mar-18	4.03	9.44	0.344
abr-18	4.11	9.72	0.302
may-18	4.02	9.41	0.347
jun-18	3.94	9.10	0.395
jul-18	4.02	9.40	0.349
ago-18	3.66	8.09	0.547
sep-18	3.8	8.59	0.471
oct-18	3.72	8.29	0.517
nov-18	3.58	7.79	0.592
dic-18	3.84	8.75	0.448

Tabla 25.-Resultados

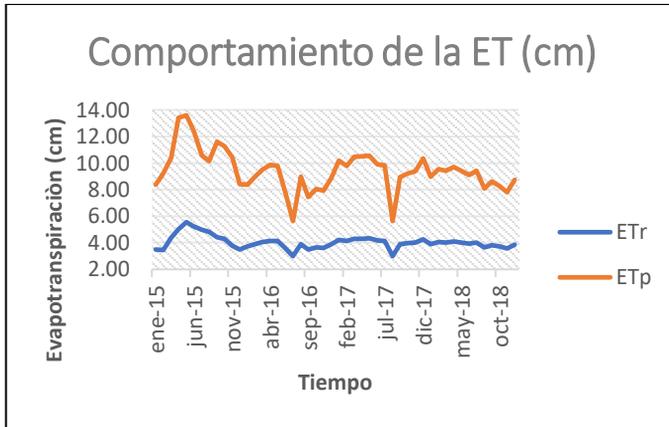


Figura 27.- Comportamiento de la ET (cm)

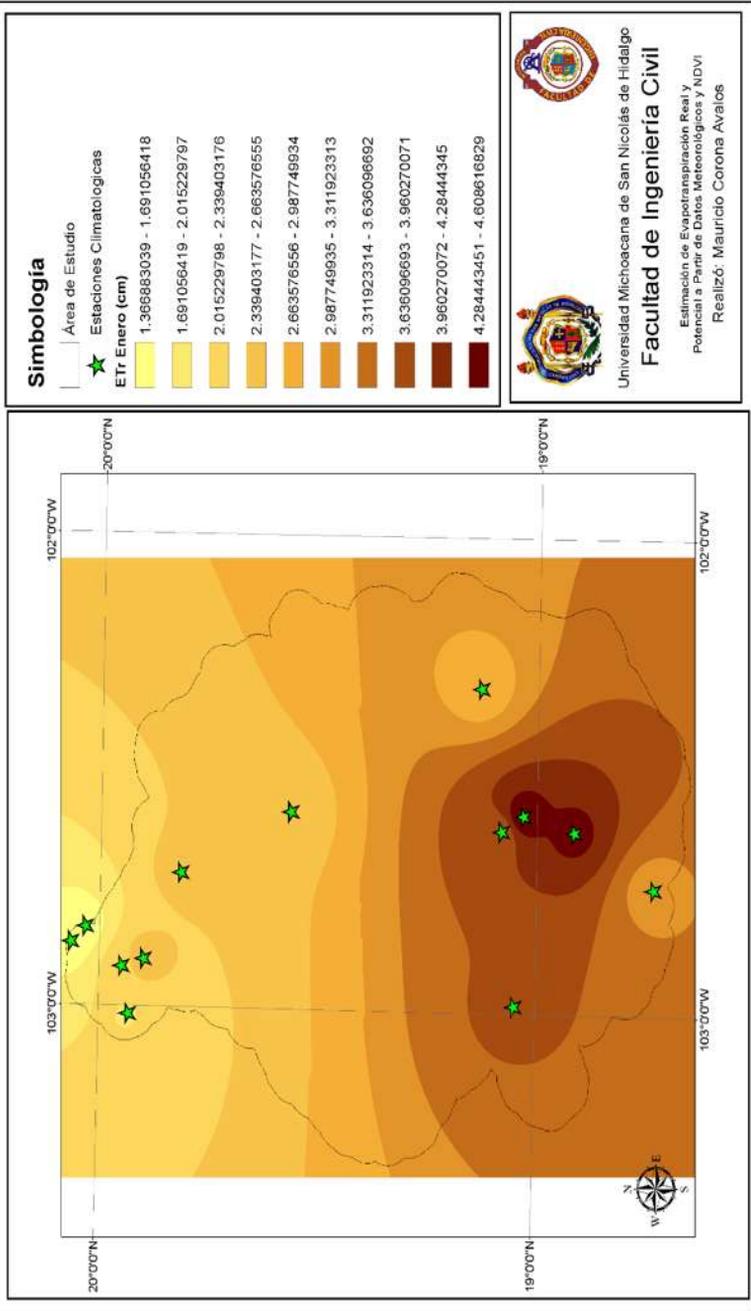
Una vez observando el comportamiento de la ET por ambos métodos se determinó de nuevo la correlación que tenían uno con respecto al otro para así observar si existía una buena correlación entre ambas para proceder a la generación de los respectivos mapas resultado del comportamiento de esta ETr.

	ETr	ETp	NDVI
ETr	1.00	0.90	-0.60
ETp	0.90	1.00	-0.62
NDVI	-0.60	-0.62	1.00

Tabla 26.- Matriz de Correlación de los Resultados

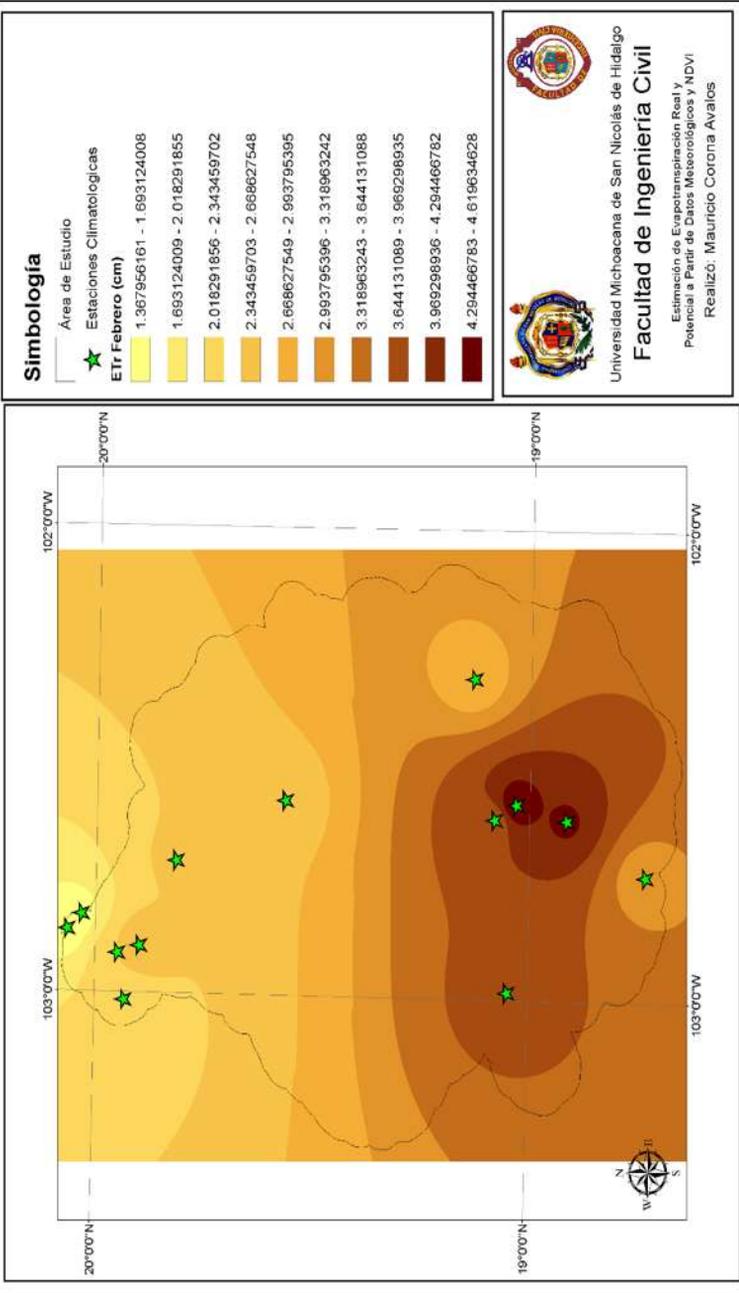
Una vez observando que cuenta con una excelente correlación entre ambas procedemos finalmente a la generación de mapas.

Evapotranspiración Real Promedio Mensual (Enero)



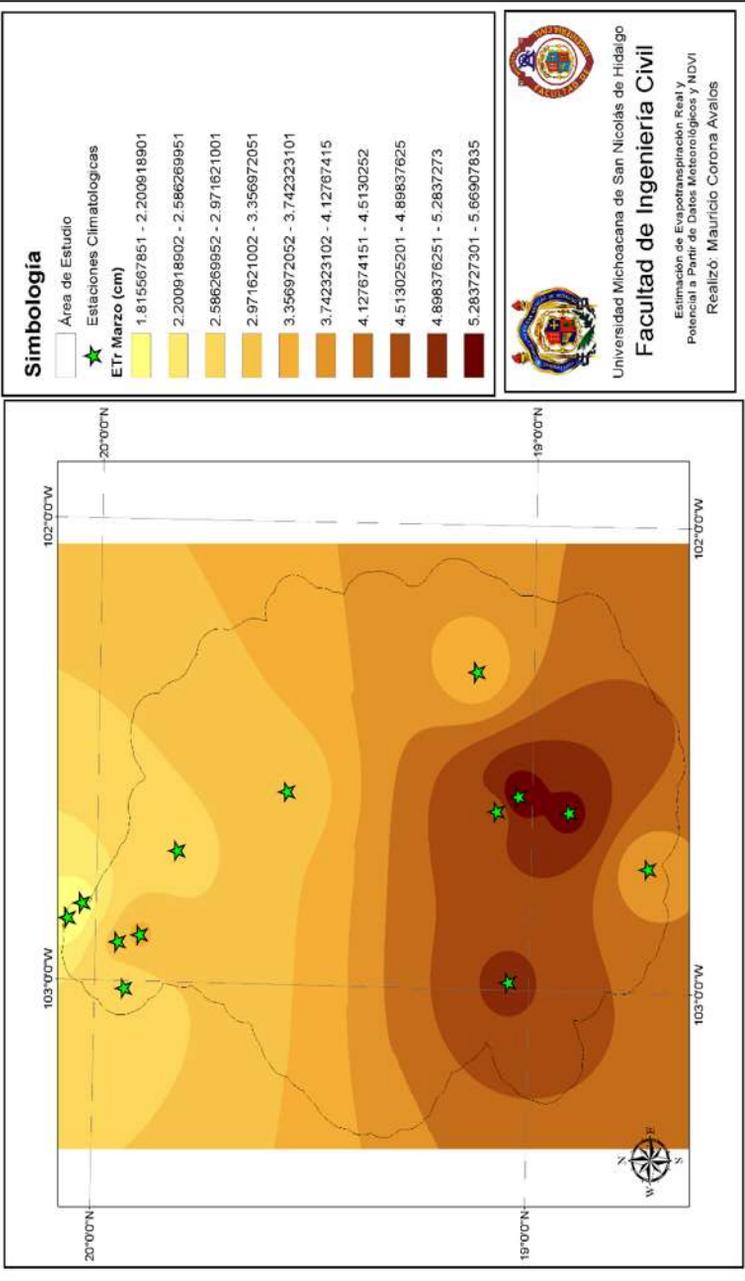
Mapa 24.- ETr Promedio Mensual Enero (cm)

Evapotranspiración Real Promedio Mensual (Febrero)

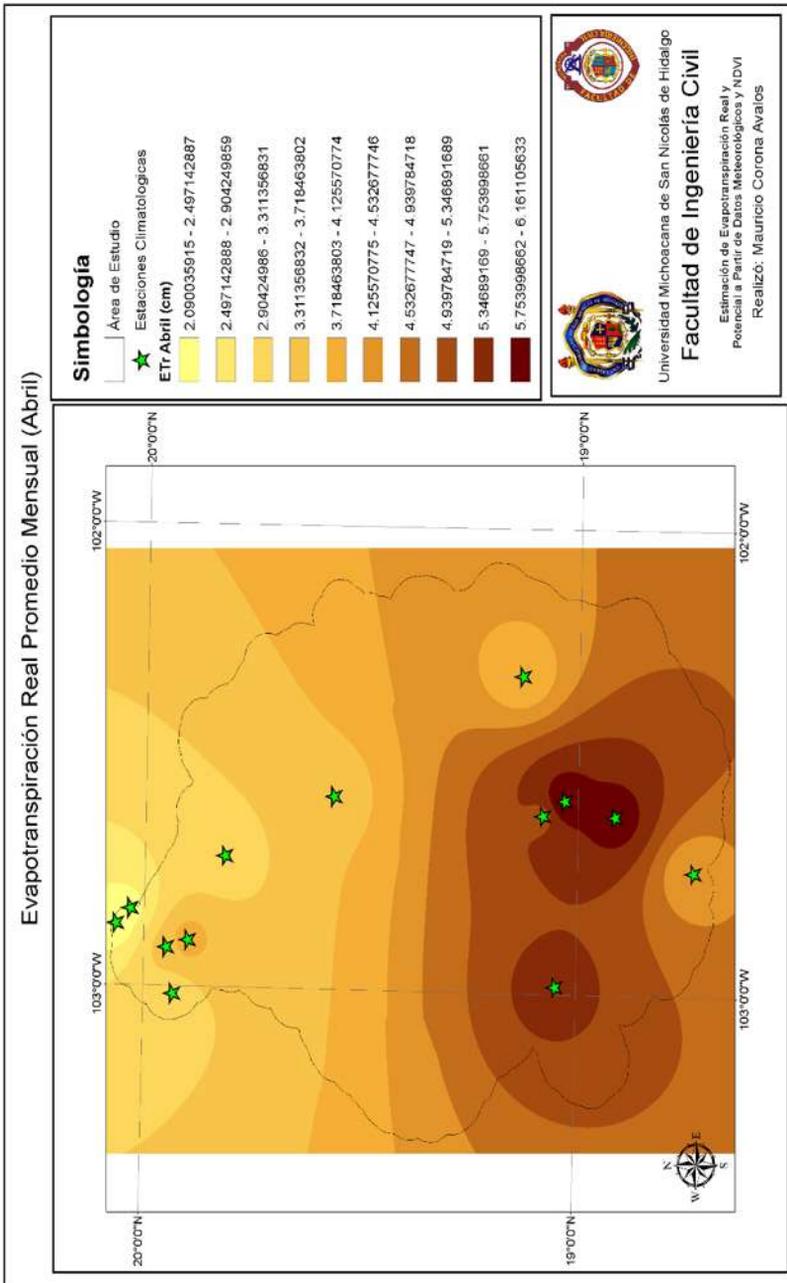


Mapa 25. - ETr Promedio Mensual Febrero (cm)

Evapotranspiración Real Promedio Mensual (Marzo)

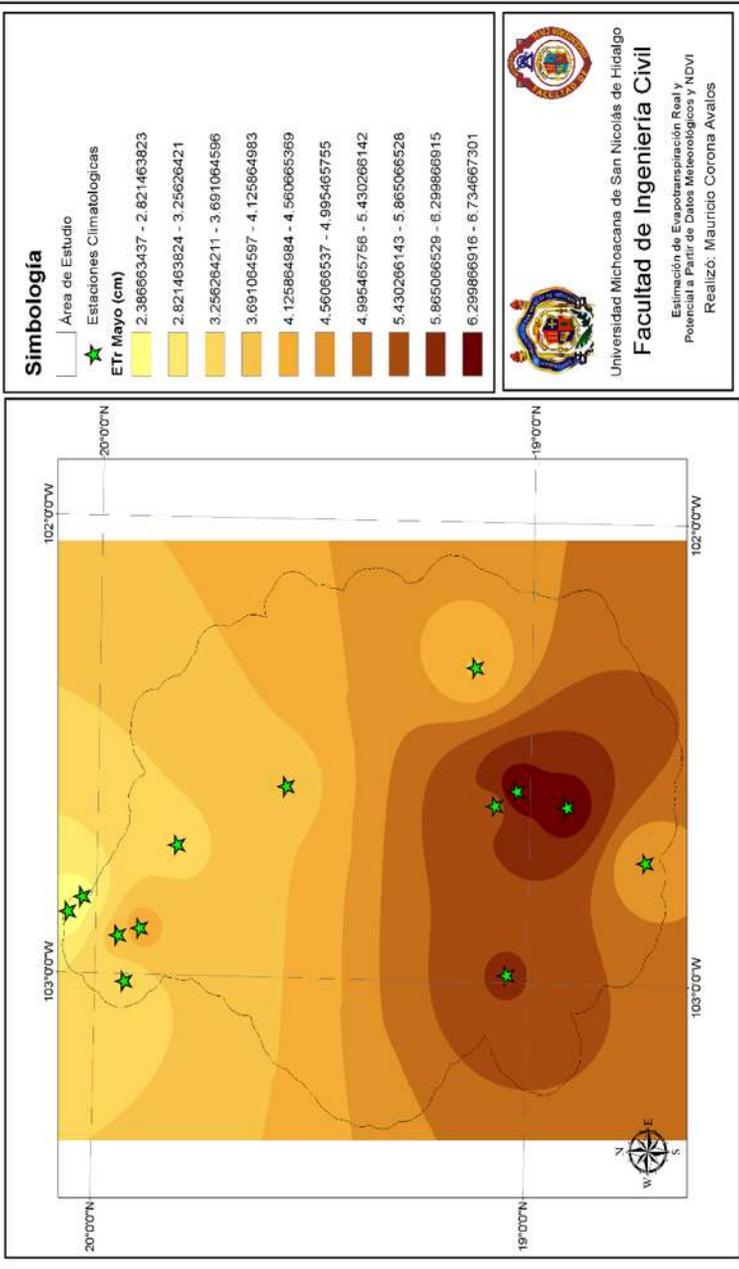


Mapa 26.- ETr Promedio Mensual Marzo (cm)



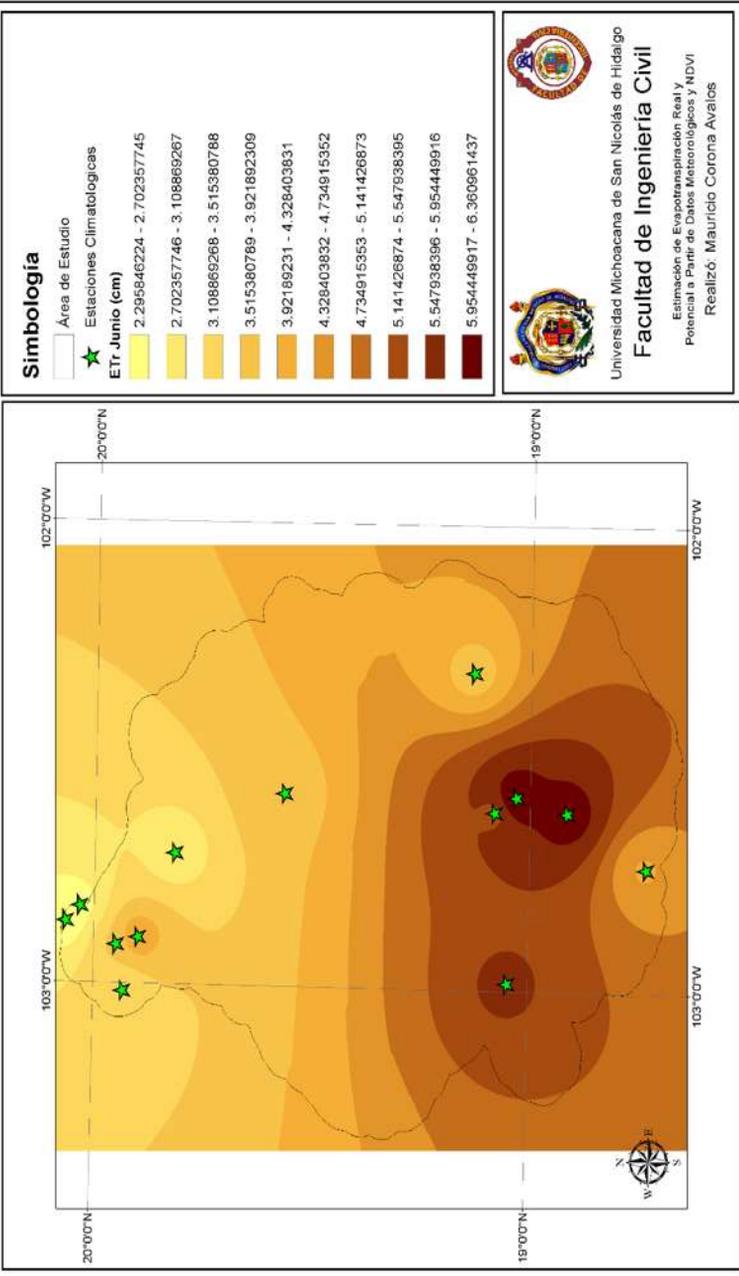
Mapa 27.- ETr Promedio Mensual Abril (cm)

Evapotranspiración Real Promedio Mensual (Mayo)



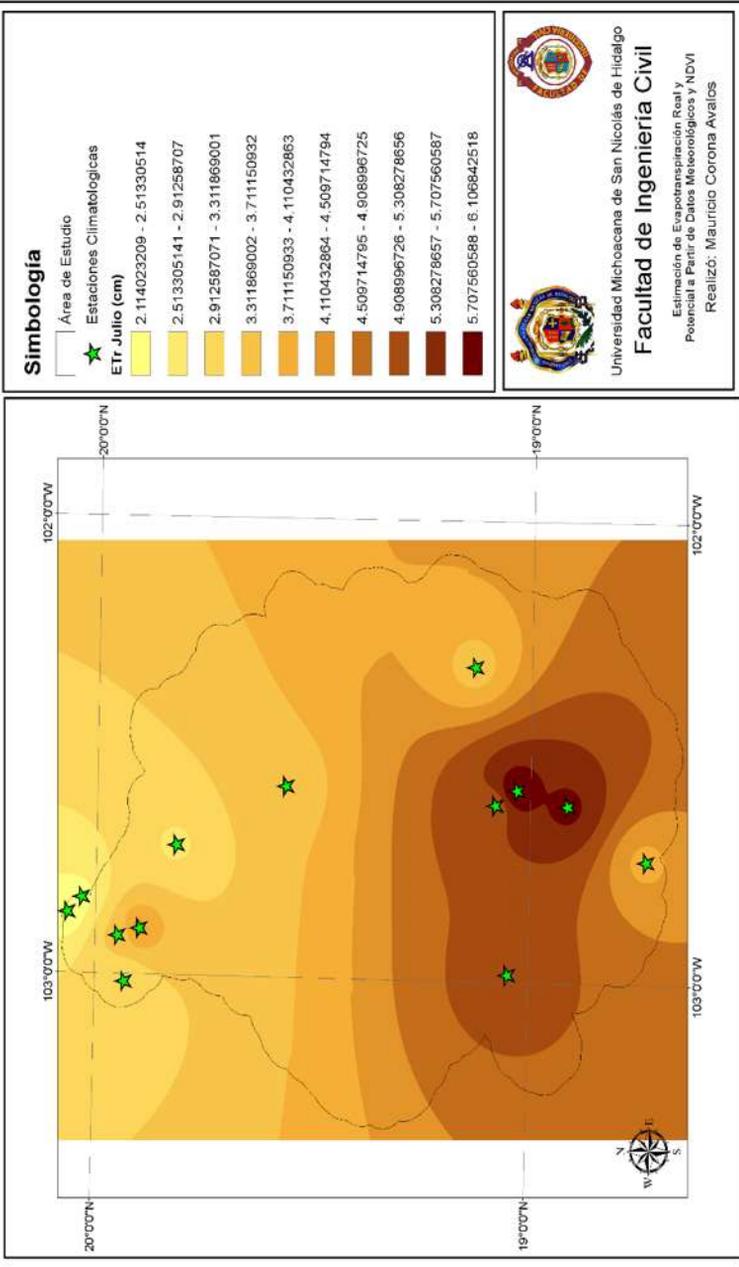
Mapa 28.- ETr Promedio Mensual Mayo (cm)

Evapotranspiración Real Promedio Mensual (Junio)



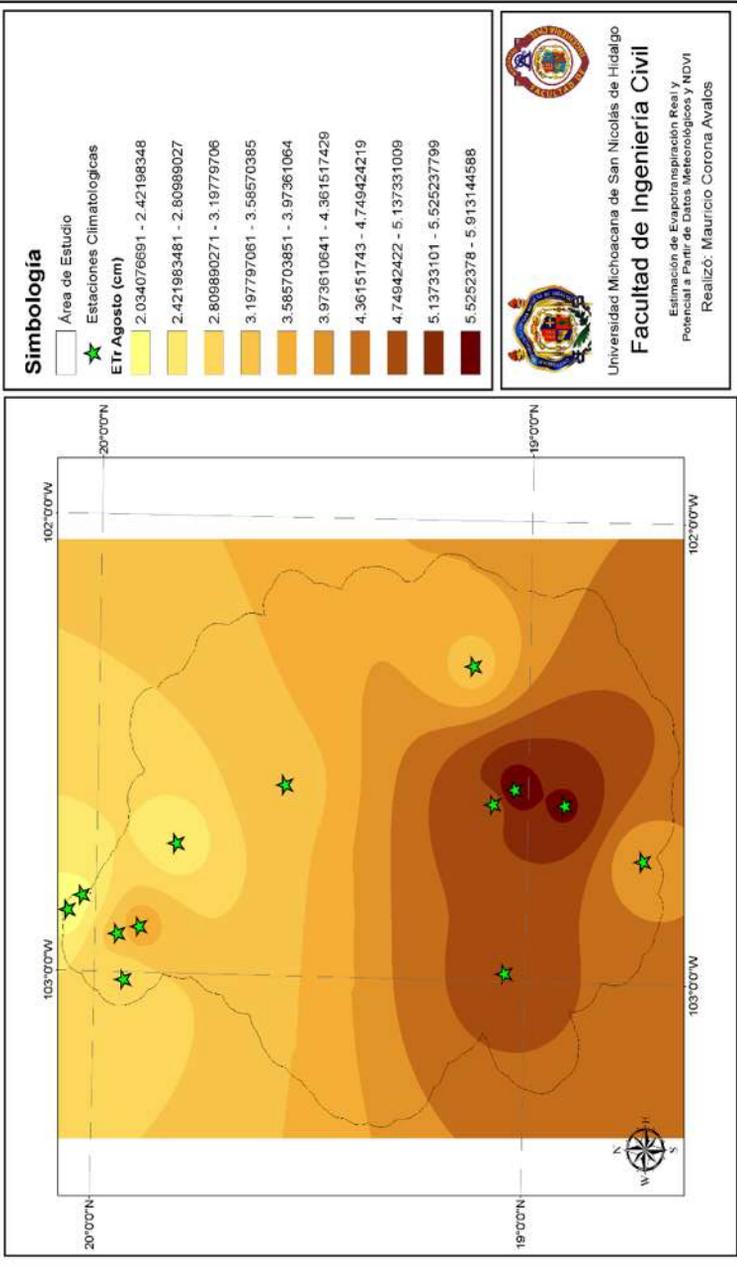
Mapa 29.- ETr Promedio Mensual Junio (cm)

Evapotranspiración Real Promedio Mensual (Julio)

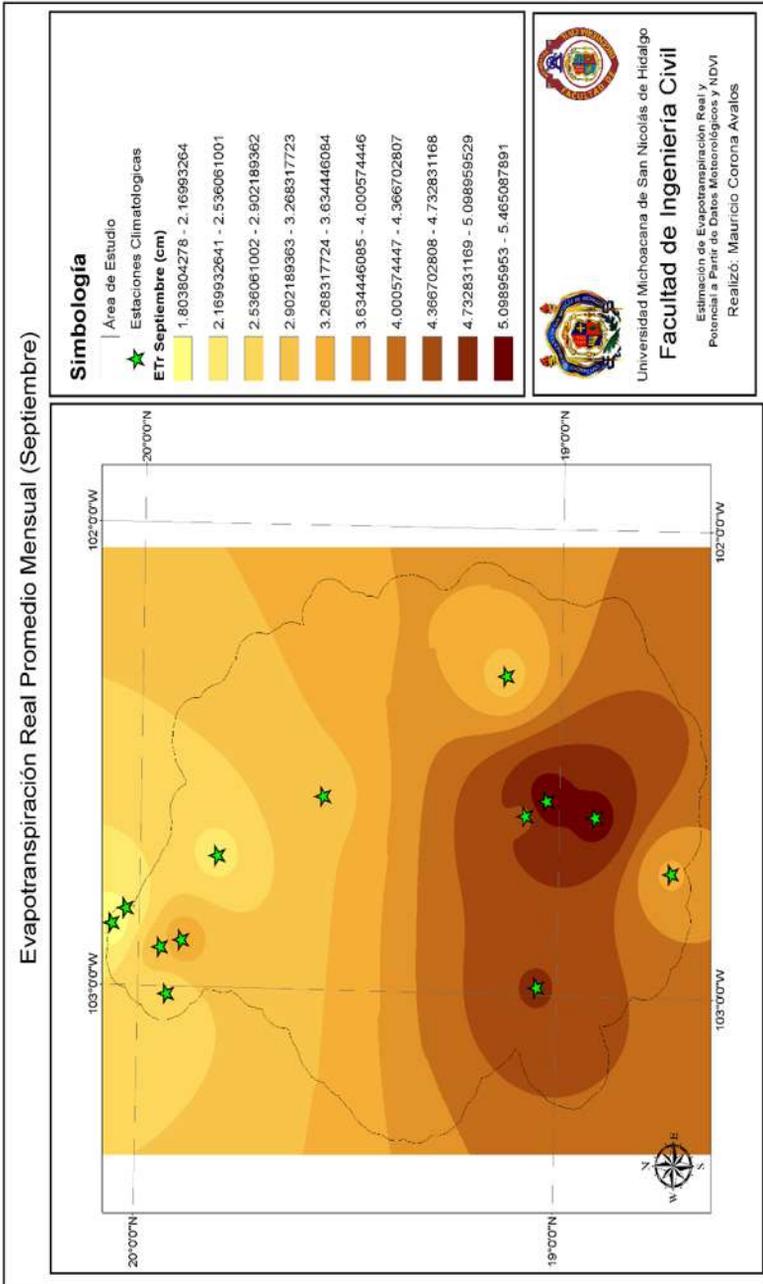


Mapa 30.- ETr Promedio Mensual Julio (cm)

Evapotranspiración Real Promedio Mensual (Agosto)



Mapa 31.- ETr Promedio Mensual Agosto (cm)



Mapa 32.- ETr Promedio Mensual Septiembre (cm)

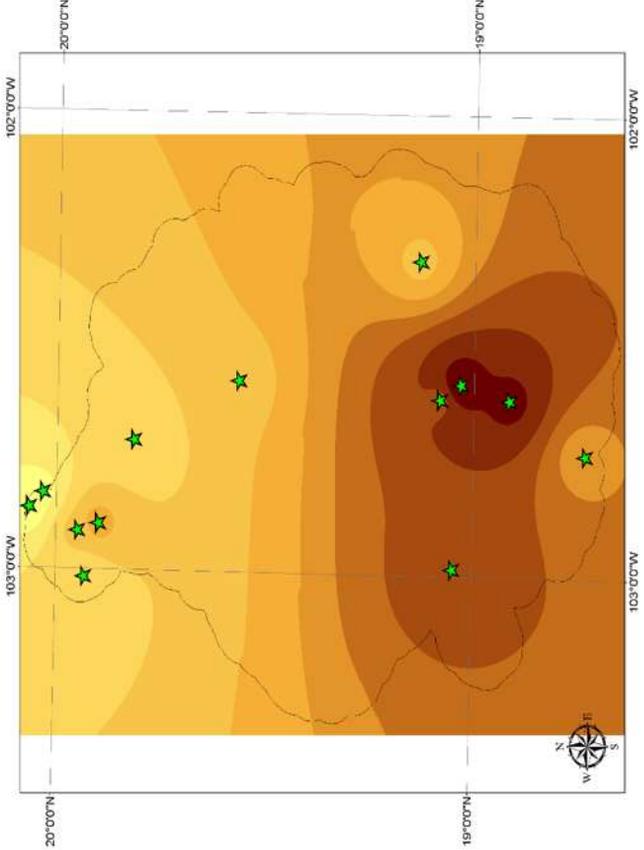
Evapotranspiración Real Promedio Mensual (Octubre)

Simbología

- ▭ Área de Estudio
- ★ Estaciones Climatológicas

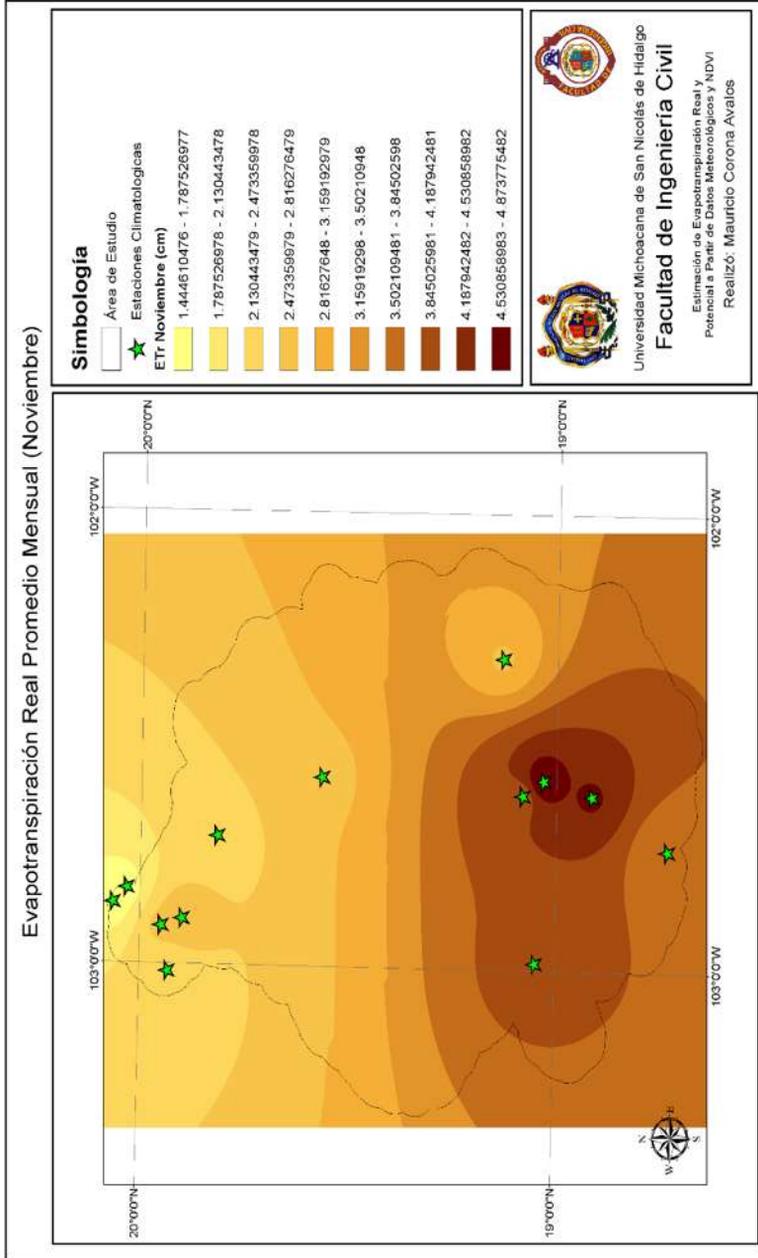
ETR: Octubre (cm)

1.6628240'16 - 2.0544442537
2.054442538 - 2.426061058
2.426061059 - 2.797679579
2.79767958 - 3.1692981
3.169298101 - 3.540916622
3.540916623 - 3.912535143
3.912535144 - 4.284153664
4.284153665 - 4.655772185
4.655772186 - 5.027390707
5.027390708 - 5.399009228

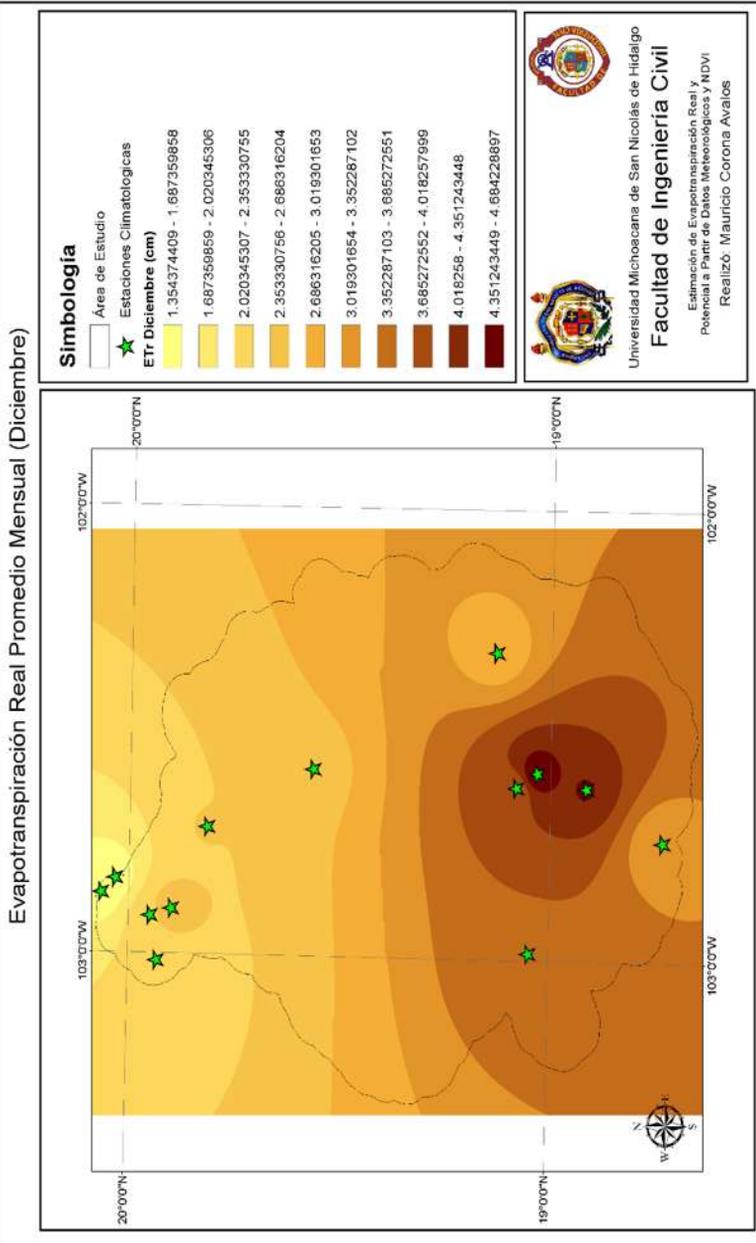


Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Civil
 Estimación de Evapotranspiración Real y
 Potencial a Partir de Datos Meteorológicos y NDVI
 Realizó: Mauricio Corona Avalos

Mapa 33.- Promedio Mensual Octubre (cm)



Mapa 34.- Promedio Mensual Noviembre (cm)



Mapa 35.- Promedio Mensual Diciembre (cm)



Conclusiones



5.- Conclusiones

De acuerdo a los resultados, podemos observar que la factibilidad de los modelos de estimación obtenidos en la determinación de ETR y ETP para la cuenca del Río Tepalcatepec se basan en la relación encontrada entre las variables respuesta ETr y ETp para ser preciso con las variables de Temperatura y NDVI donde la variable independiente de la Temperatura es la que presenta una mejor relación lineal con ETP, aunque la de NDVI también es importante en la predicción de este parámetro, como lo demostró la prueba de regresión lineal múltiple y simple.

Por su parte, en el caso de ETR se pudo observar que aun después de considerar pocas variables esta seguía teniendo una correlación un poco baja pero finalmente aceptable entre la ETp y las demás variables.

Todo esto debido al análisis de regresión individual aplicada a cada una de las estaciones meteorológicas ya que estas permitieron explicar el comportamiento de la regresión basada en el conjunto completo de datos por lo que se pudo generar una correcta selección de las estaciones tanto para la variable ETR como para la variable ETP.

Por esto mismo se han obtenido modelos que permiten estimar espacialmente ETR y ETP y que a partir de los mismos se pudieron realizar mapas de dichas variables sin necesidad de recurrir a datos meteorológicos completos.

Por lo que podemos concluir que estos modelos pueden ser utilizados para predecir un conjunto de datos mientras se cumplan las siguientes recomendaciones.

RECOMENDACIONES

1. Verificación de los estadísticos con el propósito de observar si puede o no ser utilizado el llenado previo de las estaciones con la temperatura media mensual
2. Generar un análisis estadístico de regresión lineal múltiple y simple para cada estación con el propósito de generar una buena selección de las estaciones
3. Verificación de la matriz de correlación de cada estación para conocer y saber el comportamiento correcto de cada una
4. Generar una correcta corrección de las imágenes satelitales y extracción de ellas

Una vez comprendiendo esto, pude llegar a la conclusión que si es posible adoptar esta metodología para la estimación de estas variantes aunque yo consideraría la implementación de satélites de mayor rango de datos para esta clase de proyectos ya que estos son indispensables para tener un mayor rango de información que aunque se puede tomar como poca investigación hablando de términos generales es indispensable para su implementación en estudios de mayor peso hidrológico, por lo que es posible, y si a este se le aumenta un archivo de calibración creo yo que es posible llegar a un modelo más real.

Otra de las conclusiones a las que pude llegar es que ya con este llenado y tomando un promedio general de toda la rama histórica de la variante del NDVI, pude observar que este es de 0.18 por lo que se podría decir que la planta sufre de un déficit hídrico lo cual es fácilmente explicado por la zona en la que se encuentra o de lo contrario se predeciría que sufre de alguna plaga y enfermedad.



Líneas de
Investigación

Futuras



Líneas de Investigación Futuras

En este proyecto se ha llevado a cabo un estudio teórico sobre la implementación del índice normalizado de vegetación (NDVI), así como su aplicación en el campo de la geoestadística.

En ella he observado que la temática es muy diversa y ofrece múltiples líneas de investigación que se pueden seguir para profundizar en su conocimiento:

- Mejoramiento de la discriminación de cubiertas vegetales midiendo el vigor de las plantas y la producción de la biomasa.
- Medición del comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas que permite determinar si la vegetación se encuentra sana o si tiene algún grado de estrés.
- Clasificación de áreas sembradas a partir de imágenes satelitales utilizando el índice NDVI.



Referencias



Referencias

- Alonso Sarría, F. (s. f.). 1 fundamentos de la teledetección. Universidad de Murcia. Recuperado 7 de diciembre de 2020, de <https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node69.html>
- Domingo, F., Villagarcía, L. y Were, A. 2002. ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. Ecosistemas 2003/1. Recuperado 7 de diciembre de 2020, de <http://www.aeet.org/ecosistemas/031/informe1.htm>
- EarthExplorer. (s. f.). Earth Explorer. Recuperado 1 de mayo de 2018, de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Libra. (s. f.). libra. Recuperado 11 de abril de 2021, de <https://libra.developmentseed.org/>
- Base de Datos del CLICOM. (s. f.). Clicom. <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Sotelo, G. (1974). Hidráulica general I: Fundamentos: 1 (1.a ed.). Editorial Limusa.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (s. f.). Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad [13,743] - CONABIO. CONABIO. Recuperado 12 de junio de 2021, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- DOF - Diario Oficial de la Federación. (s. f.). Norma 011 CONAGUA. Recuperado 12 de junio de 2021, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015
- Sánchez-Toribio, M.I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geofoma Ediciones, 35 pp.
- Figura 2.- Representación Descriptiva de la Teledetección. (s.f.), [Ilustración].

https://cadenaser.com/ser/2017/01/18/ciencia/1484759021_791854.html

- Figura 3.- Espectrograma de la Superficie. (s. f.). [Ilustración]. <https://politecnicaldevila.usal.es/2020/02/03/maria-sanchez-aparicio-aplicacion-de-la-teledeteccion-indices-espectrales/?hcb=1>
- Ciclo Hidrológico del Agua. (s. f.). [Ilustración]. https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Ciclo-hidrologico-del-agua-Fuente-Aparicio-1997-Fundamentos-de-Hidrologia_fig2_343004923?hcb=1

Índice de Figuras

Figura 1.- Ciclo Hidrológico del Agua	3
Figura 2.- Representación Descriptiva de la Teledetección	7
Figura 3.- Espectrograma de la Superficie.....	9
Figura 4.- Selección de la Zona de Estudio	42
Figura 5.- Selección de la Zona de Estudio en Libra (ruta 2846)	50
Figura 6.- Corrección Radiométrica.....	52
Figura 7.- Error Atmosférico (septiembre 2018).....	52
Figura 8.- Herramienta Combinar	53
Figura 9.- Obtención del Color Natural (septiembre 2018)	54
Figura 10.- Corrección Atmosférica	54
Figura 11.- Corrección Atmosférica Nítida (septiembre 2018)	55
Figura 12.- Generación de Mosaicos (septiembre 2018)	57
Figura 13.- Calculo del NDVI (enero 2000).....	58
Figura 14.- NDVI (enero 2000)	59
Figura 15.- Extracción del NDVI (septiembre 2018).....	60
Figura 16.- Delimitación del Distrito de Riego (marzo - septiembre 2018)	62
Figura 17.- Obtención de la Temperatura	66
Figura 18.- Variabilidad Individual	82
Figura 19.- Correlación Entre Variables.....	84
Figura 20.- Variabilidad Individual Corregida	87
Figura 21.- Promedio Mensual (NDVI).....	89
Figura 22.- Promedio Mensual (ETp).....	90
Figura 23.- Promedio Anual (NDVI).....	91
Figura 24.- Promedio Anual (ETp).....	91
Figura 25.- Promedio Anual de ETr (cm).....	109
Figura 26.- Promedio Mensual de ETr (cm).....	110
Figura 27.- Comportamiento de la ET (cm)	112

Índice de Tablas

Tabla 1.- Porcentaje del área del municipio dentro de la cuenca.....	20
Tabla 2.- Constante Ka para Cálculo de la Evapotranspiración de Thornthwaite	39
Tabla 3.- Imágenes Satelitales Disponibles (Landsat 7)	48
Tabla 4.- Imágenes Satelitales Disponibles (Landsat 8)	50
Tabla 5.- Concentrado de NDVI (septiembre 2018)	61
Tabla 6.- Listado de Estaciones Meteorológicas	64
Tabla 7.- Promedio Anual	70
Tabla 8.- Estadísticos.....	71
Tabla 9.- Promedio Mensual	73
Tabla 10.- Segundos Estadísticos.....	74
Tabla 11.- Cálculo de la Evapotranspiración Potencial	75
Tabla 12.- Promedio Anual de ETp	79
Tabla 13.- Matriz de Correlación Principal	84
Tabla 14.- Matriz de Correlación Secundaria.....	85
Tabla 15.- Valoración de Estaciones.....	86
Tabla 16.- Matriz de Correlación Corregida.....	86
Tabla 17.- Estimación Futura de la ETp.....	88
Tabla 18.- Promedio Mensual	89
Tabla 19.- Promedio Anual	90
Tabla 20.- Calculo de la Evapotranspiración Real con Blaney.....	105
Tabla 21.- Caracterización del Uso y Tipo de Suelo.....	106
Tabla 22.- Extracción de Parámetro K por Estación	108
Tabla 23.- Promedio Anual de ETr.....	109
Tabla 24.- Promedio Mensual de ETr.....	110
Tabla 25.- Resultados	111
Tabla 26.- Matriz de Correlación de los Resultados	112

Índice de Mapas

Mapa 1.- Localización de la zona de Estudio 1	17
Mapa 2.- Localización de la zona de Estudio 2	18
Mapa 3.- Localización de la zona de Estudio 3	19
Mapa 4.- Hidrografía de la Zona de Estudio 1	22
Mapa 5.- Hidrografía de la Zona de Estudio 2	23
Mapa 6.- Hidrografía de la Zona de Estudio 3	24
Mapa 7.- Climatología de la Zona de Estudio	26
Mapa 8.- Uso y Tipo de Suelo de la Zona de Estudio	27
Mapa 9.- Estaciones Climatológicas de la Zona de Estudio	65
Mapa 10.- Evapotranspiración Promedio Anual (cm).....	80
Mapa 11.- ETp Promedio Mensual (Enero)	92
Mapa 12.- ETp Promedio Mensual (Febrero).....	93
Mapa 13.- ETp Promedio Mensual (Marzo).....	94
Mapa 14.- ETp Promedio Mensual (Abril).....	95
Mapa 15.- ETp Promedio Mensual (Mayo).....	96
Mapa 16.- ETp Promedio Mensual (Junio)	97
Mapa 17.- ETp Promedio Mensual (Julio)	98
Mapa 18.- ETp Promedio Mensual (Agosto)	99
Mapa 19.- ETp Promedio Mensual (Septiembre).....	100
Mapa 20.- ETp Promedio Mensual (Octubre).....	101
Mapa 21.- ETp Promedio Mensual (Noviembre).....	102
Mapa 22.- ETp Promedio Mensual (Diciembre).....	103
Mapa 23.- Parámetro K	107
Mapa 24.- ETr Promedio Mensual Enero (cm)	113
Mapa 25.- ETr Promedio Mensual Febrero (cm)	114
Mapa 26.- ETr Promedio Mensual Marzo (cm)	115
Mapa 27.- ETr Promedio Mensual Abril (cm)	116
Mapa 28.- ETr Promedio Mensual Mayo (cm)	117
Mapa 29.- ETr Promedio Mensual Junio (cm)	118
Mapa 30.- ETr Promedio Mensual Julio (cm).....	119

Mapa 31.- ETr Promedio Mensual Agosto (cm)120
Mapa 32.- ETr Promedio Mensual Septiembre (cm)121
Mapa 33.- Promedio Mensual Octubre (cm)122
Mapa 34.- Promedio Mensual Noviembre (cm).....123
Mapa 35.- Promedio Mensual Diciembre (cm).....124

Índice de Ecuaciones

<i>Ecuacion 1</i>	10
<i>Ecuacion 2</i>	14
<i>Ecuacion 3</i>	38
<i>Ecuacion 4</i>	38
<i>Ecuacion 5</i>	38
<i>Ecuacion 6</i>	38
<i>Ecuacion 7</i>	58
<i>Ecuacion 8</i>	85
<i>Ecuacion 9</i>	88
<i>Ecuacion 10</i>	104
<i>Ecuacion 11</i>	104
<i>Ecuacion 12</i>	105
<i>Ecuacion 13</i>	105

DATOS ADICIONALES

Agradecimientos:

A mis tutores:

“A la D.I.C.C.P. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE y al M.C.I.A. Iván Gonzales Arreguín, ya que, sin ustedes y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil.

Ya que sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado. Hoy puedo decir que ustedes formaron parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que los caracterizan.

Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, cuando más las necesite; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas.

Mil Gracias”

A los docentes:

“Hoy en día quiero dedicar este logro ya que, sin sus constantes palabras sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes mis profesores queridos, les debo mis conocimientos.

Donde quiera que vaya, los llevaré conmigo en mí transitar profesional. Su semilla de conocimientos, germinó en el alma y el espíritu.

Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.”

A la universidad:

Gracias a la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo por el apoyo que brindan como institución y los valores que imparten, es una fortuna contar con profesionales como ustedes. Aún en la distancia, no han dejado la educación al azar.

Son un equipo increíblemente comprometido y estamos agradecidos del apoyo brindado en cada acción.

Muchas gracias.

A mis padres:

“A María Adriana Avalos Aguilar e Ignacio Corona Méndez ya que ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio.

Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro mis amados padres, como una meta más conquistada. Orgullosa de haberlos elegido como mis padres y que estén a mi lado en este momento tan importante.

Gracias por ser quienes son y por creer en mí”

A mi novia:

Gracias a mi pareja Karina Elizabeth López López por entenderme en todo, gracias a ella porque en todo momento fue un apoyo incondicional en mi vida, fue la felicidad encajada en una sola persona, fue mi todo reflejado en otra persona a la cual yo amo demasiado, y por la cual estoy dispuesto a enfrentar todo y en todo momento.

Este mismo furor y pasión con la que describo el perfecto e incondicional apoyo de mi pareja, fue el mismo con el que desarrollé cada parte y punto de esta tesis, y por esto mismo puedo afirmar y pronosticar su éxito y agrado para cada uno de sus lectores.

Mis sinceras gracias para mi pareja, nunca podré terminar de agradecerle por tantas ayudas.

A mis compañeros y amigos:

“A mis amigos y compañeros de viaje Evaristo Galeana, Alfonso Constantino, José Luis Zaragoza, Laura Karina Macedo Reynada, Josué Sierra Torres, Francisco Reyes Romero, Larissa Cisneros Carbajal, Efrén Meza Cárdenas, Eva Ramírez Yepes, Estefanía Alva, Leonel Guzmán Gordillo,

Gerardo Guerrero, Samuel Zamorano Jacuinde, que me apoyaron en todo mi desarrollo emocional, social y profesional por lo que hoy que culminó esta maravillosa aventura no puedo dejar de recordar cuantas tardes y horas de trabajo nos juntamos a lo largo de mi formación.

Hoy me toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de vida y no puedo dejar de agradecerles por su apoyo y constancia, al estar en las horas más difíciles.

Gracias por estar siempre allí.”

Agradecimientos adicionales:

Además, hoy quiero agradecer la oportunidad que me brindaron los CE-AMH por haberme hecho parte de su equipo de trabajo.

Este apoyo me dio la confianza necesaria para adquirir más conocimientos ya que han sido de gran valor para mí.

Espero haber aportado valor a sus proyectos y metas, para seguir siendo una gran organización.

Gracias a esta institución por su apoyo y mi formación como futuro hidráulico del país.