



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Matemática

ESCALAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UNA ECORREGIÓN SEMIÁRIDA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestra en Ciencias en Ingeniería Matemática

Presenta:

Laura Melissa González Ramos

Dirigido por:

Dr. Samuel Villarreal Rodriguez

SINODALES

Dr. Samuel Villarreal Rodriguez

Presidente

Mario Guevara Santamaria

Secretario

Victor Antonio Aguilar

Vocal

Luisa Ramirez Granados

Suplente

Roberto Gomez Loenzo

Suplente

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala

Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña

Director de Investigación y Postgrado

Centro Universitario

Querétaro, QRO

México.

30 de mayo de 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

© 2023 - Laura Melissa González Ramos

All rights reserved.

A mi familia.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que contribuyeron a la realización de esta tesis. Sin su apoyo nada de esto habría sido posible.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, el Dr. Samuel Villarreal Rodríguez por haberme acompañado con paciencia en todo este proceso, por compartir su conocimiento conmigo, y por su apoyo y motivación para mejorar cada día.

Así mismo quisiera agradecer a mi codirector, el doctor Mario Guevara por sus enseñanzas sobre mapeo digital, por su asesoramiento, su retroalimentación y sabiduría en esta investigación, así como por creer en mi en todo este proceso.

Mi gratitud se extiende a todos mis profesores que estuvieron presentes en mi crecimiento personal. Especialmente quisiera agradecer al Dr. Roberto Gómez Loenzo quien estuvo apoyándome amablemente desde el inicio de este trayecto.

Agradezco enormemente a mis amigos y compañeros que se convirtieron en un apoyo fundamental en los momentos difíciles.

También quiero agradecer a mi familia por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi formación académica a lo largo de todos estos años. A pesar de la distancia siempre estuvieron conmigo brindándome la fuerza que necesitaba.

De la misma forma quiero agradecer a la universidad Autónoma de Querétaro por darme la oportunidad de cursar esta maestría.

Por último, mi más grande agradecimiento para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), quien me brindó su apoyo económico para realizar mis estudios y sin quienes no habría sido posible esto

Abstract

Estimating evapotranspiration (ET) at various temporal and spatial scales is essential for developing water and soil conservation strategies, as well as for understanding the hydrological cycle, especially in regions with low availability of water resources. Different in situ techniques allow for the precise measurement of ET at a limited spatial scale, and understanding ET at a regional spatial scale represents a significant modeling challenge. The aim of this study is to estimate evapotranspiration in a semi-arid ecoregion within the spatial domain of the North American Monsoon, based on data obtained from four turbulent flux covariance monitoring sites (CFT) and values from satellite products. The ET estimates were made for the year 2008, the only year in which there are joint records for the 4 monitoring sites. The predictive modeling technique used was Random Forest (RF), using 39 environmental covariables as predictors with information on topography, vegetation, hydrology, climate, biodiversity, and anthropogenic influence. The model was evaluated through cross-validation, and the mean squared error, the coefficient of determination, and the mean squared error were determined. The results showed that the Random Forest predictive model performed well ($R^2 = 0,8$) in estimating evapotranspiration during the evaluated year. The estimated ET for the region ranged from 0.30 to 3.9 mm/day, and its best predictors in order of importance were the leaf area index, precipitation, topographic diversity, annual temperature range, and accessibility. The study conducted in the ecoregion, composed of forests, savannas, crops, urban areas, and areas of sparse vegetation, among others, revealed a wide heterogeneity of terrestrial ecosystems. A marked seasonal variability in evapotranspiration was observed, with maximum values in the months of July to September in the wooded savannas and agricultural lands, which indicates the decisive influence of climatic factors and vegetation characteristics on regional water dynamics. The model's uncertainty varied between 0.005 and 0.19 mm/day. The highest values were presented in areas with sparse vegetation cover and urban environments, where the presence of impermeable surfaces and anthropogenic structures poses a challenge for precise quantification.

Resumen

Determinar la evapotranspiración (ET) en diferentes escalas de tiempo y espacio es esencial para formular planes de preservación de recursos hídricos y suelos, así como para comprender el ciclo del agua, particularmente en áreas con escasez de agua. Diversas técnicas de medición in situ permiten estimar la ET con exactitud en una escala espacial restringida, y abordar la ET a nivel regional es un desafío significativo en modelización. Este estudio tiene como meta calcular la evapotranspiración en una ecorregión semiárida dentro del ámbito del Monzón de Norteamérica, usando datos de cuatro estaciones de monitoreo de covarianza de flujos turbulentos (CFT) y datos de satélites. Se realizaron cálculos de la ET para 2008, el único año con registros conjuntos de los cuatro sitios. Se utilizó el método de modelado predictivo Random Forest (RF), con 39 variables ambientales como predictores, incluyendo información sobre topografía, vegetación, hidrología, clima, biodiversidad e impacto humano. El modelo se evaluó con validación cruzada y se calcularon el error cuadrático medio, el coeficiente de determinación y el error medio cuadrático. Los resultados indicaron que el modelo Random Forest tuvo un buen rendimiento ($R^2 = 0,8$) para predecir la evapotranspiración durante el año analizado. La ET estimada para la región varió entre 0.30 y 3.9 mm/día, y los predictores más relevantes fueron el índice de área foliar, la precipitación, la diversidad topográfica, el rango de temperatura anual y la accesibilidad. El estudio en la ecorregión, que incluye bosques, sabanas, cultivos, áreas urbanas y zonas de vegetación escasa, mostró una gran diversidad de ecosistemas terrestres. Se notó una variabilidad estacional significativa en la evapotranspiración, con valores máximos de julio a septiembre en sabanas arboladas y tierras de cultivo, destacando la importancia de los factores climáticos y las características de la vegetación en la dinámica hídrica regional. La incertidumbre del modelo osciló entre 0.005 y 0.19 mm/día, siendo más alta en áreas con poca cobertura vegetal y entornos urbanos, donde las superficies impermeables y las estructuras antropogénicas plantean retos para una medición precisa.

Índice general

Agradecimientos	I
Abstract	III
Resumen	V
Contenido	VII
Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Justificación	3
1.2. Descripción del problema	4
1.3. Preguntas de investigación	5
1.4. Hipótesis	5
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivos específicos	5
2. Revisión literaria	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Marco Teórico	9
2.2.1. Concepto de Evapotranspiración	9
2.2.2. Medición de la Evapotranspiración	10
2.2.3. Modelamiento Espacial	11
2.2.3.1. Modelamiento de la dinámica de la Evapotranspiración	11
2.2.4. Factores relacionados con la Evapotranspiración	15
2.2.4.1. Factores Topográficos	15
2.2.4.2. Factores Climáticos	16
2.2.4.3. Factores de la vegetación	17
2.2.5. Efecto de la Evapotranspiración	18
2.2.5.1. Efectos de la Evapotranspiración en el ecosistema	18
2.2.5.2. Efectos de la Evapotranspiración en el suelo	19

2.2.5.3. Efectos de la Evapotranspiración en el aire	19
3. Materiales y Métodos	21
3.1. Area de estudio	22
3.1.1. El Monzón de Norteamérica	22
3.1.2. Ecorregiones del Noroeste de Mexico	24
3.1.3. Definición de la región de estudio	24
3.1.4. Caracterización de la región de estudio	25
3.2. Recopilación de información	27
3.2.1. Recopilación de datos in-situ	27
3.2.1.1. Postprocesamiento de la información	29
3.2.1.2. Control de calidad de la información	30
3.2.2. Recopilación de datos de productos satelitales	30
3.2.2.1. Post procesamiento de los datos	33
3.2.3. Modelamiento	33
3.2.3.1. Exploración de variables	33
3.2.3.2. Ajuste del modelo	34
3.2.3.3. Variables óptimas para la predicción	34
3.2.3.4. Evaluación del modelo	35
3.2.3.5. Mapas de incertidumbre	35
4. Resultados	37
4.1. Caracterización a escala local	37
4.2. Balance de energía y balance hídrico	37
4.3. Modelado de la dinámica de la evapotranspiración	39
4.3.1. Variables que tienen influencia en la dinámica de la evapotranspiración	39
4.4. Ajuste del modelo e importancia de las covariables	42
4.5. Rendimiento del modelo	44
4.6. Predicciones	45
5. Discusión	47
6. Conclusión	51
Referencias	63

Índice de figuras

1.1. Nivel de estrés sobre los recursos de agua. Se nota que en el Noroeste de México, tanto en la región II como en la región III, hay un nivel alto de estrés sobre los recursos hídricos.	4
2.1. Ilustración de la evapotranspiración	10
2.2. En la base tenemos los suelos, la vegetación y posteriormente en la flecha blanca tenemos la capa límite de la atmósfera, la cual entra en contacto con todos los flujos y energía que se genera dentro de un ecosistema.	11
2.3. Un buen hiperplano de separación es un hiperplano que maximiza la distancia a los puntos de datos de entrenamiento más cercanos[1]	14
2.4. Diagrama de clasificador Bosques Aleatorios[2]	15
3.1. Diagrama de flujo para el proceso de escalado de datos utilizando observaciones terrestres y datos satelitales	21
3.2. Porcentaje de la precipitación total anual que se produce durante los meses de julio a septiembre, en el periodo 2000-2008 utilizando datos de pluviómetros unificados del CPC.	23
3.3. Lugares que reciben al menos el 50 % de sus precipitaciones anuales en Julio, Agosto y Septiembre.	23
3.4. Construcción de la región de estudio.	24
3.5. Región de estudio.	25
3.6. Topografía y cobertura vegetal de la región de estudio.	26
3.7. Ubicación de los cuatro sitios	28
4.1. Series temporales de las distintas variables para cada sitio	38
4.2. Correlación de Pearson	41
4.3. Gráfica de correlación de variables	42
4.4. Rendimiento de los modelos en el proceso de selección de covariables mediante el método RFE. El punto azul indica el subconjunto con el RMSE más bajo tras la validación cruzada.	42
4.5. importancia de variables	43
4.6. Valores observados Vs. predichos del conjunto de datos de validación cruzada (k=10) del modelo de Bosques Aleatorios, para predecir la evapotranspiración.	44
4.7. Mapa de predicción de ET para cada mes del año 2008.	45

4.8. Mapas de incertidumbre.	46
--------------------------------------	----

Índice de cuadros

2.1. Variables topográficas que afectan la dinámica de la evapotranspiración según la revisión bibliográfica.	16
2.2. variables utilizadas para estimar el estado de la vegetación.	18
3.1. Ubicaciones seleccionadas para la recolección del conjunto de datos de evapotrans- piración	27
3.2. Resumen de los datos recogidos para el área de estudio	29
4.1. Cierre de balances	39
4.2. Covariables seleccionadas para el proceso de modelamiento de la evapotranspiración	40
4.3. Estadísticas de validación cruzada del modelo para predecir la evapotrans- piración. R^2 : coeficiente de determinación, MAE : error medio absoluto, $RMSE$: error cuadrático medio	44

Introducción

Cerca del 30 % de la superficie terrestre se encuentra cubierta por áreas semiáridas. En México, estos ecosistemas abarcan aproximadamente el 60 % del país [3], incluyendo ecorregiones como las elevaciones semiáridas del sur y los desiertos del norte.[4]. Estas regiones son importantes porque albergan casi el 40 % de la biodiversidad de México y la mitad de sus culturas indígenas. Están compuestas principalmente por diferentes tipos de cobertura del suelo, destacándose los pastizales, sabanas y matorrales. La relevancia de estos ecosistemas a nivel nacional, tanto desde una perspectiva ambiental como social, radica en la vulnerabilidad de sus servicios ecosistémicos (regulación del agua, conservación de la biodiversidad, protección del suelo contra la erosión y la degradación, y apoyo a las comunidades locales) frente al cambio climático. Esto incluye un aumento en la temperatura media estacional y anual, así como una mayor variabilidad en los patrones de precipitación (frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia)[5]. Este impacto se debe a que tanto la captura de carbono como la evapotranspiración están íntimamente ligadas a la escasez de agua y la alta demanda de evaporación de la atmósfera, condiciones que predominan durante la mayor parte del tiempo en estos ecosistemas[6]. Siendo la evapotranspiración una variable clave para entender la relación presente entre el clima, el ciclo hidrológico, y la vegetación.

La evapotranspiración (ET) es el proceso que determina cuánta agua se pierde en el ambiente. Aquí la energía del sol permite que el agua ascienda desde el suelo y a través de las plantas hacia la atmósfera[7]. Este proceso de "subida" es la combinación de dos pasos: la evaporación directamente del suelo, la cual se produce cuando la energía térmica del ambiente es suficiente para romper los enlaces intermoleculares del agua y convertirla en vapor, y la transpiración de las plantas, que es el proceso por el cual las plantas expulsan vapor de agua a través de sus estomas como parte del proceso de captura de CO_2 [8].

La evapotranspiración es un proceso que se ve afectado por diversas características. Por un lado, factores climáticos como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento juegan un papel crucial al determinar cuánta agua se evapora de la atmósfera[9][10]. En situaciones donde hay altas temperaturas y baja humedad relativa, la cantidad de agua que se evapora tiende a ser mayor. Por otro lado, las diferentes fases del desarrollo de las plantas, conocidas como etapas fenológicas, también tienen un impacto en la evapotranspiración. Durante el crecimiento y la floración, por ejemplo, las plantas pueden tener una mayor transpiración debido

al aumento de la actividad metabólica y de la superficie foliar[11]. Además, la cantidad de agua presente en el suelo es un factor crucial para la evapotranspiración, ya que proporciona la humedad necesaria para la evaporación y la transpiración. La frecuencia e intensidad de las lluvias, así como el patrón estacional de las precipitaciones, influyen directamente en la disponibilidad de agua en el suelo[12]. Cuando hay escasez de agua, tanto la evaporación como la transpiración se reducen, lo que afecta el funcionamiento de los ecosistemas y la disponibilidad de recursos hídricos.

La evapotranspiración (ET) es una variable climática esencial en el funcionamiento de los ecosistemas, ya que conecta el balance energético de la superficie con el ciclo del agua y el ciclo del carbono. Entender la ET a nivel regional puede mejorar nuestro conocimiento sobre cómo interactúan el agua, el calor y el carbono, y cómo estas interacciones afectan al clima. Esto es muy importante para manejar los recursos hídricos de manera efectiva [13]. Sin embargo, medir la ET directamente en grandes áreas es complicado debido a las diferencias en las condiciones de cada lugar y a que se requiere mucho equipo para hacerlo [14]. Por lo tanto, se han creado diferentes métodos y aproximaciones para estimar la ET a nivel regional usando mediciones limitadas en puntos específicos o datos obtenidos de satélites.

Existen varios métodos para calcular la evapotranspiración en una escala más grande, y la elección de cuál usar depende de qué datos estén disponibles, la extensión del área que se quiere estudiar y los objetivos específicos de la investigación. En las últimas décadas, se han hecho muchos estudios sobre este tema, algunos de estos basados en modelos semiempíricos como el método de coeficiente de cultivo [8], la ecuación de Priestley-Taylor [15] y la ecuación de Penman-Monteith [16]. Sin embargo, estos métodos estiman la evapotranspiración potencial, es decir, la evapotranspiración que solo depende de la cantidad de energía en el ambiente y no de la humedad presente. Siendo un mayor desafío el poder estimar la ET real, la cual representa la ET limitada tanto por las condicionantes energéticas y de humedad. Por lo tanto, el estimar la ET real de forma relativamente precisa a una escala regional, representa un desafío importante[17].

En este sentido los modelos de aprendizaje automático han demostrado ser una herramienta útil al superar la limitación de múltiples variables requeridas para estimar la ET utilizando métodos tradicionales como el método de Penman-Monteith (PM)[18]. Esta habilidad de los modelos de aprendizaje automático para operar con un número reducido de variables facilita el proceso de hacer estimaciones[19]. En particular, las redes neuronales artificiales(RNA) han sido utilizadas en estudios para estimar la ET real, y han demostrado su eficacia al comparar los resultados con mediciones lisimétricas[20]. Además de las RNA, se han utilizado otros algoritmos de aprendizaje automático como máquinas de vector de soporte[19], bosques aleatorios[21], sistemas de inferencia neuro-difusos adaptativos[22], árboles de regresión[23] y algoritmos de aprendizaje profundo[24].

Estos modelos permiten una estimación fiable de la ET al aprovechar las relaciones complejas y no lineales entre las variables meteorológicas y la ET[25]. Al entrenar los modelos con datos de entrada y salidas conocidas, pueden aprender patrones y relaciones subyacentes, lo que les permite hacer predicciones precisas en nuevos conjuntos de datos.

En este trabajo, se utilizan mediciones puntuales de ET obtenidas a través de la técnica de covarianza de flujos turbulentos en cuatro sitios de la red AmeriFlux. Estos datos se usan como referencia para entrenar y validar un modelo de aprendizaje automático basado en bosques aleatorios. Además de las mediciones de sitio, se recopilaron variables provenientes de productos satelitales que se utilizan como variables predictoras en el modelo. El objetivo principal de este trabajo es escalar la

estimación de la evapotranspiración a nivel regional en un área de estudio que corresponde a una ecorregión semiárida y donde se presenta el Monzón de Norteamérica. El uso de técnica de bosques aleatorios, permitió aprovechar las mediciones puntuales de evapotranspiración y las variables satelitales para realizar estimaciones a mayor escala.

La motivación principal del presente trabajo se enfoca en dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cuál es la dinámica de la evapotranspiración a escala regional derivada de datos de covarianza de flujos turbulentos y que variables ambientales tienen una mayor influencia en este proceso? En este sentido se plantea la siguiente hipótesis: Los factores ambientales que afectan más a la evapotranspiración en la región estarán determinados por la cantidad de agua disponible durante la temporada seca, mientras que en la temporada de lluvias estarán influidos por la cantidad de energía disponible.

La novedad de este trabajo se destaca por abordar el desafío de predecir la evapotranspiración utilizando un conjunto limitado de datos disponibles. Esto es especialmente relevante, ya que la estimación precisa de la evapotranspiración a escala regional generalmente requiere una gran cantidad de datos meteorológicos y mediciones directas, lo cual puede ser costoso y difícil de obtener. Además, este estudio representa un primer esfuerzo por escalar las mediciones de evapotranspiración de la red MexFlux. Esto es significativo para entender de manera más profunda cómo funciona la evapotranspiración a nivel regional y cómo se relaciona con las condiciones ambientales en la zona que se está estudiando.

1.1. Justificación

Casi la mitad de la superficie mundial esta cubierta por regiones áridas y semiáridas, las cuales son habitadas por aproximadamente más de 2.500 millones de personas. Regionalmente, el noroeste de México es altamente susceptible a cambios en la temperatura y en los patrones de precipitaciones, volviéndola una región altamente susceptible al cambio climático y a procesos de desertificación [26]. El mal manejo del agua y del suelo, así como el cambio climático aumentarían la desertificación, ocasionando la expansión de dichas regiones [27]. Es esencial conocer y comprender a fondo el balance hídrico en estas áreas, ya que esto permite crear estrategias para manejar el agua de manera eficaz. La evapotranspiración juega un papel clave en el balance hídrico. Por ejemplo, en la agricultura, la evapotranspiración es una variable muy importante porque está relacionada con la salud de los cultivos. A menudo se hacen análisis para evaluar la evapotranspiración en función de las necesidades de los cultivos y así desarrollar modelos para optimizar el riego. El objetivo es encontrar un equilibrio adecuado entre el uso del agua y la productividad de los cultivos. [28].

El Noreste de México alberga regiones semiáridas que incluyen algunos de los principales desiertos del mundo, caracterizándose por su alta temperatura y evaporación, variaciones climáticas extremas y escasez de lluvias, cubierta principalmente por matorrales, bosques y pastizales. Esta área ha sufrido una sobreexplotación del suelo, con la agricultura y el pastoreo como las principales alteraciones de este ecosistema. La agricultura de riego se ha distinguido por el aumento de la productividad mediante la implementación de tecnologías de producción avanzadas y la utilización intensiva de los recursos del suelo y agua. [29]. Todo esto lleva a una alteración del balance hídrico regional debido a los cambios en la composición de las especies, la cobertura vegetal y las propiedades del suelo (Figura ??).



Figura 1.1: Nivel de estrés sobre los recursos de agua. Se nota que en el Noroeste de México, tanto en la región II como en la región III, hay un nivel alto de estrés sobre los recursos hídricos.

Entonces, es crucial determinar con exactitud la evapotranspiración (ET) en distintas escalas temporales y geográficas para formular estrategias de preservación del agua y el suelo, y para entender el ciclo del agua, especialmente en zonas con escasez de recursos hídricos. Por lo tanto, este estudio se enfoca en calcular la evapotranspiración en una región semiárida, con especial atención en el área influenciada por el Monzón de Norteamérica dentro de México..

1.2. Descripción del problema

En las zonas semiáridas, la cantidad de agua disponible es crucial para restringir los procesos biológicos de los ecosistemas[30]. En estos climas, los recursos hídricos son limitados debido a las características propias de la región. Si además consideramos el crecimiento de la población, el uso de agua para irrigación y la extracción de agua subterránea, la disponibilidad de este recurso será cada vez más reducida[31]. En la mayoría de los ecosistemas terrestres con vegetación, la evapotranspiración (ET) representa poco más del 50 % de la pérdida total de agua, y en particular para las regiones semiáridas, la evapotranspiración suele ser alrededor del 80 % de la precipitación [32]. Por lo tanto, es importante cuantificar la variabilidad de la ET en las regiones semiáridas, ya que esto ayuda a entender la relación entre el suelo, las plantas y la atmósfera, así como el balance hídrico de la región, lo que permite un mejor manejo del agua[33]. Sin embargo, la evapotranspiración es una de las variables más desafiantes de estimar, ya que involucra procesos físicos, biológicos y químicos, presentando una alta variabilidad en el tiempo y el espacio[34, 35, 36].

Para estimar la evapotranspiración existen distintos métodos. El método más directo para medir la evapotranspiración es el de covarianza de flujos turbulentos[37]. Estas mediciones se logran por

medio de torres de flujos que son instaladas en distintos sitio. No obstante, las torres que estan midiendo en forma directa la evapotranspiración tienen una resolución espacial limitada, de modo que proporcionan información de una relativamente pequeña superficie del ecosistema para un lugar específico y no proporcionan la evapotranspiración a una escala regional. Sin embargo, las mediciones que proporcionan las torres de flujos tienen el potencial de ser ampliadas. Por lo tanto, el objetivo es extender estas mediciones para poder calcular la evapotranspiración a una escala regional.

1.3. Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es la dinámica de la evapotranspiración a escala regional derivada de datos de la CFT?
2. ¿Qué variables ambientales tienen una mayor influencia en la evapotranspiración regional?
3. ¿Cuál modelo de Aprendizaje Automático provee el mejor ajuste de los datos? ¿Un ensamble de estos podría mejorar la calidad de la predicción?

1.4. Hipótesis

Los factores ambientales que afectan más a la evapotranspiración en la región estarán determinados por la cantidad de agua disponible durante la temporada seca, mientras que en la temporada de lluvias estarán influidos por la cantidad de energía disponible.

1.5. Objetivos

Realizar un escalamiento ascendente de los datos de evapotranspiración obtenidos a partir de torres de flujo, para una ecorregión semiárida donde tiene presencia el Monzón de Norteamérica.

1.5.1. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Describir cómo funciona la evapotranspiración a nivel local.
- Identificar cuáles son las variables ambientales que tienen mayor impacto en el comportamiento de la evapotranspiración.
- Escalar espacialmente la ET a partir de la aplicación de modelos individuales o de ensamblaje basado en técnicas de aprendizaje automatizado.

Revisión literaria

2.1. Antecedentes

Para lograr una estimación precisa de la evapotranspiración (ET), se han realizado diversas investigaciones. Por ejemplo, para abordar el problema de la cuantificación de la ET, el trabajo denominado "Spatial and Temporal Variation in Evapotranspiration"[38] llevó a cabo investigaciones en campos de maíz y soja en el centro de Iowa, Estados Unidos. Este estudio proporcionó información sobre cómo la gestión de cultivos interactúa con el paisaje para influir en la variación de la ET. Se utilizó el método del balance energético, midiendo el intercambio de vapor de agua y dióxido de carbono. Se encontró que la variación temporal de la ET entre años depende de la cantidad de precipitación almacenada en el perfil del suelo. Si hay suficiente capacidad de almacenamiento, la variación anual de la ET dependerá más de la energía disponible que de la cantidad de agua. Además, se observó que la variación espacial de la ET dentro de un campo puede verse afectada por el impacto de las prácticas de manejo del suelo en los patrones de crecimiento de los cultivos.

Asimismo, con este mismo enfoque existe un estudio para estimar la ET de la superficie terrestre en el delta del río amarillo ubicado en Dongying, Shandong, China[39] mediante el uso de datos del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) para los años 2002, 2005 y 2008. Dicho estudio pudo determinar que la variación espacial de la ET en el área de estudio está muy influenciada por los tipos de cobertura terrestre mientras que la variación temporal de la ET mensual promedio muestra que además de la precipitación, el agua subterránea, la escorrentía y el agua de mar son los otros factores que influyen en la ET en esta área.

También en un estudio publicado en el 2004, se presentan datos de sitios de pastizales y matorrales semiáridos, situados a 2 km uno del otro en Nuevo México[40]. Al encontrarse estos sitios muy cerca unos de otros, se minimizan las diferencias de precipitación, radiación y otros factores hidrológicos. Este trabajo ofrece, además información nueva e importante sobre la ET en entornos semiáridos. Donde se proporciona un registro lo suficientemente largo para cuantificar las fluctuaciones temporales en ET. Además, se compara directamente la ET de los ecosistemas de pastizales y matorrales semiáridos, lo que permite cuantificar cómo la invasión de arbustos puede influir en la hidrología, el clima y el ciclo del carbono. También las mediciones de ET van acompañadas de

mediciones continuas de la humedad y la radiación del suelo, lo que permite identificar los controles clave en ET. En particular, se pudo probar si la relación simple entre ET y la humedad del suelo es razonable.

En el caso de México existen escasas investigaciones. Una de estas fue realizada en las zonas áridas del norte del país [41], donde se explora la estimación de la ET estacional para cultivos utilizando imágenes de sensores remotos de múltiples fuentes y la evaluación del desempeño del producto satelital MOD16 en zonas áridas del norte de México mediante la comparación de los valores de ET estimados por dos métodos distintos. Para esto, el ecosistema monitoreado correspondió a cultivos de trigo y arbustos. Se lograron encontrar diferencias entre ambos métodos para la estimación de la ET que se atribuyeron principalmente a la parametrización del algoritmo MOD16 (entradas) y a las consideraciones sobre los procesos físicos que influyen en la ET, así como a las escalas espacial y temporal de cada método. También es importante mencionar un estudio realizado en México, donde se presentan seis años de información de dos sitios con limitación de agua de la red MexFlux[42]. Uno de estos es el Mogor ubicado en el Valle de Guadalupe y el otro el Rayón, ubicado en Sonora. Para ambos sitios se analizó la ET medida mediante la técnica CFT, este análisis exploró cómo los factores de humedad y energía afectan a dos ecosistemas con distintos patrones de lluvia: uno que recibe precipitaciones en invierno y otro que tiene lluvias en verano, principalmente debido al monzón de Norteamérica. Y se encontró que para el sitio con lluvias en invierno la ET depende de una compleja interacción entre los factores de humedad y de energía, siendo la ET más resiliente ante decrementos importantes en la precipitación anual recibida. Mientras que para el sitio con lluvias en verano, la ET es bastante sensible a la presencia de humedad bajo las altas condiciones energéticas predominantes durante la mayor parte del año.

Desde una perspectiva experimental, existen diversos métodos para medir la evapotranspiración (ET). Por ejemplo, los lisímetros de alta precisión proporcionan mediciones exactas del uso de agua en los cultivos, pero su alcance espacial es limitado y no capturan la dinámica de la ET a escala de cuenca o paisaje. Por otro lado, la técnica de covarianza de flujos turbulentos (CFT) permite calcular la ET a nivel de ecosistema y tiene el potencial de ser escalada a niveles más amplios como cuenca, paisaje o ecorregión[43, 44].

Como muestra de esto, un estudio realizado en la cuenca Rietholzbach en el noreste de Suiza, comparó dos métodos para determinar la ET a nivel in-situ[45]. Uno basado en las mediciones de lisímetros y el otro de mediciones de flujos turbulentos. Estas mediciones cubrieron el período de junio de 2009 a diciembre de 2015 y se compararon en varias escalas de tiempo y con respecto a un período de 40 años. En general se logró determinar que, el lisímetro y las mediciones de flujos coinciden bien, especialmente en la escala de tiempo anual. En esa escala de tiempo, las mediciones del lisímetro a largo plazo también se correspondió bien con las estimaciones de evapotranspiración del balance hídrico de la cuenca.

Otro estudio situado en Perú, logra caracterizar la ET en los Andes centrales altos[46], utilizando el sistema CFT para documentar por primera vez la variabilidad horaria, diaria y mensual de Julio de 2016 a Junio de 2017. Además se examina la relación entre la ET y las variables meteorológicas. Mostrando que la evapotranspiración sobre los Andes centrales peruanos altos está modulada por los estados de limitación de agua y energía durante la estación seca y húmeda, respectivamente.

Utilizando datos provenientes de sensores remotos, como las imágenes de satélite, podemos entender el comportamiento de distintas variables ambientales (como el índice de área foliar, la humedad

del suelo, la temperatura y la emisividad superficial) que influyen directamente en los patrones temporales y espaciales de la evapotranspiración (ET). Esto nos permite expandir la información recogida en el campo a una región más grande. Así, al combinar datos de mediciones locales o in-situ de la ET con información satelital sobre las condiciones ambientales que afectan la dinámica de la ET, podemos realizar estimaciones de la ET a una escala más amplia con un nivel de incertidumbre relativamente bajo[47].

Estudios recientes han utilizado y analizado diferentes técnicas de aprendizaje automático para mejorar la estimación de la evapotranspiración (ET)[48, 49, 50]. En el noroeste de China, se recolectaron datos de ET de 36 torres de covarianza de flujos turbulentos (CFT) en la cuenca del río Heihe. Estos datos se emplearon para aplicar cinco algoritmos de aprendizaje automático ampliamente utilizados con el fin de expandir estas observaciones a una escala regional. Los métodos evaluados incluyeron: redes neuronales artificiales (ANN), Cubist, red de creencia profunda (DBN), bosque aleatorio (RF) y máquinas de vectores de apoyo (SVM) y se pudo determinar que el algoritmo RF genera una incertidumbre ligeramente inferior que otros enfoques de aprendizaje automático[13]. Una investigación novedosa propuso un modelo de estimación híbrido basado en el método de descomposición modal (VMD), el algoritmo del optimizador del lobo gris (GWO) y el modelo de la máquina de vectores de apoyo (SVM), el cual logró un rendimiento computacional superior en comparación con el rendimiento de otros métodos y además se pudo determinar que puede aplicarse para estimar la ET sin parámetros meteorológicos adecuados [51, 52, 53, 54].

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Concepto de Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) implica el movimiento del agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera[55], a través de dos mecanismos distintos: la transpiración, que ocurre a través de las plantas, y la evaporación, que tiene lugar en la superficie del suelo.

Este proceso de intercambio de agua generalmente involucra un cambio de fase donde el agua se transforma de líquido a vapor. Para que este cambio ocurra, se requiere energía, que proviene principalmente de la radiación solar y la temperatura del aire circundante. Además, la velocidad del viento y la humedad del aire son elementos climáticos importantes en este proceso. Por otro lado, la transpiración se refiere a la evaporación del agua contenida en los tejidos de las plantas y su liberación a la atmósfera. Este fenómeno se lleva a cabo a través de orificios microscópicos en las hojas conocidos como estomas, que permiten el intercambio de gases y vapor de agua entre la planta y el entorno. La mayoría del agua absorbida por las raíces se pierde por transpiración, y solo una pequeña parte se utiliza en el crecimiento de la planta. Al igual que en la evaporación, la radiación, la temperatura, la humedad y el viento son factores clave en la determinación de la transpiración[8].

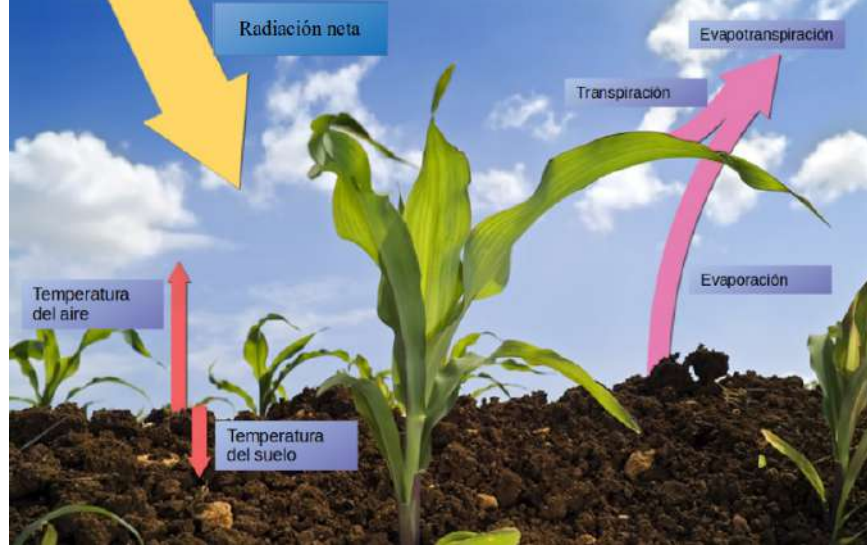


Figura 2.1: Ilustración de la evapotranspiración

2.2.2. Medición de la Evapotranspiración

La evaluación de la evapotranspiración es un proceso intrincado. Desde una perspectiva experimental, se necesitan dispositivos especializados y mediciones precisas de los parámetros físicos o del balance de agua del suelo en lisímetros. A pesar de que estos enfoques son costosos y requieren investigadores con formación especializada para su análisis, continúan siendo fundamentales para validar las estimaciones de la evapotranspiración obtenidas a través de métodos indirectos.

Se puede estimar la evapotranspiración real utilizando el método del balance de energía. Este enfoque se basa en el principio de conservación de la energía, que establece que la cantidad de energía que ingresa a la superficie debe ser igual a la que se emite de la superficie en un intervalo de tiempo específico. Por lo tanto, la ecuación para una superficie de evaporación se puede plantear como:

$$R_n - G - LE - H = 0. \quad (2.1)$$

Mientras que la radiación neta (R_n) y el flujo de calor del suelo (G) pueden ser medidos o estimados basándose en parámetros climáticos, la medición del calor sensible (H) y del flujo de calor latente (LE) presenta complejidades, dificultando la obtención de sus valores

La técnica de covarianza de flujos turbulentos (CFT) surge como respuesta a la complejidad de la medición de los flujos turbulentos LE y H . Estos sistemas de CFT se basan en la teoría de que el movimiento del viento no es en una sola dirección sino que este se mueve en patrones circulares tridimensionales [56]. Además, en este movimiento, el aire transporta moléculas de vapor de agua y otros gases, como el dióxido de carbono y el metano. Se puede emplear un analizador de gases para medir las cantidades de vapor de agua (u otros gases) presentes en el aire en ese momento. La covarianza entre el movimiento de la masa de aire y su composición se puede utilizar para determinar el flujo de calor y agua, que pueden utilizarse para calcular el flujo de calor sensible (H), el flujo de calor latente (LE) y por consiguiente la ET [44].



Figura 2.2: En la base tenemos los suelos, la vegetación y posteriormente en la flecha blanca tenemos la capa límite de la atmósfera, la cual entra en contacto con todos los flujos y energía que se genera dentro de un ecosistema.

Para estimar los flujos se usa la ecuación

$$F = \overline{\rho_{\alpha} w' c'} \quad (2.2)$$

La fórmula proporciona una manera de calcular el flujo de varios gases, como H_2O , CO_2 , CH_4 , y N_2O . La variable F representa el flujo. La densidad del aire se representa como ρ_{α} , la desviación de la velocidad vertical del viento respecto a su media se indica con w' y la desviación de la concentración del gas se denota con c' . La barra superior en la ecuación representa el promedio de tiempo.

2.2.3. Modelamiento Espacial

Es crucial en varias disciplinas científicas realizar el modelado espacial de los procesos terrestres, que puede abarcar desde modelos simples de procesos puntuales distribuidos en el espacio hasta complicadas operaciones matemáticas con referencias espaciales dentro del campo de la ciencia de la información geográfica [57]. El modelamiento tiene como objetivo mejorar la comprensión de un proceso al simular su dinámica, estableciendo niveles aceptables de precisión y anticipando los estados futuros del proceso [58].

2.2.3.1. Modelamiento de la dinámica de la Evapotranspiración

La implementación de modelos espaciales para la ET se ha producido de diferentes maneras. Los métodos pueden ser determinísticos o probabilísticos. Tradicionalmente, el proceso de modelamiento implica la aplicación de métodos estadísticos o de extracción de datos para analizar un conjunto

específico de datos. Estos datos corresponden a variables que influyen en la propia ET. Los modelos, por lo tanto, pueden utilizarse para representar procesos o relaciones hidrológicos que operan dentro de un dominio espacial predefinido. El dominio puede ser una subregión de una región continental o una cuenca fluvial, es decir, una unidad espacial hidrológica básica[57].

■ Modelos determinísticos

Los métodos determinísticos asumen que los factores que causan el evento son conocidos y utilizan métodos lineales para evaluarlos. Esto significa que el resultado depende completamente de estos factores y los parámetros del modelo. Si se supone que ya se conoce la relación entre los factores y el fenómeno, entonces la evaluación puede ser altamente subjetiva [58]. Asimismo, se anticipa que un grupo particular de variables genere de forma coherente el mismo resultado [59].

■ Modelos Probabilísticos

La base de los modelos probabilísticos estocásticos es aceptar que los resultados pueden tener pequeñas variaciones debido a la naturaleza aleatoria de los procesos que afectan al fenómeno de interés [58]. Modelar fenómenos ambientales y antropogénicos se beneficia especialmente de esta aleatoriedad, ya que tienden a exhibir patrones de comportamiento complejos [59]. En este campo, los modelos probabilísticos que utilizan técnicas de aprendizaje automático destacan especialmente. Las técnicas de aprendizaje automático se ocupan de problemas en los que la relación entre las variables de entrada y de salida no es conocida o no es fácil de obtener. Dentro de los modelos probabilísticos, destacan aquellos basados en el aprendizaje automático. Las técnicas de aprendizaje automático se utilizan en situaciones donde la relación entre las variables de entrada y salida no es conocida o es difícil de establecer. Los algoritmos de aprendizaje automático utilizan técnicas computacionales para extraer conocimientos de los datos directamente, sin la necesidad de basarse en una ecuación modelo preestablecida. Estos algoritmos se han aplicado en investigaciones hidrológicas y sobre el cambio climático, siendo particularmente útiles para estudios de escalado ascendente de la evapotranspiración hasta una escala global[60]. Varios de los algoritmos de aprendizaje automático más comúnmente utilizados son empleados son:

I. Redes Neuronales Artificiales: Se trata de un enfoque de aprendizaje automático supervisado que se basa en el funcionamiento de las redes neuronales biológicas. Como algoritmo supervisado, se entrena con datos históricos para predecir la distribución espacial[58].

II. Maquinas de Soporte Vectorial: Las Máquinas de soporte vectoriales (SVM) se refieren a un método de clasificación, que tiene como objetivo determinar la frontera óptima entre dos grupos. Este método se basa en la noción de hiperplano. En un espacio de p dimensiones, un hiperplano es definido como un subespacio plano de dimensión $p - 1$, el cual no necesariamente atraviesa por el origen. Como ejemplo, en un espacio de dos dimensiones, el hiperplano se puede entender como una recta que es un subespacio de una dimensión[61].

La expresión matemática para un hiperplano es relativamente simple. En un espacio bidimensional, por ejemplo, se representa mediante la ecuación de una recta:

$$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 = 0$$

De forma general para p dimensiones la formula del hiperplano esta dada por:

$$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_p x_p = 0 \quad (2.3)$$

Si el vector $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ cumple la ecuación, entonces todos los puntos determinados por ese vector pertenecen al hiperplano. En caso de que x no satisfaga la ecuación, caerá a un lado o al otro del hiperplano.

Para ver el funcionamiento del método de Maquinas de Soporte Vectorial supongamos que se dispone de n observaciones con p predictores y una variable de respuesta binaria $(+1, -1)$. En este caso, el método de Máquinas de Soporte Vectorial utiliza hiperplanos para crear un clasificador capaz de predecir a qué grupo pertenece cada observación utilizando sus predictores. Si las observaciones pueden ser distribuidas de manera que se puedan dividir linealmente en dos clases $(+1$ y $-1)$, entonces, un hiperplano de separación satisface que

$$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_p x_p > 0 \text{ si } y_i = 1$$

$$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_p x_p < 0 \text{ si } y_i = -1$$

Al identificar cada clase como $+1$ o -1 , y dado que multiplicar dos valores negativos resultan en un valor positivo, las dos condiciones anteriores pueden simplificarse en una única:

$$y_i(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_p x_p) > 0 \text{ para } i = 1, \dots, n$$

Por lo tanto, El clasificador más básico trabaja asignando cada observación a una clase según su posición relativa al hiperplano. La clasificación de x se realiza según el signo de la función $f(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_p x_p$. Esto se determina así. Si $f(x)$ es positiva, la observación se clasifica como $+1$; si es negativa, se clasifica como -1 .

Dado que hay infinitos hiperplanos posibles, se necesita encontrar un método para identificar el más apropiado. Se resuelve este problema al elegir el hiperplano que maximice la distancia mínima a las observaciones más cercanas. Se emplean métodos de optimización para facilitar la selección del hiperplano óptimo.

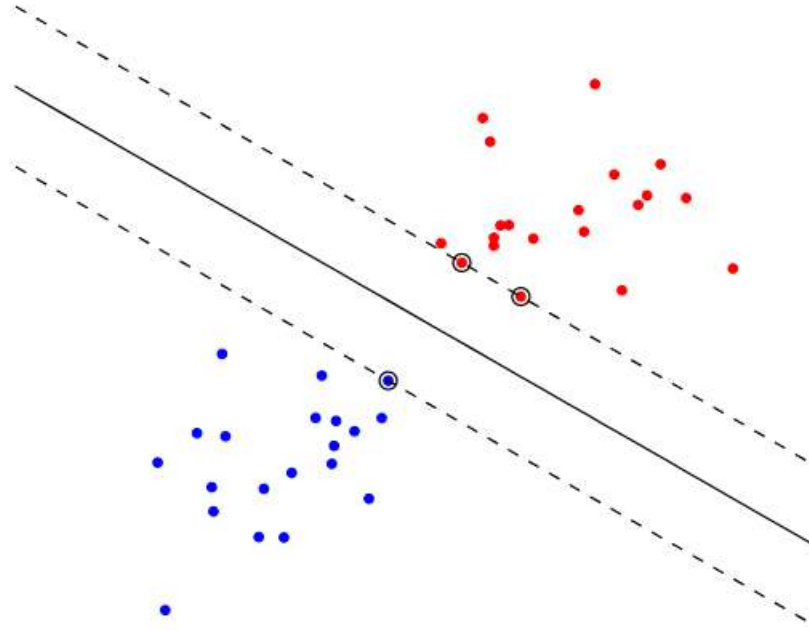


Figura 2.3: Un buen hiperplano de separación es un hiperplano que maximiza la distancia a los puntos de datos de entrenamiento más cercanos[1]

III. Bosques Aleatorios: Los Bosques Aleatorios RF, por sus siglas en inglés, son una forma de hacer aprendizaje automático, donde se utilizan los resultados de los datos que se tienen para predecir los resultados de algo que no se conoce. El nombre "Bosque Aleatorio" proviene de la combinación de la aleatoriedad en la elección de los conjuntos de datos con el hecho de tener un grupo de árboles de decisión, de ahí que sea un bosque. Para entender un bosque aleatorio, hay que entender un árbol de decisión. Cada árbol de decisión arroja una predicción y la clase con más votos se convierte en la predicción de el modelo.

Un bosque aleatorio se define como un clasificador compuesto por una colección de árboles de decisión $h(x, \theta_k)$, en donde cada θ_k es un vector aleatorio que sigue una distribución idéntica e independiente. Cada árbol en el conjunto proporciona un voto para la clase que más frecuentemente aparece en sus resultados.

Este algoritmo funciona en los siguientes pasos:

1. Crear un árbol de decisión para cada muestra.
2. Generar una predicción a partir de cada árbol de decisión.
3. Efectuar una votación para cada predicción obtenida.
4. Escoger como predicción final aquella que haya recibido la mayor cantidad de votos.

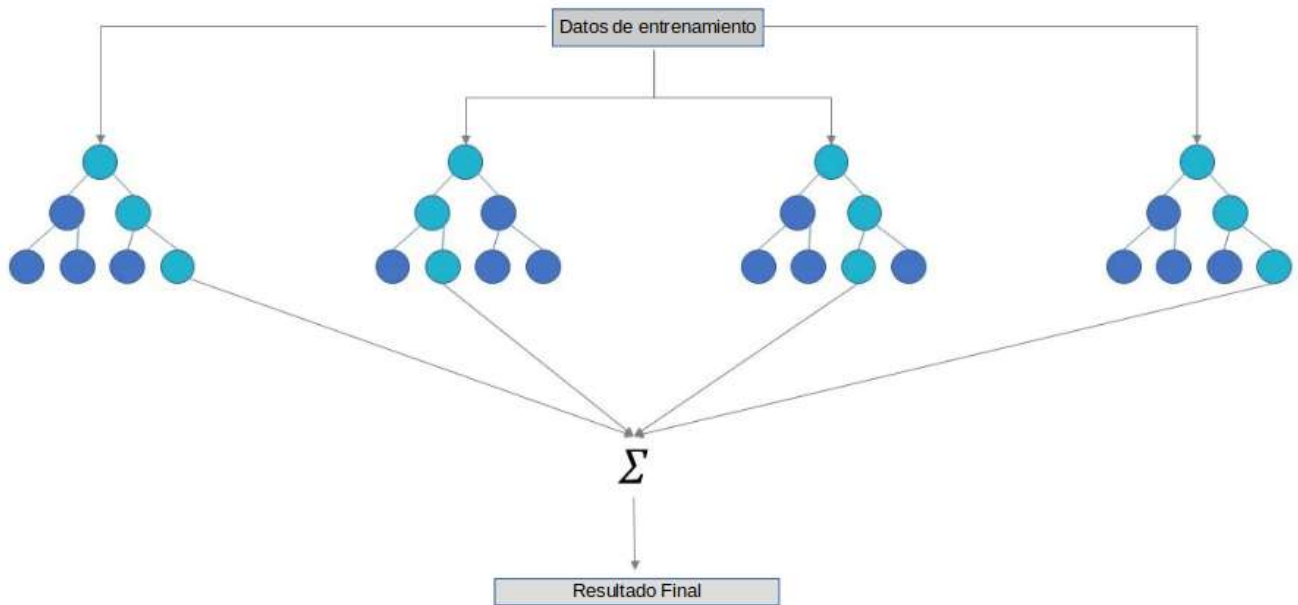


Figura 2.4: Diagrama de clasificador Bosques Aleatorios[2]

2.2.4. Factores relacionados con la Evapotranspiración

2.2.4.1. Factores Topográficos

La topografía influye significativamente en muchos procesos de la superficie terrestre, incluido el balance de agua y energía. Por ejemplo tiene una enorme efecto en la distribución espacial de la humedad del suelo pues controla la partición de la infiltración y la escorrentía superficial [62]. Elementos topográficos como la elevación, el aspecto y la posición geográfica influyen significativamente en la distribución y características de la vegetación, así como en la incidencia de la radiación solar [63]. En regiones semiáridas, la configuración del terreno afecta profundamente las condiciones microclimáticas, que incluyen la temperatura, la precipitación y la radiación solar, además de la exposición al viento. Estos factores topográficos también impactan en las propiedades del suelo, como el contenido de materia orgánica y sus características químicas y físicas, y en los procesos hidrológicos, que abarcan la escorrentía superficial, la conductividad hidráulica y la capacidad de retención de agua del suelo[64, 65], lo que da como resultado distintos tipos de vegetación que ocupan pendientes opuestas[66]. Las variables topográficas son recursos clave en el modelado de la dinámica de la evapotranspiración, ya que estas características del terreno desempeñan un papel fundamental en la definición de los ecosistemas.

- **Elevación:** La elevación es la altura de un lugar geográfico por encima del nivel del mar. Esta variable tiene influencia en las características del clima. La densidad del aire y el contenido de agua en la atmósfera tienden a disminuir con el aumento de la elevación, lo que produce un aumento de la transmisividad atmosférica y de la radiación solar directa, los cuales son factores involucrados directamente en el proceso de Evapotranspiración[67].
- **Pendiente:** La pendiente es una medida de la inclinación de la superficie del terreno. Cuanto

más empinada es la superficie, mayor es la pendiente. La pendiente puede afectar al microclima y determinar la demanda de agua atmosférica del lugar. La posición de la pendiente modifica la carga de radiación neta y puede cambiar la temperatura del aire, la humedad del aire y la velocidad del viento, influyendo así en la dinámica de la Evapotranspiración[68].

- **Aspecto:** El aspecto indica hacia qué dirección está inclinada una pendiente y se cuantifica en grados. El aspecto de la pendiente es uno de los factores cuantitativos de las características topográficas responsables de la redistribución del agua en el paisaje, también tiene un efecto sobre el patrón y la tendencia de la vegetación. De modo que es una variable que incide en el balance hidrológico regional y por tanto en el proceso de Evapotranspiración[69].
- **Curvatura de la superficie:** La curvatura es una medida que indica el grado de arqueamiento presente en una superficie. La curvatura define en gran medida la distribución de agua en el paisaje y regula en gran medida la incidencia de la radiación solar[70].

En la Tabla 2.1 se relacionan las variables que tienen influencia en el proceso de ET según la revisión bibliográfica.

Variable	Referencias
Elevación	[67],[71],[72],[73]
Pendiente	[68],[70],[73],[74]
Aspecto	[67],[70],[73],[75]
Curvatura de la superficie	[70],[76]

Cuadro 2.1: Variables topográficas que afectan la dinámica de la evapotranspiración según la revisión bibliográfica.

2.2.4.2. Factores Climáticos

Otra forma de calcular la ET es mediante datos meteorológicos. Para lograr esto se requieren de los siguientes parámetros climatológicos y físicos:

■ Radiación Solar:

El factor clave en el proceso de evapotranspiración es la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La cantidad de energía depende en gran medida de la radiación solar que una superficie recibe, y esto varía según la ubicación geográfica y la estación del año. Es fundamental reconocer que no toda la energía solar captada se emplea únicamente para evaporar agua. También contribuye al calentamiento del suelo y de la atmósfera una parte significativa de esta energía, lo cual afecta a la dinámica de la evapotranspiración.

- **Temperatura del aire:** El aire se calienta debido a la radiación solar que es absorbida por la atmósfera y al calor emitido por la tierra. En días nublados y fríos, la tasa de evapotranspiración tiende a ser menor que en días soleados y cálidos. De esta manera, el calor sensible transportado por el aire en movimiento desempeña un papel crucial en la transferencia de energía hacia los cultivos, afectando directamente la velocidad a la que se produce la evapotranspiración.

- **Humedad relativa:** En agrometeorología, existen diversas formas de cuantificar el contenido de agua en el aire, siendo comunes medidas como la presión de vapor, la temperatura del punto de rocío y la humedad relativa. Esta última, la humedad relativa (HR), se define como el porcentaje que representa la relación entre la presión actual de vapor (e_a) a una temperatura específica y la presión de saturación de vapor ($e^o(T)$), indicando así el grado de saturación del aire:

$$HR = \frac{e_a}{e^o(T)} * 100$$

Esta fórmula permite evaluar cuán saturado está el aire respecto a su capacidad máxima para contener vapor de agua a una temperatura dada.

La humedad relativa se define como la relación entre la cantidad de agua que el aire contiene en una temperatura específica y la cantidad máxima que podría contener si estuviera saturado a esa misma temperatura.

- **Velocidad del viento** Cuando el viento circula, transporta las partículas de agua que hay en el aire. Por lo que la velocidad a la que el aire fluye sobre la superficie afecta la velocidad de evaporación del agua. La velocidad del viento se determina utilizando anemómetros, que consisten en propulsores que giran alrededor de un eje debido a la acción del viento. Así, la velocidad media del viento durante un periodo específico se calcula contando el número de vueltas que dan estos propulsores en ese intervalo de tiempo.

2.2.4.3. Factores de la vegetación

La cobertura vegetal y el ciclo del agua están estrechamente ligados. El ciclo del agua controla la distribución y la productividad de la vegetación terrestre y, a su vez, el tipo de cubierta vegetal es un determinante clave de la evapotranspiración y la escorrentía global[77] . El cambio de vegetación integra el cambio fenológico y el cambio en el uso del suelo. Por un lado el cambio fenológico domina el proceso de ET mediante la fisiología interna, aumentando la cantidad de estomas en las hojas con el reverdecimiento de la vegetación. A su vez, el cambio en el uso del suelo representa la transformación del tipo de vegetación, que influye en la ET a través del cambio de las interacciones entre la tierra y la atmósfera[78].

Los índices de vegetación son de gran utilidad en el campo de las imágenes satelitales pues proveen una evaluación cuantitativa y cualitativa de la cubierta vegetal, vigor y dinámica de crecimiento[79]. Haciendo uso de los índices se puede tener una percepción del estado de la vegetación o del contenido de humedad de esta, lo cual ayuda a comprender la variabilidad de ET. Por ejemplo la transpiración de la vegetación y, en consecuencia, la dinámica regional de ET están fuertemente relacionadas con el índice LAI (Leaf Area index). En efecto, el aumento de LAI promoverá la transpiración y la evaporación por interceptación, lo que conducirá a una mayor evapotranspiración[77]. También es muy usado el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que proporciona una representación del grado de verdor de una cobertura vegetal, con lo que es posible hacer deducciones precisas acerca del funcionamiento de la vegetación. La Tabla 2.2 presenta una lista de índices utilizados en estudios previos para estimar el tipo y la condición de la vegetación, según se documenta en la literatura.

Variable	Referencias
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	[80],[81],[82],[83],[84]
LAI (<i>Leaf Area Index</i>)	[85],[86],[87],[88]
FPAR (<i>Fraction of Photosynthetically Active Radiation</i>)	[89],[90]
Cobertura Forestal	[91],[92]
Altura de la cubierta forestal	[93]

Cuadro 2.2: variables utilizadas para estimar el estado de la vegetación.

2.2.5. Efecto de la Evapotranspiración

2.2.5.1. Efectos de la Evapotranspiración en el ecosistema

La evapotranspiración es un proceso crítico que afecta a múltiples aspectos del funcionamiento de los ecosistemas, como la disponibilidad de agua, la regulación de la temperatura, el ciclo del carbono y el ciclo de los nutrientes. Los cambios en las tasas de evapotranspiración pueden tener importantes repercusiones en la salud y la resistencia de los ecosistemas, sobre todo ante el cambio climático global.

1. **Disponibilidad de agua:** La ET es uno de los principales impulsores del ciclo del agua en los ecosistemas. Es responsable de extraer el agua del suelo y transferirla a la atmósfera, donde puede ser transportada y eventualmente precipitada de vuelta a la tierra. La tasa de evapotranspiración puede influir en la cantidad de agua disponible en el suelo para el crecimiento de las plantas y puede tener implicaciones significativas para la salud de los ecosistemas, especialmente en regiones áridas o semiáridas [94][95].
2. **Regulación de la temperatura:** La evapotranspiración también puede regular la temperatura de los ecosistemas. El proceso de transpiración, mediante el cual se libera agua de las hojas de las plantas, puede tener un efecto refrescante en el entorno circundante. Esto se debe a que, al evaporarse el agua, absorbe calor del aire circundante, lo que puede reducir la temperatura del aire [96].
3. **Ciclo del carbono:** El ciclo del carbono de los ecosistemas depende fundamentalmente de la evapotranspiración (ET). En la fotosíntesis, las plantas capturan dióxido de carbono del aire y lo utilizan para crecer. Durante la transpiración, se libera vapor de agua y una parte del dióxido de carbono absorbido vuelve a la atmósfera. La regulación del clima terrestre tiene un papel vital este flujo de carbono entre la superficie terrestre y la atmósfera[5].
4. **Ciclo de nutrientes:** La evapotranspiración también puede influir en el ciclo de nutrientes en los ecosistemas. A medida que el agua es transpirada por las plantas, puede llevar nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio del suelo a la atmósfera. Estos nutrientes pueden ser depositados en otro lugar del ecosistema, potencialmente influyendo en el crecimiento y la productividad de las plantas [97].

2.2.5.2. Efectos de la Evapotranspiración en el suelo

La evapotranspiración (ET) puede tener varios efectos sobre el suelo en los ecosistemas[98]. Algunos de los principales efectos de la ET en el suelo son los siguientes

1. **Contenido de agua:** La ET puede provocar una disminución del contenido de agua del suelo, ya que extrae agua del suelo y la transfiere a la atmósfera. Esta reducción en el contenido de agua del suelo puede impactar significativamente sus características, afectando la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la actividad de los microorganismos.
2. **Temperatura del suelo:** La ET también puede afectar a la temperatura del suelo. Al transpirar el agua de las plantas, puede tener un efecto refrigerante en el entorno, así mismo, la evaporación presente en la superficie del ecosistema tiene un efecto refrescante sobre el suelo. Esto puede dar lugar a temperaturas del suelo más bajas, lo que puede repercutir en el crecimiento de las plantas y en la actividad microbiana del suelo.
3. **Ciclo de los nutrientes:** El ciclo de nutrientes en el suelo puede ser modificado por la evapotranspiración (ET). El agua liberada por las plantas durante este proceso transporta nutrientes desde el suelo hasta la atmósfera, lo que afecta la disponibilidad de estos elementos esenciales para las plantas y los microorganismos del suelo. Aunque así sea, con el tiempo la microbiota del suelo puede devolver algunos de estos nutrientes al suelo a través de la descomposición.
4. **Disponibilidad de humedad en el suelo:** La cantidad de humedad en el suelo necesaria para el crecimiento de las plantas puede ser afectada por la evapotranspiración(ET). Al extraer agua del suelo, la ET puede disminuir la disponibilidad de este recurso esencial para las plantas, lo que a su vez podría tener un impacto negativo en su crecimiento y rendimiento.
5. **Erosión del suelo:** La ET también puede afectar a la erosión del suelo. Cuando el suelo está seco, es más propenso a la erosión por el viento y el agua. Si la ET reduce el contenido de humedad del suelo, puede aumentar el riesgo de erosión del suelo en el ecosistema. Sin embargo, la vegetación de manera indirecta por medio de la rizosfera y del aporte de materia orgánica hacia el suelo disminuye directamente el potencial erosivo que pueda presentar una superficie.

2.2.5.3. Efectos de la Evapotranspiración en el aire

La evapotranspiración (ET) puede tener varios efectos en el aire de los ecosistemas. Algunos de los principales efectos de la ET en el aire son:

1. **Humedad:** La evapotranspiración es uno de los principales impulsores de la humedad en la atmósfera. A medida que el agua es transpirada por las plantas y se evapora de las superficies del suelo, aumenta la cantidad de vapor de agua en el aire. Esto puede conducir a una mayor humedad relativa, lo que puede tener implicaciones para la salud humana, la agricultura y los patrones climáticos [99].
2. **Circulación atmosférica:** La ET también puede influir en los patrones de circulación atmosférica. El movimiento del vapor de agua a través de la atmósfera como resultado de la ET

puede ayudar a impulsar los sistemas meteorológicos, como la formación de nubes y precipitaciones. La transferencia de calor asociada a la ET también puede influir en las corrientes de convección atmosférica y en los patrones de viento [100].

3. **Temperatura del aire:** La evapotranspiración puede tener un efecto refrescante sobre la temperatura del aire, sobre todo en zonas con altas tasas de transpiración. Al transpirar el agua de las hojas de las plantas, absorbe calor del aire circundante, lo que puede reducir la temperatura del aire. Este efecto puede ser especialmente notable en los entornos urbanos, donde las tasas de transpiración suelen ser más bajas debido a la reducción de la cubierta vegetal [8].
4. **Calidad del aire:** La ET también puede afectar a la calidad del aire al eliminar contaminantes de la atmósfera. A medida que el vapor de agua se transpira y evapora de las superficies del suelo, puede arrastrar consigo contaminantes, limpiando eficazmente el aire. Este efecto puede ser especialmente importante en entornos urbanos, donde la contaminación atmosférica es una de las principales preocupaciones [101].

Materiales y Métodos

El estudio desarrolla una metodología jerárquica enfocada en el escalamiento espacial ascendente de la evapotranspiración (ET) en la región del Monzón de Norteamérica. Utiliza técnicas de aprendizaje automático para combinar mediciones locales de ET obtenidas a partir de torres de flujos de covarianza turbulenta. El proceso seguido por la metodología se describe a continuación y está ilustrado en la Figura 3.1

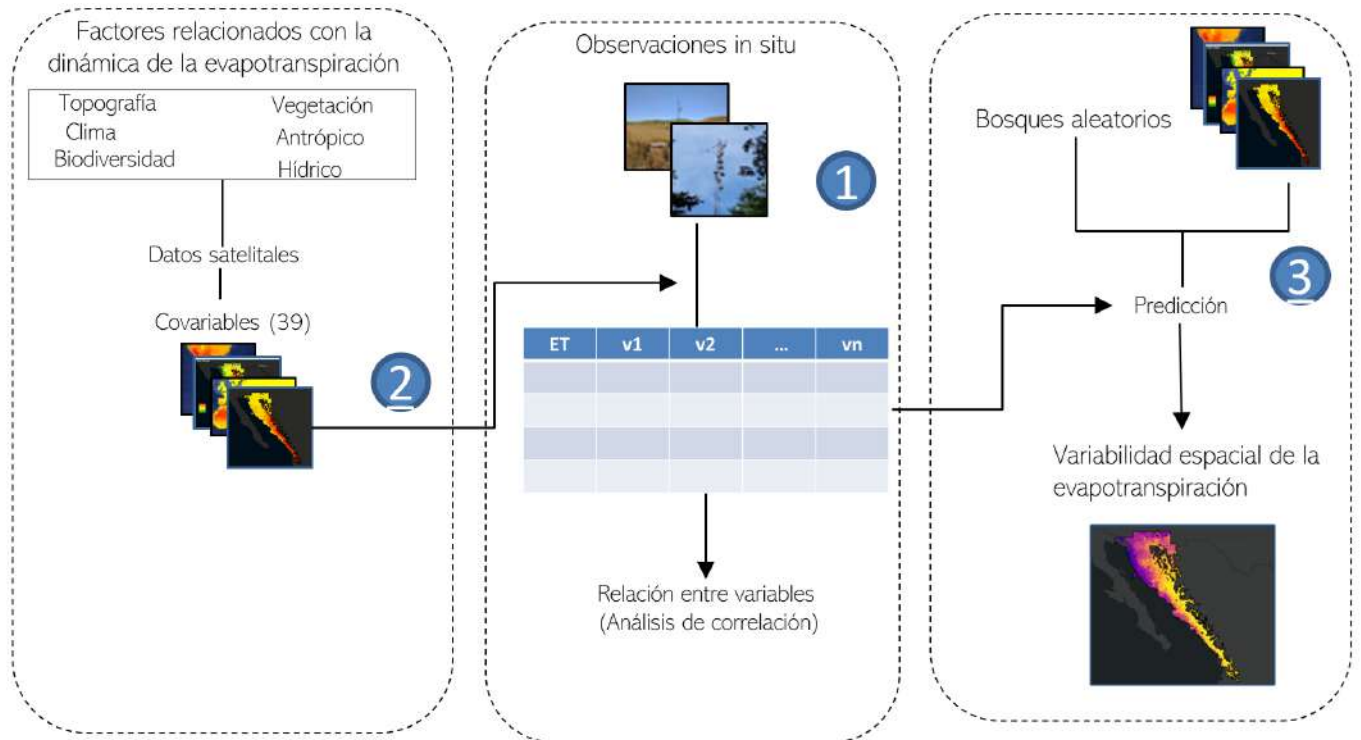


Figura 3.1: Diagrama de flujo para el proceso de escalado de datos utilizando observaciones terrestres y datos satelitales

1. Recopilación de datos in-situ: En esta etapa, se recopilan datos de ET obtenidos a través de mediciones puntuales en torres de flujos de covarianza turbulenta ubicadas en la región del Monzón de Norteamérica.
2. Recopilación de datos provenientes de productos satelitales: En esta etapa, se obtienen datos de diferentes covariables a partir de productos satelitales, como imágenes de satélite y productos derivados.
3. Modelado de la evapotranspiración a nivel regional: En esta etapa, se utiliza una combinación de técnicas de aprendizaje automático para realizar el escalamiento espacial ascendente de la ET. Se emplean los datos recopilados en las etapas anteriores (datos in-situ y datos satelitales) como entradas para entrenar y validar los modelos.

3.1. Area de estudio

Se plantea en el objetivo que la región de estudio es una ecorregión semiárida donde tiene presencia el Monzón de Norteamérica. De modo que para poder delimitar esta región necesitamos conocer el dominio espacial del Monzón de Norteamérica e identificar las ecorregiones del Noroeste de México.

3.1.1. El Monzón de Norteamérica

En el suroeste de Estados Unidos y el noroeste de México, el Monzón de Norteamérica se manifiesta como un cambio drástico en las condiciones climáticas, con un incremento significativo en las precipitaciones que transforma un junio típicamente seco en un julio muy lluvioso. Estas lluvias de verano suelen durar hasta mediados de septiembre. Es importante mencionar que un sistema monzónico se presenta gracias al contraste de temperatura entre el continente y los océanos, el aire continental seco y cálido asciende sobre la atmósfera y esto permite la entrada de aire cálido y húmedo desde los mares[102][103].

No existe como tal una región fija del Monzón de Norteamérica pues al ser un fenómeno meteorológico resulta ser dinámico y presentar variabilidad espacial. Es fundamental reconocer la importancia del monzón norteamericano en una área geográfica más amplia que el suroeste de Estados Unidos, y destacar su centro de acción en el noroeste de México [104]. La zona de precipitaciones monzónicas se encuentra geográficamente en la Sierra Madre Occidental, cubriendo los estados mexicanos de Sinaloa, Durango, Sonora y Chihuahua, y se extiende al norte para incluir partes de Arizona, Nuevo México y Colorado.

Históricamente, el interés de los investigadores por el monzón de Norteamérica se debe a la peculiar distribución de las precipitaciones estivales en la región árida y semiárida de Norteamérica. Por tanto la variabilidad espacial del Monzón de Norteamérica se ha examinado casi exclusivamente en términos de precipitaciones. Teniendo en cuenta esto se analizó el dominio espacial del Monzón teniendo en cuenta las precipitaciones durante los meses de julio, agosto y septiembre. En este sentido se descargaron las precipitaciones de los meses de julio, agosto y septiembre ocurridas durante el periodo 2000 a 2008 y se expresó como porcentaje de la precipitación media anual, como se muestra en Figure 3.2.

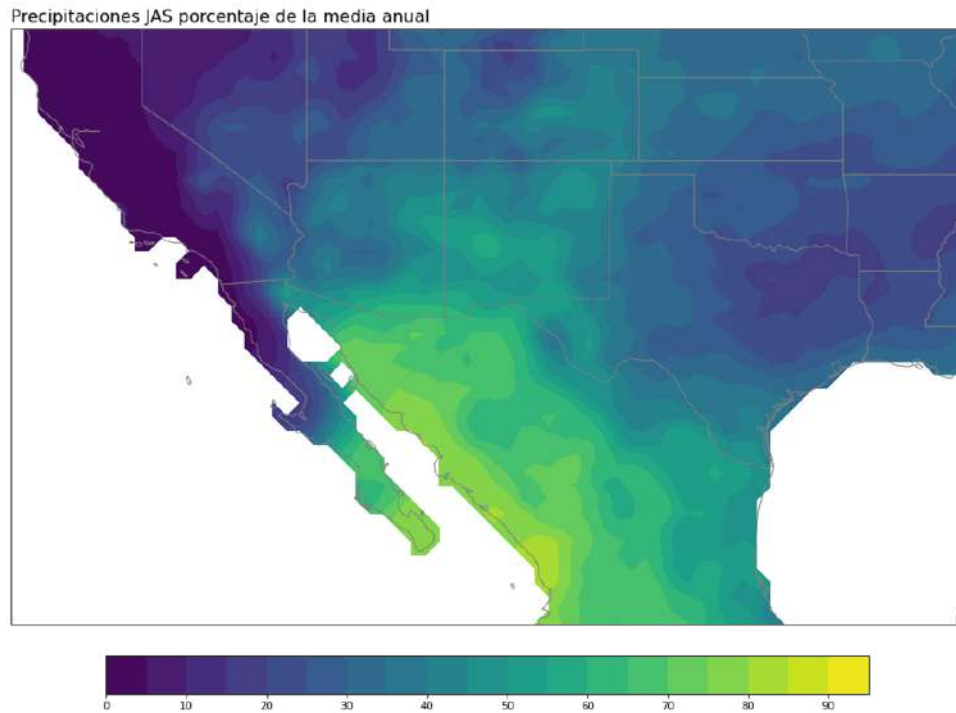


Figura 3.2: Porcentaje de la precipitación total anual que se produce durante los meses de julio a septiembre, en el periodo 2000-2008 utilizando datos de pluviómetros unificados del CPC.

Se determinó entonces delimitar la región del Monzón por lugares que reciben al menos el 50 % de sus precipitaciones anuales en Julio, Agosto y Septiembre (Figure 3.3).

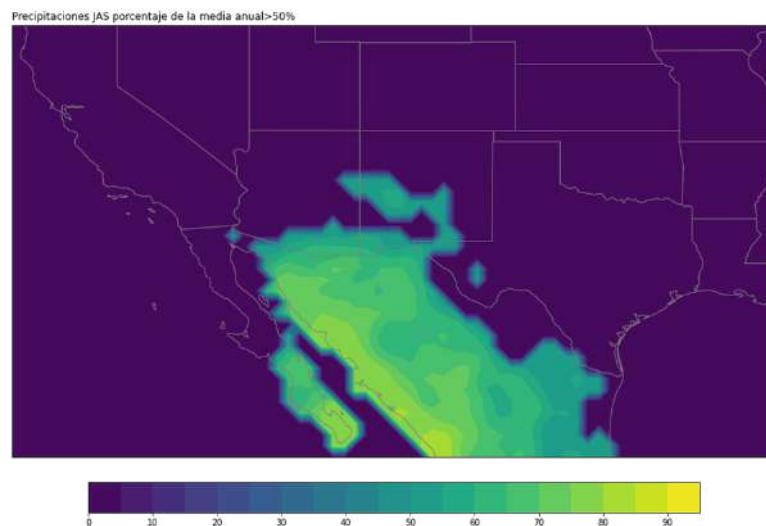


Figura 3.3: Lugares que reciben al menos el 50 % de sus precipitaciones anuales en Julio, Agosto y Septiembre.

3.1.2. Ecorregiones del Noroeste de Mexico

Las ecorregiones semiáridas del noroeste de México son áreas de transición entre los desiertos del norte y las regiones más húmedas del sur del país. Estas ecorregiones se encuentran en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Chihuahua y son conocidas por su clima seco y sus paisajes semiáridos. Estas ecorregiones semiáridas son importantes porque sustentan una gran diversidad de especies adaptadas a las condiciones extremas de la región. Además, también son importantes para la economía de la región, ya que muchas comunidades locales dependen de los recursos naturales que proporcionan, como la minería y la agricultura. Sin embargo, también son vulnerables a la sobreexplotación y la degradación del suelo, la pérdida de la biodiversidad y el cambio climático.

3.1.3. Definición de la región de estudio

Ya teniendo la delimitación espacial de la región del Monzón de Norteamérica y de las ecorregiones del Noroeste de México (para delimitar las ecorregiones en el estudio, se utilizó la capa de información geográfica de Ecoregions 2017 [105]). Se llevó a cabo una intersección entre las dos áreas para definir la región de estudio, como se ilustra en la Figura 3.4.

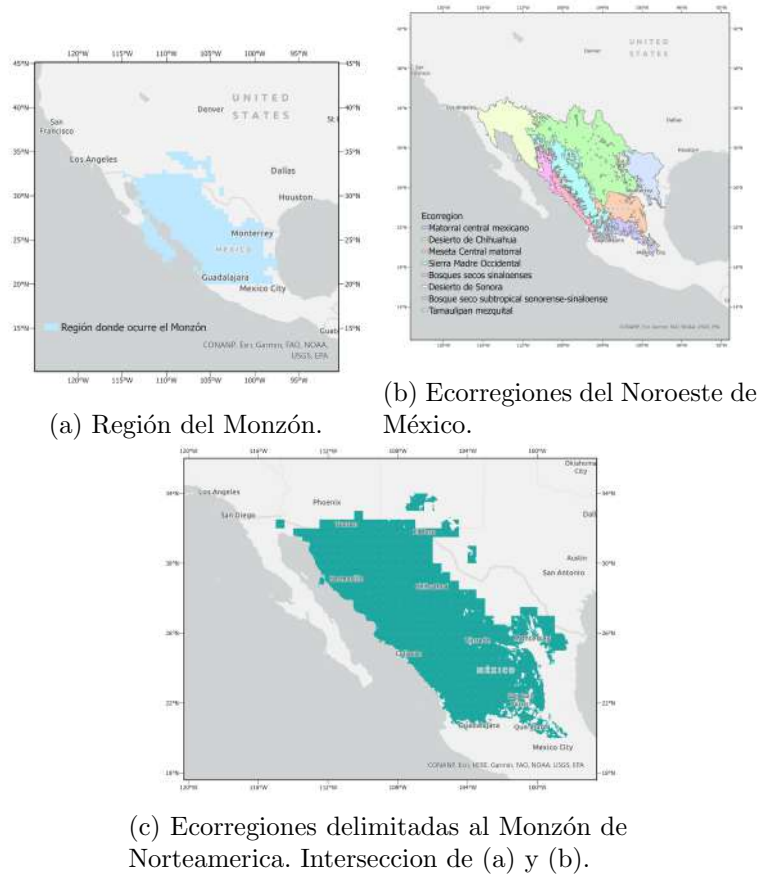


Figura 3.4: Construcción de la región de estudio.

Finalmente, ya que las torres de flujo turbulento están ubicadas en la parte izquierda de esta región, se seleccionó la ecorregión semiárida que se muestra en la Figura 3.5.

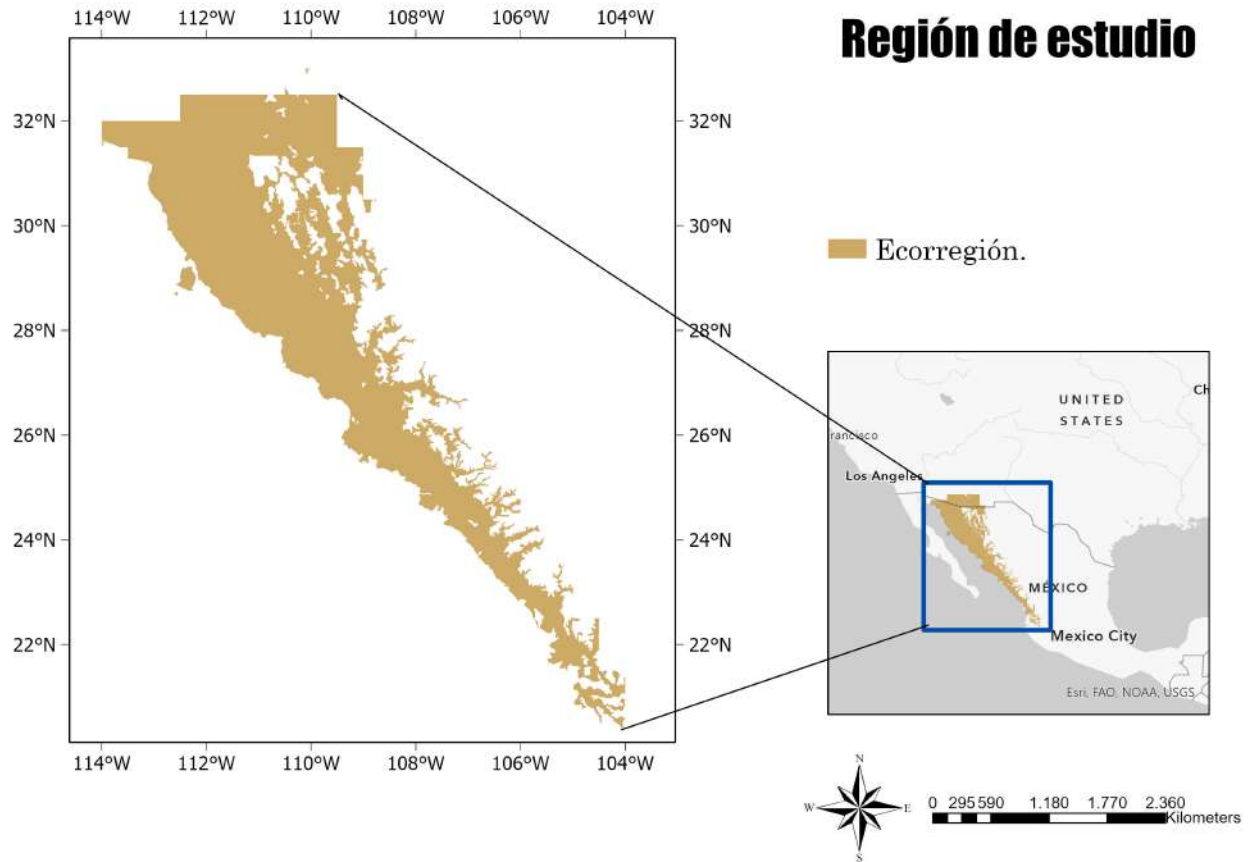


Figura 3.5: Región de estudio.

3.1.4. Caracterización de la región de estudio

El Noroeste de México presenta una gran variedad de usos del suelo y cobertura vegetal debido a sus diferentes ecosistemas y actividades humanas. De modo que para caracterizar la región de estudio se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés), el cual es una representación digital de la superficie terrestre que muestra la elevación de cada punto en la región. Además se utilizó información del Copernicus Global Land Service (CGLS) para obtener una representación de la cobertura vegetal de la región. La información fue procesada en el software Arcgis Pro y se obtuvieron los mapas de la Figura 3.6.

Se puede observar en los mapas que la cobertura vegetal predominante es el matorral, el cual se forma por plantas que se adaptan a la sequía. También se ve que una proporción considerable de la región está cubierta de sabanas arboladas que se caracterizan por tener una vegetación dispersa de

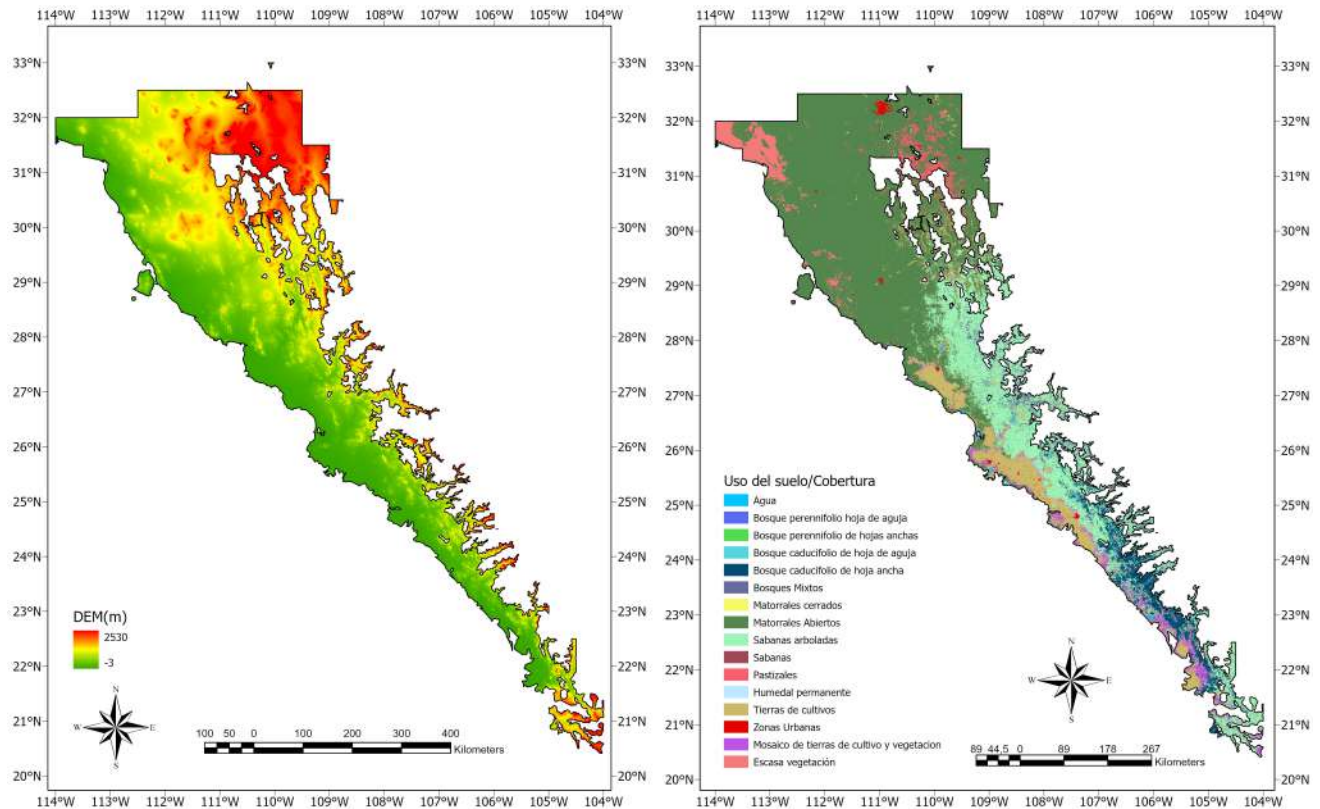


Figura 3.6: Topografía y cobertura vegetal de la región de estudio.

árboles y arbustos, con una cubierta de pastizales que varía según la temporada. Aquí la vegetación está adaptada a las condiciones climáticas extremas de la región, que incluyen altas temperaturas y sequías prolongadas. Los árboles y arbustos presentes en el ecosistema tienen raíces profundas para acceder al agua subterránea. Si se observa la parte baja de la región de estudio se puede ver la presencia de bosque caducifolio de hoja ancha, el cual se caracteriza por perder sus hojas en la estación seca y volver a producirlas en la estación húmeda. Durante la temporada de lluvias estas especies producen hojas que les permiten aprovechar al máximo el agua disponible, mientras que en la temporada seca, pierden estas hojas para reducir la pérdida de agua por transpiración. Es evidente la importancia de esta vegetación en la región ya que contribuye a la retención de agua en el suelo. Es importante resaltar también que hacia las costas se establecen tierras de cultivo, cerca de las cuales se pueden observar además zonas urbanas. En cuanto al recurso hídrico es notoria la poca presencia de cuerpos de agua lo que refleja la limitación hídrica de la región.

Por otro lado se puede observar que la región de estudio presenta altitudes elevadas que superan los 2.500 metros sobre el nivel del mar. También hay zonas de mesetas y depresiones, como en el desierto de Sonora donde la altitud es más baja. Se observan también planicies costeras donde se presenta la altitud más baja.

3.2. Recopilación de información

3.2.1. Recopilación de datos in-situ

La información correspondiente a las mediciones puntuales de evapotranspiración se realizó por medio de la técnica de covarianza de flujos turbulentos (CFT). Brevemente, esta técnica proporciona registros cada 30 minutos de los flujos turbulentos entre la superficie de un ecosistema y la atmósfera, estimando el intercambio de materia y energía entre ambos. Estos datos derivan de mediciones de alta frecuencia (10 o 20 Hz) de distintos variables: 1) el vector referente a la velocidad y dirección del viento, y escalares de la concentración del vapor de agua y dióxido de carbono. Esta técnica mide los datos continuamente, sin embargo, a veces se presentan algunos huecos debido a un mal funcionamiento de los instrumentos o a que se presentan condiciones meteorológicas en las que no se cumplen los supuestos de la CFT [106]. Por lo tanto, los registros necesitan un extenso procesamiento posterior adicional.

La información analizada referente a las mediciones puntuales de CFT se recopiló a través del servidor de la red de AmeriFlux, la cual es la red de monitoreo ambiental basada en la técnica de CFT y recopila información de distintos ecosistemas a lo largo del continente americano. Se seleccionaron 4 sitios de monitoreo ubicados dentro del Monzon de Norteamérica, analizándose la información del año 2008, debido a que fue el único periodo en el cual se cuenta con datos de manera consistente de 4 sitios. Los sitios presentan una climatología distinta. El encino, Rayón, Tesopaco y Audubon como se muestra en la Tabla 3.1.

Nombre	Latitud	Longitud	Precipitación Anual promedio (mm)	Periodo
Encino	29.9591	-110.4615	496	2008-2013
Rayón	29.7446	-110.5306	487	2008-2014
Tesopaco	27.8446	-109.2977	647	2004-2008
Audubon	31.5907	-110.5104	438.35	2002-2011

Cuadro 3.1: Ubicaciones seleccionadas para la recolección del conjunto de datos de evapotranspiración

El Encino se encuentra en el norte de Sonora, México, con coordenadas de $29,9591N$ y $-110,4615W$, en una zona rural, escasamente poblada, caracterizada por sierras y valles con tendencia de norte a sur que forman parte de la Sierra Madre Occidental, el sitio se encuentra en una suave ladera de la montaña, a unos $21km$ al sureste de Meresichic, Sonora.

Ubicado en las coordenadas $29,741N$ y $110,5337W$, Rayón se encuentra dentro de la cuenca Sierra Los Locos, Sonora. El área disfruta de un clima estepario cálido con una temperatura media anual de $21^{\circ}C$. Durante la temporada del Monzón de Norteamérica, de julio a septiembre, se recibe aproximadamente el 76 % de la precipitación total anual del sitio. Esto resulta en un pico de verdor en la vegetación durante el mes de agosto. En el sitio, la vegetación incluye una variedad de árboles y arbustos caducifolios tales como el torote papelío (*Jatropha cordata*), el ocotillo arbóreo (*Fouquieria macdougalii*), la acacia (*Acacia cochliacantha*), el palo verde (*Parkinsonia praecox*), la mimosa mexicana (*Mimosa distachya*), el mezquite de terciopelo (*Prosopis velutina*) y el cactus de organillo (*Stenocereus thurberi*).

Tesopaco, se encuentra ubicado en el sureste de Sonora, México con coordenadas $27,8446N$ y $-109,2977W$. Este ecosistema se encuentra en una región altamente estacional bajo la influencia del Monzón de América del Norte que aporta alrededor del 70 % de las lluvias de julio a septiembre. El sitio está dominado por árboles leguminosos. Algunas de las especies dominantes son *Lysiloma divaricatum*, *Ipomoea arborescens*, *Acacia cochliacantha*, *Haematoxylum brasiletto* y *Celtis reticulata*.

Por último Audubon, que se encuentra en el rancho de investigación Appleton-Whittell ($31.5907N$, $110.5104W$, elevación 1496 m), en el Valle de Sonoita. El rancho de investigación fue establecido en 1969 como una reserva de investigación ecológica, y es ahora es uno de los mayores sitios de pastizales sin pastoreo y gestionados de forma privada en Arizona. El lugar se regeneró de forma natural tras el incendio forestal Ryan que comenzó el 29 de abril y continuó hasta el 2 de mayo de 2002, quemando el 90 % de la vegetación en pie y la hojarasca de todo el rancho de investigación. El pastizal está dominado por hierbas semidesérticas de clima cálido que incluyen praderas nativas de hierba corta. En la Figura 3.7 se muestran las ubicaciones de los cuatro sitios.

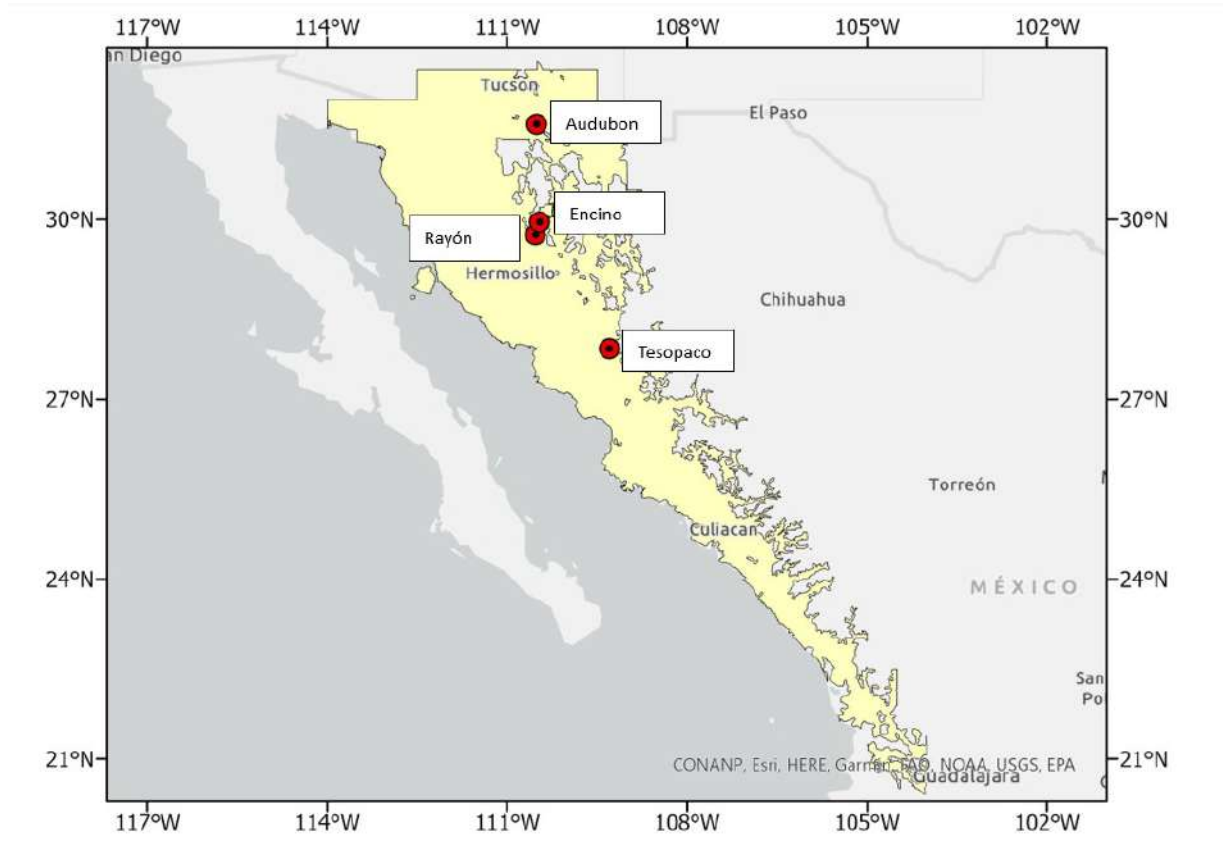


Figura 3.7: Ubicación de los cuatro sitios

Para cada sitio, se recolectó información sobre diversas variables vinculadas al proceso de evapotranspiración. Estas incluyen precipitación (P), temperatura del aire (TA), contenido de agua en el suelo (swc), humedad relativa (RH), radiación neta (Rn), flujo de calor del suelo (G), flujo de calor sensible (H), flujo de calor latente (LE), índice de área foliar (LAI) y evapotranspiración

(ET), tal como se detalla en la Tabla 3.2.

Variables	
Nombre de la variable	Siglas
Humedad relativa	RH
Temperatura del aire	TA
Contenido del agua en el suelo	swc
Radiación neta	Rn
Flujo de calor del suelo	G
Flujo de calor sensible	H
Flujo de calor latente	LE
Precipitación	P
Indice de area foliar	LAI
Evapotranspiración	ET

Cuadro 3.2: Resumen de los datos recogidos para el área de estudio

Para el caso de Tesopaco la radiación global(Rg) se utilizó como sustituto de la radiación neta(Rn), que fue calculada mediante la formula

$$Rg = (SW_{in} - SW_{out}) + (LW_{in} - LW_{out})$$

donde SW_{in} es la radiación de onda corta entrante, SW_{out} es la radiación de onda corta saliente, LW_{in} es la radiación de onda larga entrante y LW_{out} es la radiación de onda larga saliente. En el caso de Encino no se consiguieron datos para el flujo de calor del suelo G .

3.2.1.1. Postprocesamiento de la información

Con el fin de llevar a cabo el post-procesamiento de los datos de evapotranspiración obtenidos a través de la técnica de covarianza de flujos turbulentos, se utilizó el paquete ReddyProc en el lenguaje de programación R. Este paquete permite cargar las series temporales de flujos corregidos por calidad y almacenamiento, así como las variables meteorológicas básicas, y proporciona un entorno de software para realizar la interpolación de los datos faltantes.

Para el llenado de los datos faltantes se identifican tres condiciones:

1. Aunque faltan algunos datos de interés directo, están disponibles los datos meteorológicos referentes a la radiación solar (Rg), la temperatura del aire (T_a) y el déficit de presión de vapor (DVP). Se utilizan estos datos meteorológicos disponibles para calcular las estimaciones de los valores de evapotranspiración que faltan.
2. T_a o DVP son conocidos pero falta la radiación solar Rg . En esta situación, se utilizan los valores de T_a o DVP disponibles para estimar la evapotranspiración faltante.

3. R_g es desconocido. En este caso, se aplican métodos específicos para estimar la radiación global utilizando las variables meteorológicas disponibles y luego se utilizan estos valores estimados para calcular la evapotranspiración.

Si las condiciones meteorológicas son similares se toman promedios del mismo flujo. Ahora si no se cuenta con los datos de las variables meteorológicas (T_a , DVP) y R_g el valor de la variable de interés se calcula tomando el valor medio a la misma hora del día.

3.2.1.2. Control de calidad de la información

■ Balance de energía

Se utilizó el método de cierre de balance de energía para evaluar la calidad de los datos obtenidos de las torres de flujos, siendo esta una técnica comúnmente empleada para este propósito. La energía disponible en el medio se considera igual a la energía que el mismo absorbe, según esta técnica (Ec. 1) [42].

$$\frac{LE + H}{Rn - G} \quad (3.1)$$

Los sitios de estudio mostraron valor alto para el cierre de energía como se muestra en la Tabla 4.1 (para Encino no fue posible evaluar el cierre de energía pues no se contaba con las mediciones de la variable G). Entre más cercano sea el valor a uno más confiables son las mediciones. En promedio, los valores de los sitios de la red Ameriflux y Mexflux son 0.80, con variaciones entre 0.60 y 0.95 [107]. En la actualidad, no hay un límite para el cierre de energía que determine qué datos son aptos para su análisis[42].

- **Balance hídrico** Para evaluar el balance hídrico se utilizó la relación entre la evapotranspiración (ET) y la precipitación (P), representada como (ET/P) . Este parámetro indica la proporción de la precipitación que se convierte en evapotranspiración. Valores cercanos a 1 indican equilibrio entre los componentes del balance hídrico [108].

Se pueden observar en la Tabla 4.1 que se presenta una relación óptima entre la evapotranspiración y la precipitación para los cuatro sitios.

3.2.2. Recopilación de datos de productos satelitales

Se utilizó la información de 39 variables ambientales predictoras obtenidas en el año 2008 con el fin de obtener una representación espacial del entorno en la región de estudio. Se clasificaron en seis categorías estas variables (Tabla 4.2): climáticas, topográficas, fenología de la vegetación, cuerpos de agua superficial, biodiversidad, y factores antropicos. La elección de estas características se fundamentan en los factores de estado y los controles interactivos los cuales determinan la dinámica de los procesos ecosistémicos[109]. Los factores de estado son condiciones abióticas del ambiente que afectan a los organismos pero que ellos no pueden modificar o controlar. Algunos ejemplos son el clima, la topografía, el tipo de suelo, etc. Estos factores establecen el escenario o contexto en el cual ocurren las interacciones ecológicas. Mientras que los controles interactivos corresponden a los procesos, actividades y rasgos de los organismos vivos que sí pueden regularse a nivel de individuo o población.

Esta información se recopiló por medio de distintos productos satelitales, recopilados a través de la plataforma Google Earth Engine.

En la Tabla 4.2, se detalla información general de las variables preliminares escogidas para el modelado de la evapotranspiración. Esta tabla incluye una descripción corta de cada variable, la unidad en que se mide la información y la fuente de la cual se obtienen los datos.

Variables climáticas: El clima es uno de los factores más importantes que influyen en las tasas de evapotranspiración (ET) de una zona. La temperatura es un factor crítico que afecta a las tasas de ET. A medida que aumenta la temperatura, también lo hace la tasa de evaporación de la superficie del suelo y la transpiración de las plantas. La precipitación es un factor climático clave que afecta a las tasas de ET al proporcionar el agua necesaria para la evapotranspiración. En zonas con altos niveles de precipitaciones, el suelo suele estar bien regado y las plantas pueden transpirar más agua, lo que da lugar a mayores tasas de ET. Por el contrario, en zonas con bajos niveles de precipitaciones, el suelo puede estar seco y las plantas pueden sufrir estrés hídrico, lo que puede dar lugar a tasas de ET más bajas.

Se recopiló información climática de referencia a partir del conjunto de datos WorldClim (Versión 1.0), que posee una resolución de aproximadamente 1 km. Este conjunto incluye 19 campos de datos globales, derivados de mediciones promedio mensuales de temperatura y precipitación, recogidas en estaciones meteorológicas de todo el mundo[110].

Variables topográficas: La topografía tiene influencia en la evapotranspiración pues se refiere a las características físicas del terreno, como la elevación, la pendiente y el aspecto, que pueden afectar a la cantidad de radiación solar, viento y precipitaciones que recibe una zona. La pendiente es un factor topográfico que puede influir en los índices de ET. Las zonas con pendientes más pronunciadas tienden a tener mayores tasas de ET debido al aumento de la radiación solar y la exposición al viento, lo que puede dar lugar a mayores tasas de evaporación y transpiración. Por el contrario, las zonas con pendientes más llanas pueden tener tasas de ET más bajas debido a la reducción de la radiación solar y la exposición al viento. La elevación es otro factor topográfico que puede influir en los índices de ET. Las zonas más elevadas tienden a tener menores tasas de ET debido a las temperaturas más frías y a la menor presión atmosférica, que pueden limitar la cantidad de agua que se puede retener en el aire y reducir el potencial de evaporación y transpiración. El aspecto, o la dirección hacia la que se enfrenta una pendiente, también puede afectar las tasas de ET. Las laderas que miran al sur o al oeste tienden a recibir más radiación solar y pueden tener índices de ET más altos, mientras que las laderas que miran al norte o al este pueden tener índices de ET más bajos debido a la radiación solar reducida.

Los datos de elevación digital SRTM (Versión 3) con una resolución aproximada de 30 m se utilizaron para calcular las variables topográficas. Se obtuvieron datos de pendiente y aspecto a partir de esta capa ráster de elevación mediante métodos específicos. También se emplearon los conjuntos de datos ERGo y CSP, que suministran información detallada y multiescala sobre las formas del terreno y los patrones fisiográficos, también denominados facetas del terreno[111].

Fenología de la vegetación: Es esencial disponer de índices de vegetación para evaluar la condi-

ción y el nivel de humedad de la vegetación. Estos índices se derivaron del producto MOD13A1.006, que incluye el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Adicionalmente, se recopilaron datos del producto MCD15A3H (Versión 6), que contiene la fracción combinada de radiación fotosintéticamente activa (FPAR) y el índice de área foliar (LAI). Este último conjunto de datos abarca un periodo de cuatro días y cuenta con una resolución de 500 metros por píxel. El algoritmo utilizado selecciona el píxel más adecuado de las capturas realizadas por los sensores MODIS de los satélites Terra y Aqua de la NASA en dicho periodo. Además, se obtiene información sobre los cambios en la cobertura forestal a nivel global a través del análisis temporal de imágenes Landsat, que permite caracterizar la extensión y variaciones en la cobertura [112].

Cuerpos de agua superficial: La disponibilidad de agua es un factor clave que limita la ET en muchos ecosistemas terrestres, especialmente en aquellos con un clima seco. Cuando la disponibilidad de agua es baja, la ET también será baja, ya que las plantas no tienen suficiente agua para la transpiración. Por otro lado, cuando la disponibilidad de agua es alta, la ET también puede ser alta, ya que las plantas pueden transpirar más agua. En las zonas cercanas a las aguas superficiales, la humedad del aire es mayor debido a la presencia del agua, lo que favorece la transpiración de las plantas y, por lo tanto, aumenta la ET. Además, las plantas que crecen en estas zonas pueden utilizar directamente el agua de las aguas superficiales para la transpiración, lo que también aumenta la ET.

El conjunto de datos del historial de clasificación anual del agua del Centro de Investigación Conjunta (JRC), versión 1, proporciona información sobre la ubicación y distribución a nivel mundial de los cuerpos de agua.

Biodiversidad: La biodiversidad también puede influir en la evapotranspiración (ET) en un área. La diversidad de especies vegetales puede afectar la cantidad y el tipo de agua que se evapora y se transpira en un ecosistema. En general, la biodiversidad vegetal puede aumentar la ET debido a que las diferentes especies tienen diferentes características fisiológicas y morfológicas que les permiten utilizar el agua de diferentes maneras. Por ejemplo, algunas especies pueden tener raíces más profundas que les permiten acceder a agua en el subsuelo, mientras que otras pueden tener hojas más pequeñas que minimizan la pérdida de agua por evaporación.

Se empleó el producto MOD17A3H (Versión 6) para recopilar datos sobre la Productividad Primaria Neta (NNP en inglés) anual con una resolución de píxeles de 500m.

Antrópico: Los factores antrópicos también pueden influir en la evapotranspiración (ET) en un área. Los factores antrópicos incluyen actividades humanas como la urbanización, la agricultura y la construcción de represas y otros proyectos de infraestructura. Para este caso se consideró una variable llamada accesibilidad que se refiere a la distancia al área densamente poblada más cercana. Las áreas que están más alejadas de las áreas densamente pobladas pueden tener niveles más bajos de intervención humana y cambio de uso de la tierra, lo que puede conducir a niveles más altos de cobertura vegetal y tasas potencialmente más altas de evapotranspiración. Por otro lado, las áreas que están más cerca de áreas densamente pobladas pueden tener tasas más altas de urbanización y cambio de uso del suelo, lo que puede conducir a niveles más bajos de cobertura vegetal y tasas de evapotranspiración potencialmente más bajas. Este mapa se ha elaborado gracias

a la colaboración entre el Proyecto Atlas de la Malaria (MAP) de la Universidad de Oxford, Google, el Centro Común de Investigación (CCI) de la Unión Europea y la Universidad de Twente (Países Bajos). Los conjuntos de datos subyacentes utilizados para producir el mapa incluyen carreteras (que comprenden el primer uso a escala mundial de los conjuntos de datos de Open Street Map y Google Roads), ferrocarriles, ríos, lagos, océanos, condiciones topográficas (pendiente y elevación), tipos de cobertura del suelo y fronteras nacionales[113].

3.2.2.1. Post procesamiento de los datos

Se utilizó el software R para convertir los archivos raster descargados desde Google Earth Engine en bases de datos espaciales durante el post-procesamiento de los datos. Estas imágenes de satélite daban lugar a variables distintas representadas por cada archivo raster.

Después de convertirse en bases de datos espaciales, se integraron los archivos raster con los datos recopilados de las mediciones de flujos en las torres para cada uno de los cuatro sitios estudiados. La información de las mediciones in situ se combinó con los datos obtenidos de las imágenes satelitales.

Luego, se generó una matriz de regresión con 45 columnas y 48 filas. Cada uno de los 48 filas representa a uno de los 12 meses del año, multiplicado por los cuatro lugares de estudio. Las columnas de la matriz están organizadas de la siguiente manera: Las columnas de la matriz están organizadas de la siguiente manera:

- 5 columnas corresponden a variables descriptivas, como la latitud, longitud, tiempo, mes y sitio.
- La variable respuesta en una columna corresponde a la evapotranspiración obtenida a partir de las mediciones de las torres de flujos (se muestra en la Tabla 3.2 del estudio).
- Las covariables restantes provienen de las 39 columnas descargadas de Google Earth Engine. Estas variables representan distintas características y factores obtenidos de las imágenes satelitales.

La matriz de regresión resultante permite realizar análisis estadísticos y modelar la relación entre la evapotranspiración y las covariables obtenidas de las imágenes satelitales, teniendo en cuenta los datos obtenidos de las torres de flujos.

3.2.3. Modelamiento

3.2.3.1. Exploración de variables

El coeficiente de correlación de Pearson, que oscila entre -1 y 1 y es 0 en ausencia de correlación, se empleó para medir la asociación lineal entre variables y detectar relaciones entre ellas. Un coeficiente igual o superior a 0.7 se considera indicativo de una alta correlación[114].

También se realizó un Análisis de Componentes Principales que permite resumir y visualizar la información en un conjunto de datos compuesto por observaciones descritas por varias variables cuantitativas correlacionadas.

3.2.3.2. Ajuste del modelo

Se eligió el algoritmo de Bosques Aleatorios [115], como algoritmo de aprendizaje automático para la modelización predictiva de la evapotranspiración, debido a su prominencia en la modelización ecológica. La técnica de Bosques Aleatorios construye árboles de regresión repetidamente a partir de muestras aleatorias de los datos de entrenamiento, en este caso la matriz de regresión. Cada árbol es un modelo independiente del conjunto. Las predicciones de todos los árboles se promedian para producir la estimación final.

Determinar los valores óptimos para los parámetros "ntree" "mtry".^{es} parte del ajuste del modelo de Bosques Aleatorios. Estos parámetros determinan la cantidad de árboles de regresión y el número de variables predictoras seleccionadas al azar en cada división del árbol, respectivamente.

Para establecer los valores adecuados de estos parámetros, se utilizó la técnica de validación cruzada. A continuación, se proporciona una descripción general de cada parámetro y algunas consideraciones comunes:

1. "ntree" (Número de árboles de regresión): Este parámetro indica la cantidad de árboles que se construirán en el modelo de Bosques Aleatorios. Aunque incrementar la cantidad de árboles en un modelo puede elevar su precisión, también conlleva un aumento en el tiempo de entrenamiento y en la complejidad computacional. En general, se elige un número lo suficientemente grande para obtener un rendimiento estable, pero no demasiado grande para evitar un sobreajuste. Valores comunes para "ntree" suelen estar en el rango de 100 a 1000.
2. "mtry" (Número de variables predictoras muestreadas aleatoriamente): Este parámetro determina el número de variables predictoras que se consideran en cada división del árbol. Un valor bajo puede hacer que el modelo sea más sesgado, mientras que un valor alto puede conducir a una mayor diversidad entre los árboles y a un mayor costo computacional. En general, se recomienda elegir un valor que sea una fracción o raíz cuadrada del número total de variables predictoras disponibles.

3.2.3.3. Variables óptimas para la predicción

Cuando se aplican algoritmos de aprendizaje automático es necesario hacer una cuidadosa selección de variables porque, no sólo se mejoran los resultados en el proceso de predicción a partir de modelos de regresión, sino que también se mejora el rendimiento computacional para los cálculos y se facilita la interpretación de los datos de entrada.

Para identificar el subconjunto óptimo de covariables útiles para la predicción se ejecutó una eliminación recursiva de características (RFE), utilizando la función [rfe](#) del paquete caret de Rstudio[116]. RFE es un algoritmo que implementa una selección hacia atrás de covariables basada en la clasificación de la importancia del predictor[116]. Con el objetivo de encontrar un subconjunto de covariables utilizadas para producir el modelo más preciso posible. La técnica RFE construye primero un modelo con todos los predictores y calcula la importancia de cada uno para el modelo final; después elimina el menor predictor y reconstruye el modelo. El mejor subconjunto de covariables se seleccionó en función del error cuadrático medio (RMSE) más bajo tras una validación cruzada de 10 veces.

3.2.3.4. Evaluación del modelo

Se utilizó el método de validación cruzada ($k = 10$) para evaluar el desempeño del modelo en la predicción. Este método permite generar múltiples particiones aleatorias del conjunto de datos en grupos de entrenamiento y prueba, asegurando que cada dato se incluya al menos una vez en ambos grupos [117]. Así, el 90 % de los datos se seleccionaron al azar para el entrenamiento y el 10 % restante para la validación del modelo. Los criterios empleados para medir el rendimiento del modelo incluyeron: a) El cuadrado de la correlación (R^2) (Ecuación 3.2); b) el error absoluto medio (MAE) (Ecuación 3.3); y c) la raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$) (Ecuación 3.4).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (3.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (3.4)$$

donde:

\hat{y}_i =i-ésimo valor observado

\bar{y}_i =valor medio de y_i

n = Número de valores predichos u observados con $i = 1, 2, \dots, n$

3.2.3.5. Mapas de incertidumbre

Las medidas de incertidumbre estiman la fiabilidad de un modelo predictivo. En lo que respecta al desacuerdo de las predicciones de un único modelo, una distribución más estrecha de las predicciones se interpreta como una mayor fiabilidad. La desviación estándar de las predicciones del conjunto de árboles de decisión es la medida de incertidumbre por defecto para los bosques aleatorios [118]. En este sentido se calculó la desviación estándar de las predicciones de todos los árboles para producir los mapas de incertidumbre.

Resultados

4.1. Caracterización a escala local

Con relación a las condiciones meteorológicas, se observó en los cuatro sitios, que la radiación neta alcanzó su punto máximo en el mes de junio y el mínimo en enero. La temperatura del aire mostró variaciones a lo largo del año, con valores que oscilaron entre $11^{\circ}C$ y $33^{\circ}C$ en promedio diario. La temperatura mínima del aire se registró en enero, mientras que la temperatura máxima se alcanzó en junio. Estos datos indican que el verano fue la temporada más cálida, con temperaturas más altas, mientras que el invierno fue la temporada más fría. En cuanto a la precipitación, se observó que la mayoría de los eventos ocurrieron durante la temporada del Monzón de Norteamérica, que abarca los meses de julio a septiembre. Esta temporada se caracterizó por fuertes precipitaciones, lo cual se reflejó en el contenido de agua en el suelo, que mostró un mayor porcentaje durante estos meses. Esto indica que el Monzón de Norteamérica fue el período con mayor actividad de lluvias en la región. Además, las fuertes lluvias durante la temporada del Monzón causaron un aumento notable en la humedad del suelo y el calor latente. Durante este periodo, también se observaron niveles elevados de radiación neta y temperatura, tal como lo indica la (Figura 4.1).

4.2. Balance de energía y balance hídrico

Para el sitio Tesopaco el cierre de balance de energía fue 0.89 Esto significa que aproximadamente el 89 % de la energía entrante se equilibró con la energía saliente. Además, se obtuvo un cierre balance hídrico de 0.69. Para el Rayón se obtuvo un valor de 0.98 en el cierre de balance de energía y de 0.76 en el balance hídrico. Para Encino no fue posible determinar el cierre de balance de energía pues no había información disponible para el flujo de calor del suelo, sin embargo sí fue posible determinar el cierre de balance hídrico con un valor de 0.92. Por otro lado, Audubon presentó un cierre de balance de energía de 1.17 y un cierre de balance hídrico de 0.77 (Tabla 4.1). Un balance hídrico superior a 1 sugiere que hubo un excedente de agua en el sistema, lo cual puede ser beneficioso para el suministro y la disponibilidad de agua. En general se obtuvieron valores cercanos a 1 ,esto indica un buen cierre en los balances, además se corrobora la calidad de la información usada en el

estudio.

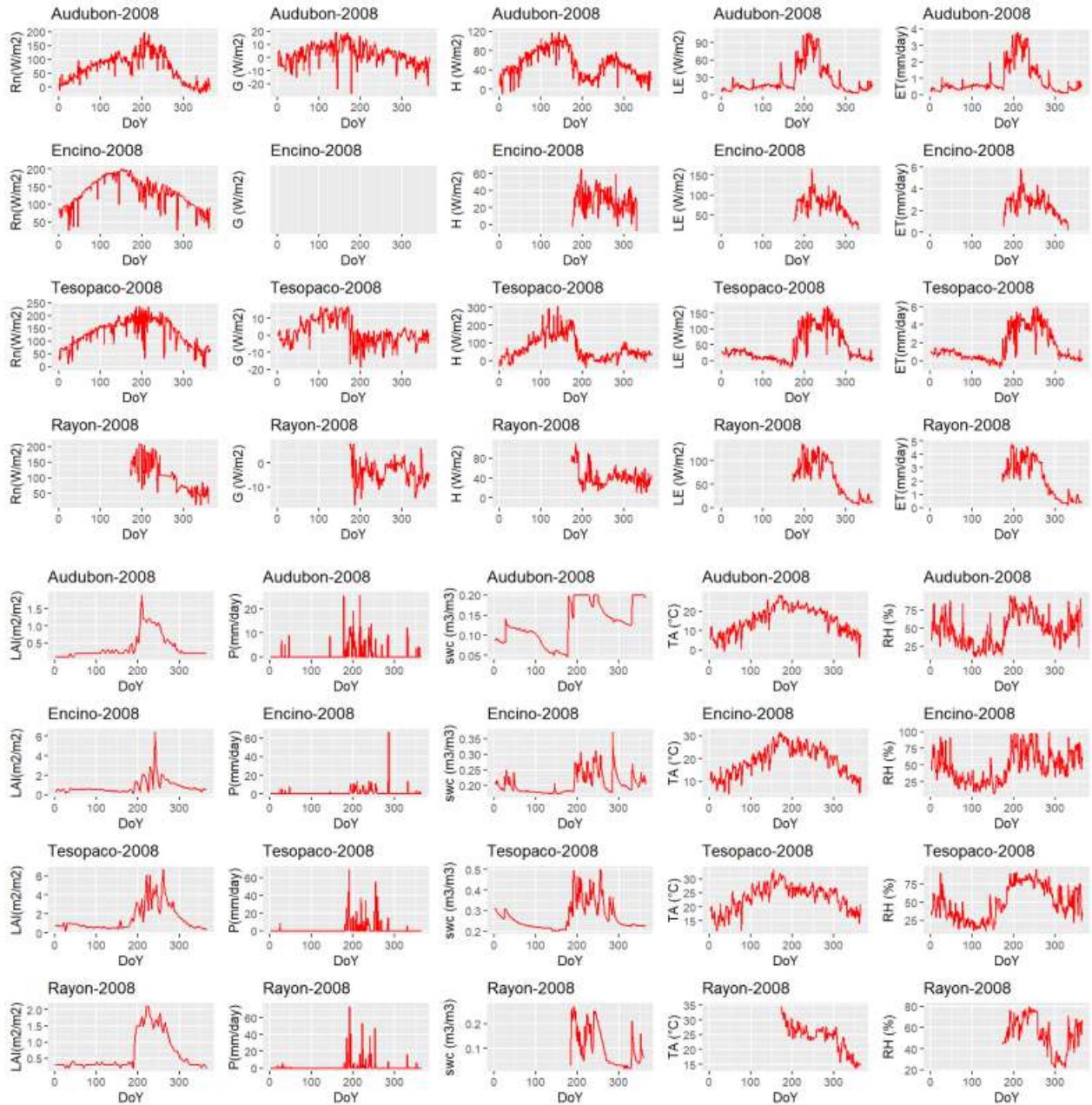


Figura 4.1: Series temporales de las distintas variables para cada sitio

Variables		
Nombre del sitio	$\frac{ET}{P}$	$\frac{\sum (LE+H)}{\sum (Rn-G)}$
Tesopaco	0.697191	0.8920007
Rayón	0.7601027	0.985157
Encino	0.9224952	-
Audubon	0.7738805	1.171992

Cuadro 4.1: Cierre de balances

4.3. Modelado de la dinámica de la evapotranspiración

4.3.1. Variables que tienen influencia en la dinámica de la evapotranspiración

Después de revisar la literatura, se eligieron 39 covariables como posibles variables candidatas para el modelamiento espacial de la evapotranspiración (Tabla 4.2), de las cuales fue descartada la variable “surface water” pues presentaba solo valores nulos. Luego mediante un análisis de correlación de Pearson y un Análisis de Componentes Principales (ACP) se pudieron determinar relaciones entre pares de variables.

Del análisis de correlación de Pearson (Figura 4.2), se ve una alta correlación de la ET con la precipitación (0.78), con el índice de área foliar (0.79), con el NDVI (0.7) y con la variable fpar(0.8). De la misma forma el fpar (Fracción de Absorción de la Radiación Fotosintéticamente Activa) es una medida de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) que es absorbida por la vegetación en un área determinada, lo cual es fundamental para el crecimiento de las plantas. De modo que en general, cuanto mayor sea el fpar, mayor será la cantidad de vegetación y, por lo tanto, mayor será la ET. Otras relaciones prometedoras que se pueden observar, es la de la evapotranspiración con la variable accesibilidad(0.41) y curvatura(0.32). La curvatura se refiere a la forma en que la superficie terrestre cambia suavemente o abruptamente en diferentes direcciones. En general, las áreas con una curvatura más pronunciada pueden presentar condiciones de humedad diferentes en comparación con las áreas con una curvatura más suave. Esto se debe a que la curvatura puede influir en la cantidad de agua disponible en el suelo y en la distribución de la radiación solar.

No	Factor	Covariable	Fuente	Unidad
1-19	Climático	Temperatura media anual (bio01)	WorldClim V1	°C
		Rango diurno medio (bio02)		°C
		Isotermia (bio03)		%
		Estacionalidad de la temperatura (bio04)		°C
		Temperatura máxima del mes más cálido (bio05)		°C
		Temperatura mínima del mes más frío (bio06)		°C
		Rango de temperatura anual (bio07)		°C
		Temperatura media del trimestre más húmedo (bio08)		°C
		Temperatura media del trimestre más seco (bio09)		°C
		Temperatura media del trimestre más cálido (bio10)		°C
		Temperatura media del trimestre más frío (bio11)		°C
		Precipitación anual(bio12)		mm
		Precipitaciones del mes más húmedo(bio13)		mm
		Precipitaciones del mes mas seco (bio14)		mm
		Estacionalidad de las precipitaciones (bio15)		Cofeciente de varia- ción
		Precipitaciones del trimestre más húmedo (bio16)		mm
		Precipitaciones del trimestre mas seco (bio17)		mm
		Precipitaciones del trimestre mas cálido (bio18)		mm
		Precipitaciones del trimestre mas frío (bio19)		mm
20-21		Temperatura promedio (temp_c)	NASA/ASTER_GED	K
		Desviación estándar de la temperatura(temp_c_sdev)		K
22-24		Precipitación media (precip_mean)	CHIRPS	mm/pentad
		Precipitación maxima (precip_max)		mm/pentad
		Precipitación mínima(precip_min)		mm/pentad
27-31	Topografico	Elevación (elevation)	SRTM	m
		Diversidad Topográfica(topo_d)		-
		Indice de carga térmica continua (chili)		-
		Pendiente(slope)		m
		Aspecto (aspect)		Grados
		Curvatura(curvature)		-
		Sombreado (Hillshade)		-
32	Vegetación	NDVI (ndvi)	MOD13A1.006	Indice vegetación
33-34		LAI (lai)	MCD15A3H	Indice de vegetación
		FPAR (fpar)		Indice de vegetación
35		Cobertura forestal(treeCanopyCover)	USGS	%
36		Altura del dosel forestal(forestCanopyHeight)	NASA/JPL	m
37	Hídrico	Frecuencia de la presencia de agua(surfaceWater)	JRC	%
38	Biodiversidad	NPP(npp)	MOD17A3H	—
39	Antrópico	Accesibilidad a las ciudades(accessibility)	MAP	minutos

Cuadro 4.2: Covariables seleccionadas para el proceso de modelamiento de la evapotranspiración

Matriz de Correlacion ET y Covariables ambientales

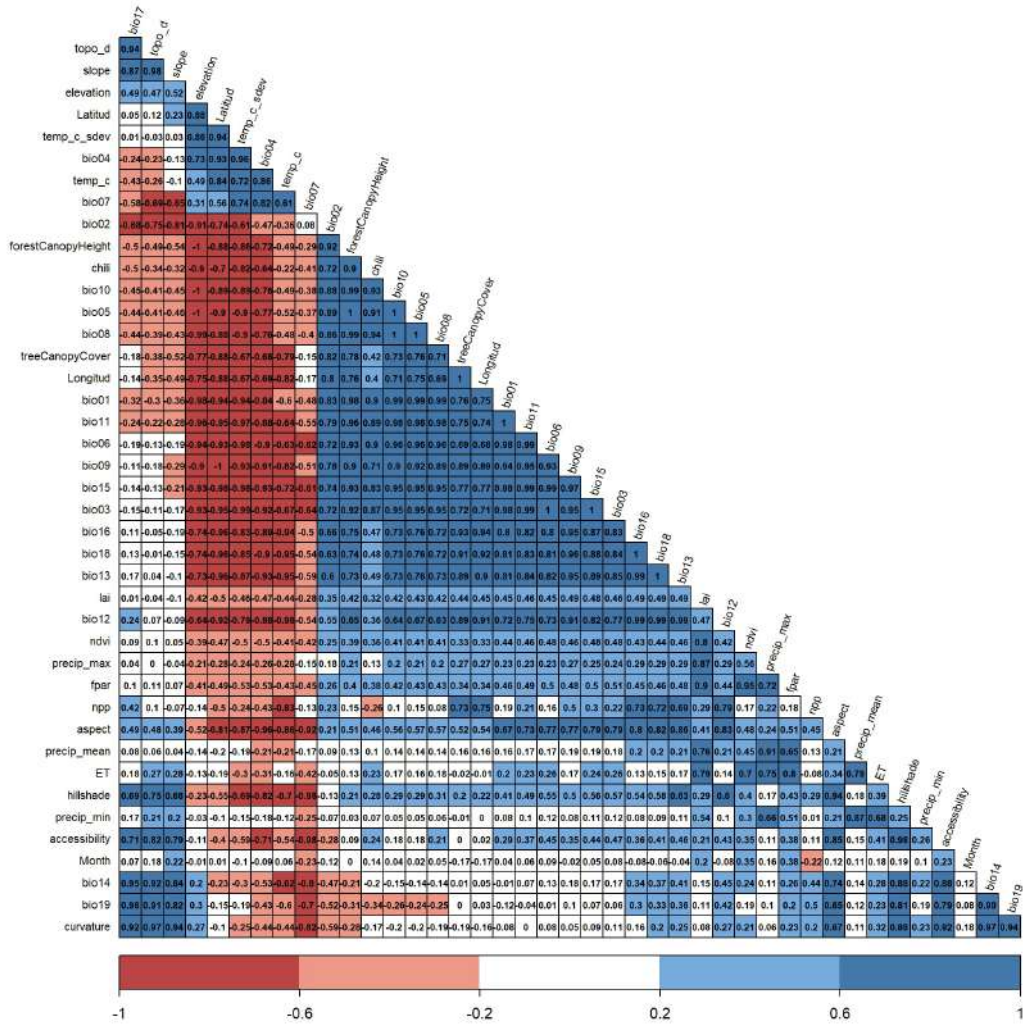


Figura 4.2: Correlación de Pearson

Por otro lado en el Análisis de Componentes Principales se analiza la inercia de las primeras dimensiones. La inercia representa la variabilidad total del conjunto de datos. La afirmación indica que las dos primeras dimensiones del análisis ACP explican el 76,51% de la inercia total del conjunto de datos. Esto significa que una parte significativa de la variabilidad de las variables puede explicarse mediante estas dos dimensiones(Figura 4.3).

El porcentaje mencionado, 76,51 %, se considera elevado, lo que indica que el primer plano (compuesto por las dos primeras dimensiones) capta una parte importante de la variabilidad de los datos. Sugiere que las relaciones y los patrones dentro de los datos pueden representarse y comprenderse bien utilizando esta representación de dimensiones reducidas.

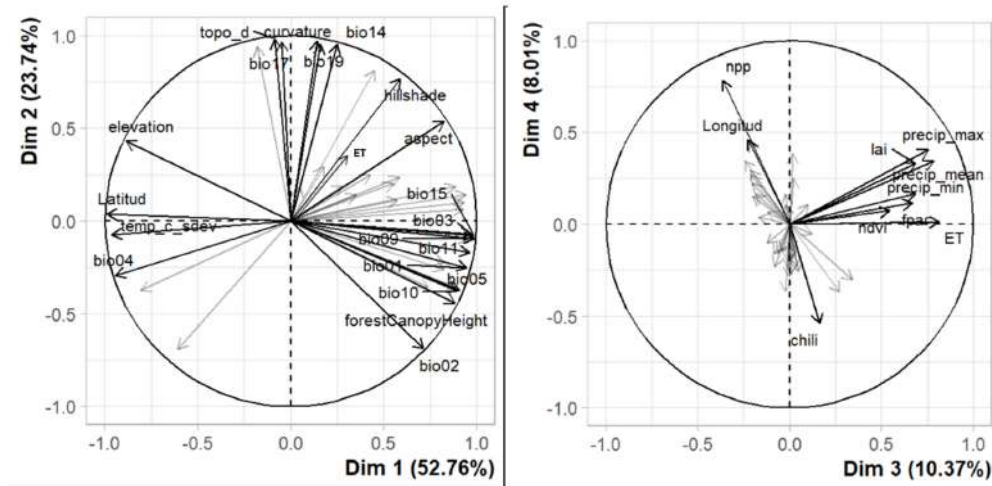


Figura 4.3: Gráfica de correlación de variables

4.4. Ajuste del modelo e importancia de las covariables

Para el modelo de Bosques Aleatorios se empleó un $mtry=4$ y $ntree=500$, así mismo, empleando el método RFE(eliminación recursiva de características) en combinación con la técnica de validación cruzada, se obtuvo que el número óptimo de 13 covariables alcanzó el mayor rendimiento. El rendimiento se evaluó mediante el RMSE (Figura 4.4).

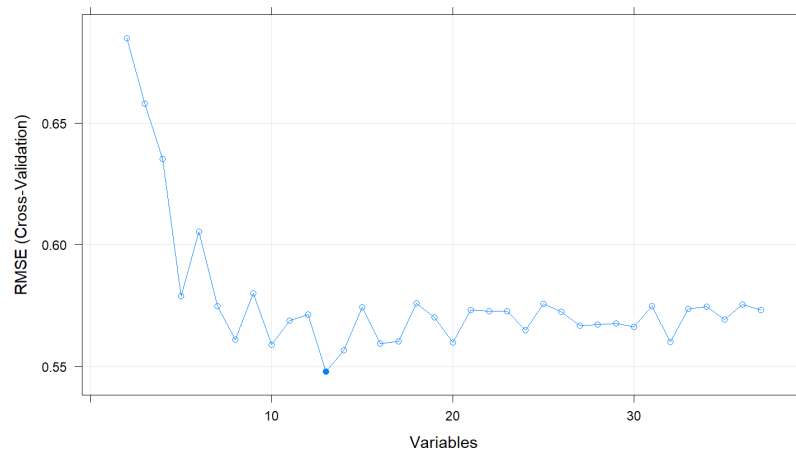
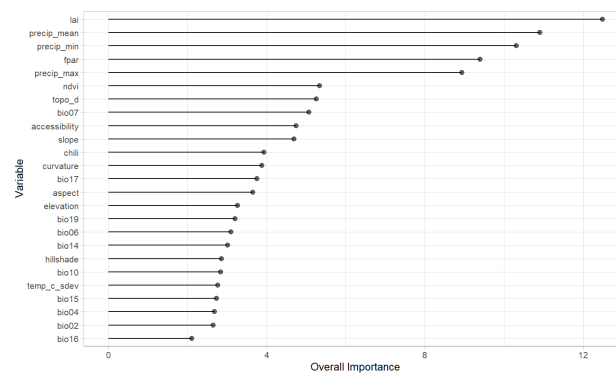


Figura 4.4: Rendimiento de los modelos en el proceso de selección de covariables mediante el método RFE. El punto azul indica el subconjunto con el RMSE más bajo tras la validación cruzada.

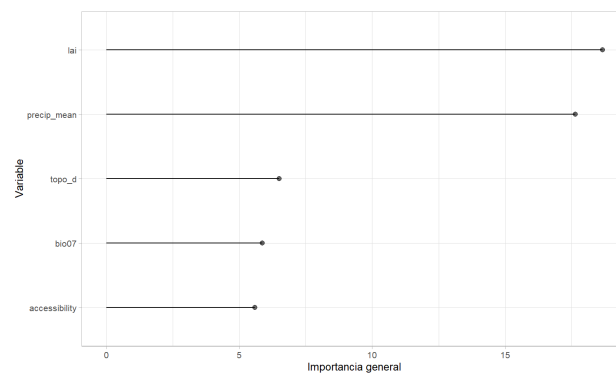
El modelo con las trece covariables seleccionadas demostró tener el menor RMSE (0.54), lo que indica que es capaz de hacer predicciones más precisas en comparación con otras combinaciones de

covariables.

De aquí también se pudo determinar la importancia de las covariables(Figura 4.5a). Sin embargo, al analizar la correlación entre las variables (Figura 4.2), observamos que la precipitación mínima, la precipitación máxima, el índice de vegetación fraccional (fpar) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (ndvi) son variables redundantes y están altamente correlacionadas con el Índice de Área Foliar (lai) y la precipitación media. Por lo tanto, decidimos prescindir de estas variables redundantes y nos quedamos únicamente con lai y precipitación media como variables importantes en nuestro modelo. Con esta selección, generamos nuevamente el proceso de eliminación recursiva para identificar otras variables relevantes en nuestro modelo. Al final del proceso, las cinco variables más importantes para nuestro modelo resultaron ser: el Índice de Área Foliar (lai), la precipitación media (precip mean), el rango de temperatura anual (bio07), la accesibilidad (Accessibility) y la diversidad topográfica (topo d). Estos resultados se pueden observar en la Figura 4.5b.



(a) Diagrama mostrando las variables de mayor importancia en el modelo Bosques Aleatorios para la estimación de la evapotranspiración.



(b) Diagrama de las variables mas importantes luego de eliminar redundancia estadística

Figura 4.5: importancia de variables

4.5. Rendimiento del modelo

Al evaluar el modelo, los resultados mostraron un coeficiente de determinación (R^2) de 0.80, indicando un ajuste bastante adecuado del modelo a los datos reales. Además, se registró un Error Absoluto Medio (MAE) de 0.45, demostrando que las predicciones del modelo son altamente precisas.

Por otro lado, se calculó el Error Cuadrático Medio (RMSE), el cual tuvo un valor de 0.6. Este valor bajo indica que el modelo también tiene una buena precisión en la estimación de la variable objetivo. Estos resultados se pueden consultar en la Tabla 4.3 del estudio.

Modelo	R^2	MAE	$RMSE$
Bosques Aleatorios	0.8	0.45	0.6

Cuadro 4.3: **Estadísticas de validación cruzada del modelo para predecir la evapotranspiración.** R^2 : coeficiente de determinación, MAE : error medio absoluto, $RMSE$: error cuadrático medio

Asimismo, en la Figura 4.6 se muestra la relación entre los valores pronosticados por el modelo y los valores observados. A través de esta visualización gráfica, es posible observar el ajuste de las predicciones del modelo a los valores reales, lo que mejora la comprensión sobre la precisión y fiabilidad del modelo.

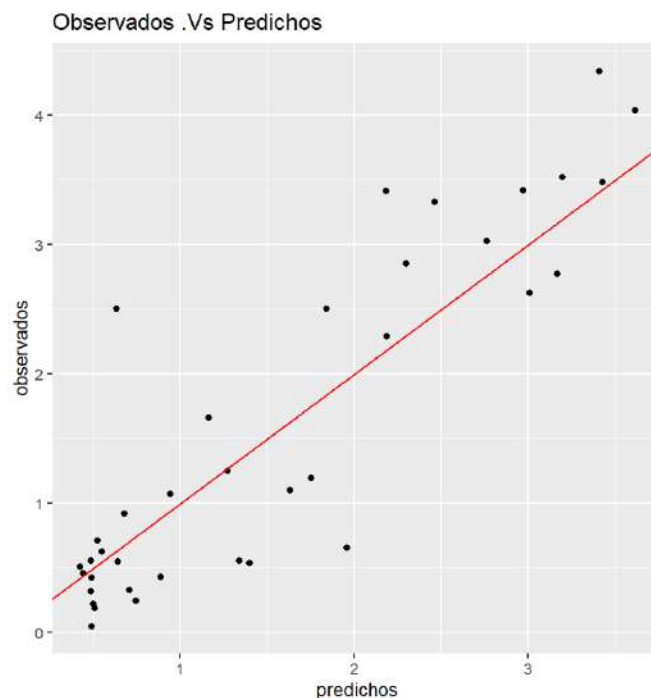


Figura 4.6: Valores observados Vs. predichos del conjunto de datos de validación cruzada ($k=10$) del modelo de Bosques Aleatorios, para predecir la evapotranspiración.

4.6. Predicciones

Durante el estudio, se estimó que la evapotranspiración (ET) en la región varió en un rango de 0,30 a 3,9. Estos valores representan la cantidad de agua que se evapora y se transpira en la región durante el período analizado. Los valores más altos de evapotranspiración se presentan durante la temporada del monzón de Norteamérica. Durante esta temporada, que generalmente ocurre de julio a septiembre, se experimenta un aumento significativo en la precipitación, lo que resulta en una mayor disponibilidad de agua para la evapotranspiración en la región. Este incremento en la disponibilidad de agua favorece un aumento en la tasa de evapotranspiración, especialmente en áreas con vegetación densa y activa. En contraste, durante el invierno, la disminución en la precipitación limita la cantidad de agua disponible para la evapotranspiración. Además, las temperaturas más frías durante esta época pueden reducir la tasa de transpiración de las plantas, lo cual también afecta la tasa de evapotranspiración. Los mapas de distribución espacial de la evapotranspiración se aprecian en la Figura 4.7.

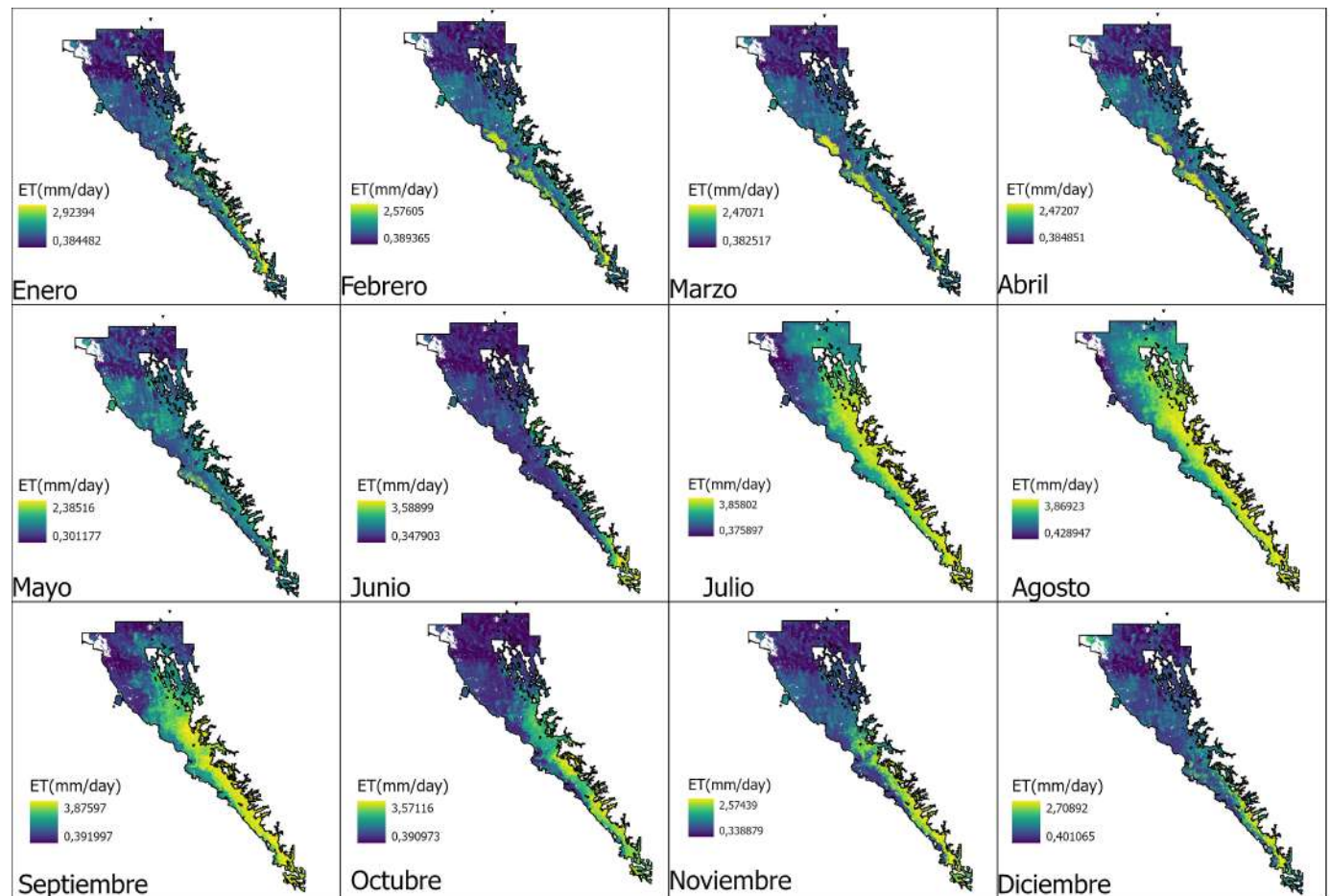


Figura 4.7: Mapa de predicción de ET para cada mes del año 2008.

Por otro lado, la incertidumbre del modelo varió entre 0.005 y 0.19. Los valores más cercanos a 0,005 indican una menor incertidumbre, lo que implica una mayor confianza en las predicciones del modelo. Por otro lado, los valores más cercanos a 0,19 indican una mayor incertidumbre, lo que implica que las predicciones podrían tener un margen de error más amplio (Figura 4.8)

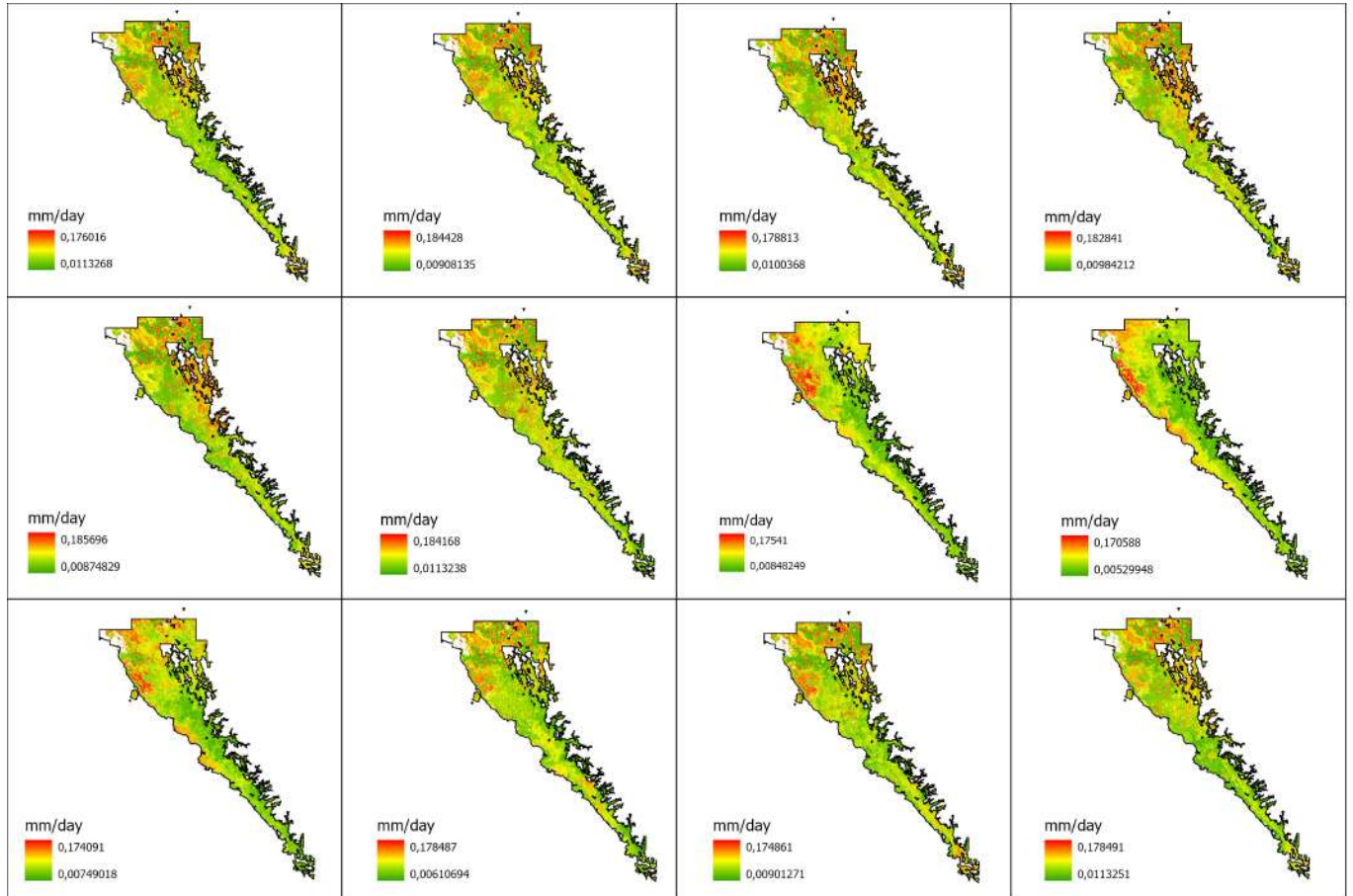


Figura 4.8: Mapas de incertidumbre.

Discusión

Los resultados obtenidos proporcionan evidencia que respalda la hipótesis planteada. Se observó que los valores más altos de evapotranspiración (ET) se presentaron durante la temporada del monzón de Norteamérica, que es una época caracterizada por precipitaciones intensas y temperaturas más elevadas. Esto sugiere que, durante la estación húmeda, la disponibilidad de energía, en forma de calor y radiación solar, juega un papel crucial en estimular tasas de ET más altas. Por otro lado, en la temporada seca o cuando la disponibilidad de humedad es limitada, los valores de ET fueron más bajos. Esto respalda la idea de que, durante la estación seca, la principal limitación para la ET es la disponibilidad de humedad en el suelo y la vegetación.

En conjunto, estos resultados sugieren que los factores ambientales que influyen en la dinámica de la ET en la región varían según la temporada. Durante la estación húmeda, la disponibilidad de energía es un factor dominante, mientras que, en la estación seca, la disponibilidad de humedad juega un papel más significativo en la regulación de la ET. Esto respalda la hipótesis de que la disponibilidad de humedad controla la ET en la estación seca, mientras que la disponibilidad de energía lo hace en la estación húmeda.

Los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan evidencia a favor de la hipótesis propuesta. El modelo para estimar la Evapotranspiración(ET) en una ecorregión semiárida demostró un buen rendimiento durante el proceso de validación cruzada, de acuerdo con la evaluación de la precisión del modelo a través de la métrica RMSE(Error Cuadrático Medio) para cuantificar cuán cercanas están las predicciones del modelo a los valores reales. El hecho de que el modelo haya alcanzado un alto nivel de precisión, como se refleja en un bajo valor de RMSE, indica que es capaz de realizar predicciones muy precisas en función de las trece covariables específicas seleccionadas[119]. Esto subraya la importancia crítica de la elección precisa de variables, ya que constituye el paso inicial y esencial para un proceso de modelado exitoso[120][121].

La importancia de estas trece covariables específicas se destaca en los resultados. Estas variables se han identificado como las más informativas y relevantes para abordar la problemática de la ET en la región semiárida bajo estudio. En otras palabras, son fundamentales para comprender y predecir con precisión la ET en este contexto particular. El modelo se beneficia significativamente de la inclusión de estas variables, lo que confirma la hipótesis inicial de que ciertos factores son esenciales para el proceso de ET en esta región.

No obstante, es importante ser cauteloso y no dar por sentado que el modelo funcionará de la misma manera en todas las situaciones. Por lo tanto, se enfatiza la necesidad de llevar a cabo una validación adicional en datos independientes. Esto significa que el modelo debe ser probado en conjuntos de datos que no hayan sido utilizados previamente en el proceso de entrenamiento ni en la validación cruzada[122]. Esta validación en datos independientes es una etapa crucial para determinar si el modelo puede generalizarse con éxito y ser aplicado de manera efectiva en el mundo real, más allá del conjunto de datos utilizado para su desarrollo. Garantizar la capacidad de generalización es esencial para la utilidad y confiabilidad del modelo en situaciones prácticas[120].

Se pudieron identificar además las cinco variables más importantes en la estimación de la ET en nuestro modelo. Los resultados indican que la variable más importante es el índice de área foliar(LAI) es una medida crucial utilizada en la estimación de la dinámica y densidad del dosel de la vegetación, siendo un indicador sensible a las modificaciones en la cantidad de follaje presente en la vegetación[123]. Para el LAI, investigaciones previas han documentado su eficacia en la estimación de la variación del contenido de humedad en la vegetación, esto debido a la relación presente entre la captura de humedad proveniente del suelo, la capacidad de infiltración de la humedad del suelo, y la dinámica de la humedad en el suelo por la acción de la vegetación[124][125][126], lo cual establece una relación directa con el proceso de Evapotranspiración (ET). La capacidad del LAI para proporcionar información valiosa sobre la influencia de la cobertura vegetal en la ET se aprecia como un aporte significativo en nuestro análisis.

La precipitación media se destaca como la segunda variable más influyente en nuestro estudio, y su relación directa con la Evapotranspiración(ET) es destacable. La precipitación media tiene un impacto significativo en el balance de humedad en un área determinada[127]. En períodos de lluvia o mayor precipitación, se incrementa la humedad disponible en el suelo, lo que a su vez puede estimular tasas más altas de ET. Por otro lado, en temporadas de sequía o con baja precipitación, la humedad del suelo disminuye, y esto puede influir en la reducción de las tasas de ET[98]. Esta relación es esencial en la comprensión de los procesos hidrológicos y, en particular, en el análisis de la ET en la región estudiada.

La tercera variable en orden de importancia es la diversidad topográfica, la cual también ejerce una influencia considerable en los procesos de Evapotranspiración (ET) en la región de estudio. La topografía del terreno puede variar significativamente, y estas variaciones tienen un impacto directo en la distribución del agua en el paisaje[128]. Las áreas con mayor diversidad topográfica pueden presentar una mayor variabilidad en la disponibilidad de agua. Las zonas con elevaciones más altas pueden acumular agua de lluvia, mientras que las áreas de menor elevación pueden experimentar un flujo de agua más rápido[129]. Esta variabilidad topográfica influye en la cantidad de agua que está disponible para la vegetación y, por lo tanto, en las tasas de ET.

Siguiendo el análisis de las variables más influyentes, se destacan dos factores adicionales de gran relevancia: el rango de temperatura anual y la accesibilidad. El rango de temperatura anual, que abarca la variación entre las temperaturas más altas y más bajas a lo largo del año, juega un papel crítico en la regulación de la Evapotranspiración (ET) en la región de estudio. En particular, durante las temporadas de sequía, las altas temperaturas pueden dar lugar a una mayor evaporación de la cobertura vegetal, lo que a su vez disminuye el contenido de humedad[130]. En cuanto a la accesibilidad, a medida que las áreas se vuelven más accesibles, es decir, más fáciles de alcanzar desde un punto de referencia, es posible que se experimenten cambios en el uso de la tierra, como una

mayor urbanización[131]. La urbanización a menudo implica la eliminación de vegetación natural y la construcción de áreas edificadas. Esto puede reducir la cobertura vegetal y, por lo tanto, afectar la ET. Utilizar estas variables en nuestro modelo nos permitió realizar predicciones precisas y comprender mejor los factores que afectan la ET.

Los datos revelan que la ET varía significativamente en un rango que va desde 0.30 mm/day hasta 3.9 mm/day, lo que representa la cantidad de agua que se pierde debido a la evaporación y la transpiración de la vegetación en la región durante el período analizado. Un hallazgo esencial de este resultado es la marcada influencia de la temporada del monzón de Norteamérica en los valores de ET. En una región semiárida, como la estudiada, el monzón adquiere una importancia excepcional, ya que este fenómeno climático aporta una cantidad significativa de agua a través de precipitaciones intensas y temperaturas más elevadas durante su período de influencia. La consecuencia directa es un aumento sustancial de la humedad en el suelo, lo que estimula tasas de evaporación y transpiración mucho más altas en comparación con otras estaciones del año.

Los análisis realizados sobre la evapotranspiración (ET) en la región de estudio arrojan resultados que resaltan la fuerte influencia de la temporada de monzón en los patrones de ET a lo largo del año[132]. Los datos revelan que la ET varía significativamente en un rango que va desde 0.30 mm/día hasta 3.9 mm/día, lo que representa la cantidad de agua que se pierde por la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación durante el período analizado.

Un hallazgo clave es que los valores más altos de ET ocurren precisamente durante los meses de verano, cuando la región se encuentra bajo la influencia del monzón de Norteamérica. En una región semiárida como esta, la llegada del monzón resulta crítica, ya que este fenómeno climático aporta un volumen importante de precipitación en un período concentrado de tiempo[133]. Las lluvias monzónicas, junto con el aumento de las temperaturas, derivan en un incremento sustancial de la humedad en el suelo durante los meses de junio a septiembre. Esta mayor disponibilidad hídrica en el suelo y en el contenido de humedad de la vegetación se traduce en tasas de ET significativamente más elevadas en comparación con el resto del año, cuando la aridez de la región limita los procesos de evapotranspiración. Es crucial además resaltar que esta marcada variabilidad de la ET en una región semiárida tiene implicaciones significativas para la gestión de los recursos hídricos. Durante la temporada del monzón, cuando se observan los valores más altos de ET, la vegetación y el suelo tienen acceso a una mayor cantidad de agua, lo que puede afectar la disponibilidad de agua para diferentes usos, como la agricultura y el abastecimiento de agua potable. Esto puede llevar a desafíos adicionales en la gestión de recursos hídricos en una región que ya enfrenta limitaciones en términos de disponibilidad de agua.

En cuanto a la evaluación del modelo de Bosques Aleatorios implementado con el método de Eliminación Recursiva de Características (RFE) ha proporcionado resultados altamente alentadores en la estimación de la Evapotranspiración (ET) en la región semiárida bajo estudio. El coeficiente de determinación (R^2) calculado alcanzó un valor sólido de 0.80, lo que indica que el modelo se ajusta de manera razonable a los datos observados[119]. Esta cifra sugiere que aproximadamente el 80 % de la variabilidad en la ET real se puede explicar mediante las variables predictoras incluidas en el modelo, respaldando así la relación significativa entre estas variables y la ET. Además, el bajo valor del Error Absoluto Medio (MAE) de 0.45 indica que el modelo tiene una excelente precisión en sus predicciones, ya que la magnitud promedio de los errores entre las predicciones del modelo y los valores reales de ET es mínima. Estos resultados conjuntos reflejan la solidez del modelo de Bosques

Aleatorios con RFE en la representación de los procesos hidrológicos en la región semiárida.

De modo que los resultados obtenidos proporcionan evidencia que respalda la hipótesis planteada. Pues se observó que los valores más altos de evapotranspiración (ET) se presentaron durante la temporada del monzón de Norteamérica. Esto sugiere que, durante la estación húmeda, la disponibilidad de energía, en forma de calor y radiación solar, juega un papel crucial en estimular tasas de ET más altas. Por otro lado, en la temporada seca o cuando la disponibilidad de humedad es limitada, los valores de ET fueron más bajos[134][135]. Esto respalda la idea de que, durante la estación seca, la principal limitación para la ET es la disponibilidad de humedad en el suelo y la vegetación.

En conjunto, estos resultados sugieren que los factores ambientales que influyen en la dinámica de la ET en la región varían según la temporada. Durante la estación húmeda, la disponibilidad de energía es un factor dominante, mientras que, en la estación seca, la disponibilidad de humedad juega un papel más significativo en la regulación de la ET. Esto respalda la hipótesis de que la disponibilidad de humedad controla la ET en la estación seca, mientras que la disponibilidad de energía lo hace en la estación húmeda.

Finalmente es valioso destacar que una limitación clave de este estudio resultó ser la disponibilidad limitada de datos de evapotranspiración (ET), lo que puede influir en la incertidumbre asociada con los resultados[136]. A pesar de los resultados alentadores obtenidos en este análisis, la falta de datos suficientes de ET puede plantear interrogantes sobre la representatividad de los resultados y su aplicabilidad en un contexto más amplio. Sin embargo, es importante destacar que este estudio representa un primer esfuerzo significativo para escalar datos de evapotranspiración de la red MexFlux a nivel de una región semiárida específica. Esto abre un camino prometedor para futuras investigaciones en otras regiones y para una mayor comprensión de la ET en diversos biomas.

Conclusión

- El modelo de Bosques Aleatorios implementado en este estudio demostró ser efectivo para estimar la evapotranspiración (ET) a escala regional en una zona semiárida de México, logrando un coeficiente de determinación (R^2) de 0.80 y bajos errores (MAE de 0.45 y RMSE de 0.6). Esto respalda el uso de técnicas de aprendizaje automático para escalar mediciones puntuales de ET.
- Las variables ambientales más influyentes en la dinámica de la ET resultaron ser el Índice de Área Foliar (LAI), la precipitación media, el rango de temperatura anual, la accesibilidad y la diversidad topográfica. Estas variables proporcionan información crucial sobre la vegetación, clima, topografía y actividad humana en la región.
- La ET en la región de estudio varía significativamente entre 0.30 y 3.9 mm/día. Los valores más altos ocurren durante la temporada del Monzón de Norteamérica (julio-septiembre), cuando aumenta la disponibilidad de agua. Esto resalta la influencia del Monzón en la dinámica hídrica regional.
- La hipótesis planteada se confirmó parcialmente. Durante la temporada húmeda del Monzón, la ET está limitada principalmente por la disponibilidad de energía. Mientras que en la temporada seca, la limitante es la disponibilidad de humedad en el suelo y la vegetación.
- En conjunto, este estudio provee una metodología novedosa para escalar mediciones puntuales de ET usando aprendizaje automático, lo cual tiene aplicaciones para entender la dinámica hídrica regional y mejorar la gestión de recursos hídricos.

Bibliografía

- [1] G. Louppe, *Understanding Random Forests: From Theory to Practice*. PhD thesis, University of Liège, 2014.
- [2] “Random forest.” <https://www.ibm.com/cloud/learn/random-forest>.
- [3] P. A. Pontifes, , P. M. García-Meneses, L. Gómez-Aíza, A. I. Monterroso-Rivas, M. C. Chávez, , , and and, “Land use/land cover change and extreme climatic events in the arid and semi-arid ecoregions of mexico,” *ATMÓSFERA*, vol. 31, pp. 355–372, Oct. 2018.
- [4] *Ecological regions of North America: Toward a common perspective*. 1997.
- [5] L. Zhang, J. Xiao, Y. Zheng, S. Li, and Y. Zhou, “Increased carbon uptake and water use efficiency in global semi-arid ecosystems,” *Environmental Research Letters*, vol. 15, p. 034022, Feb. 2020.
- [6] R. J. Scholes, “The future of semi-arid regions: A weak fabric unravels,” *Climate*, vol. 8, p. 43, Mar. 2020.
- [7] N. V., *Evapotranspiration in the soil-plant-atmosphere system*. Springer, 2012.
- [8] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Evapotranspiración del cultivo*. Roma: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO), 2006.
- [9] R. G. Allen, L. S. Pereira, T. A. Howell, and M. E. Jensen, “Evapotranspiration information reporting: I. factors governing measurement accuracy,” *Agricultural Water Management*, vol. 98, pp. 899–920, Apr. 2011.
- [10] J. B. Fisher, K. P. Tu, and D. D. Baldocchi, “Global estimates of the land–atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, pp. 901–919, Mar. 2008.
- [11] J. Zeng, Q. Zhang, Y. Zhang, P. Yue, Z. Yang, S. Wang, L. Zhang, and H. Li, “Enhanced impact of vegetation on evapotranspiration in the northern drought-prone belt of china,” *Remote Sensing*, vol. 15, p. 221, Dec. 2022.
- [12] Y. Tang, J. Huo, D. Zhu, T. Gao, and X. Jiang, “Spatio-temporal variation of precipitation and evaporation on the tibetan plateau and their influence on regional drought,” *Atmosphere*, vol. 13, p. 1323, Aug. 2022.

- [13] T. Xu, Z. Guo, S. Liu, X. He, Y. Meng, Z. Xu, Y. Xia, J. Xiao, Y. Zhang, Y. Ma, and L. Song, "Evaluating different machine learning methods for upscaling evapotranspiration from flux towers to the regional scale," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 123, pp. 8674–8690, Aug. 2018.
- [14] Y.-A. Liou and S. Kar, "Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms—a review," *Energies*, vol. 7, pp. 2821–2849, Apr. 2014.
- [15] C. H. B. PRIESTLEY and R. J. TAYLOR, "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters," *Monthly Weather Review*, vol. 100, pp. 81–92, Feb. 1972.
- [16] J. L. Monteith, "Evaporation and environment.," *Symposia of the Society for Experimental Biology*, vol. 19, pp. 205–34, 1965.
- [17] B. Choudhury, "Global pattern of potential evaporation calculated from the penman-monteith equation using satellite and assimilated data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 61, pp. 64–81, July 1997.
- [18] M. H. Kazemi, J. Shiri, P. Marti, and A. Majnooni-Heris, "Assessing temporal data partitioning scenarios for estimating reference evapotranspiration with machine learning techniques in arid regions," *Journal of Hydrology*, vol. 590, p. 125252, Nov. 2020.
- [19] L. B. Ferreira, F. F. da Cunha, R. A. de Oliveira, and E. I. F. Filho, "Estimation of reference evapotranspiration in brazil with limited meteorological data using ANN and SVM – a new approach," *Journal of Hydrology*, vol. 572, pp. 556–570, May 2019.
- [20] S. S. Zanetti, E. F. Sousa, V. P. Oliveira, F. T. Almeida, and S. Bernardo, "Estimating evapotranspiration using artificial neural network and minimum climatological data," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 133, pp. 83–89, Apr. 2007.
- [21] Y. Feng, Y. Peng, N. Cui, D. Gong, and K. Zhang, "Modeling reference evapotranspiration using extreme learning machine and generalized regression neural network only with temperature data," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 136, pp. 71–78, Apr. 2017.
- [22] B. Petković, D. Petković, B. Kuzman, M. Milovančević, K. Wakil, L. S. Ho, and K. Jermsitiparsert, "Neuro-fuzzy estimation of reference crop evapotranspiration by neuro fuzzy logic based on weather conditions," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 173, p. 105358, June 2020.
- [23] R. Salam and A. R. M. T. Islam, "Potential of RT, bagging and RS ensemble learning algorithms for reference evapotranspiration prediction using climatic data-limited humid region in bangladesh," *Journal of Hydrology*, vol. 590, p. 125241, Nov. 2020.
- [24] A. Elbeltagi, J. Deng, K. Wang, A. Malik, and S. Maroufpoor, "Modeling long-term dynamics of crop evapotranspiration using deep learning in a semi-arid environment," *Agricultural Water Management*, vol. 241, p. 106334, Nov. 2020.
- [25] F. Yang, M. White, A. Michaelis, K. Ichii, H. Hashimoto, P. Votava, A.-X. Zhu, and R. Nemani, "Prediction of continental-scale evapotranspiration by combining modis and ameriflux

- data through support vector machine,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 11, pp. 3452–3461, 2006.
- [26] N. S. Diffenbaugh, F. Giorgi, and J. S. Pal, “Climate change hotspots in the united states,” *Geophysical Research Letters*, vol. 35, Aug. 2008.
 - [27] J. Mosre and F. Suárez, “Actual evapotranspiration estimates in arid cold regions using machine learning algorithms with in situ and remote sensing data,” vol. 13, p. 870, Mar. 2021.
 - [28] Y. Wen, S. Shang, and J. Yang, “Optimization of irrigation scheduling for spring wheat with mulching and limited irrigation water in an arid climate,” vol. 192, pp. 33–44, Oct. 2017.
 - [29] M. L. Reyes, “Degradación de suelos en sonora: el problema de la erosión en los suelos de uso ganadero,” *región y sociedad*, vol. 13, July 2001.
 - [30] I. Noy-Meir, “Desert ecosystems: Environment and producers,” *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 4, pp. 25–51, 1973.
 - [31] E. Jr and J. A. Acosta-gallegos, “Habilidad de estimación de los métodos de evapotranspiración para una zona semiárida del centro de méxico,” *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, vol. 2, p. 399–415, 2011.
 - [32] L. Zhang, W. R. Dawes, and G. R. Walker, “Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale,” *Water Resources Research*, vol. 37, pp. 701–708, Mar. 2001.
 - [33] N. Lu, S. Chen, B. Wilske, G. Sun, and J. Chen, “Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid inner mongolia, china,” *Journal of Plant Ecology*, vol. 4, pp. 49–60, Mar. 2011.
 - [34] L. C. P. Dias, M. N. Macedo, M. H. Costa, M. T. Coe, and C. Neill, “Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the upper xingu river basin, central brazil,” vol. 4, pp. 108–122, Sept. 2015.
 - [35] D. Jiao, X. Ji, J. Liu, L. Zhao, B. Jin, J. Zhang, and F. Guo, “Quantifying spatio-temporal variations of evapotranspiration over a heterogeneous terrain in the arid regions of northwestern china,” vol. 42, pp. 3231–3254, Feb. 2021.
 - [36] K. Wang, R. E. Dickinson, M. Wild, and S. Liang, “Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 1. model development,” vol. 115, Oct. 2010.
 - [37] B. Wang, X. Yue, H. Zhou, and J. Zhu, “Impact of diffuse radiation on evapotranspiration and its coupling to carbon fluxes at global fluxnet sites,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 322, p. 109006, July 2022.
 - [38] J. L. and J. H., “Spatial and temporal variation in evapotranspiration,” in *Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications*, InTech, Nov. 2011.

- [39] H. Li, Z. Chen, Z. Jiang, L. Sun, K. Liu, and B. Liu, “Temporal-spatial variation of evapotranspiration in the yellow river delta based on an integrated remote sensing model,” *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 9, p. 096047, May 2015.
- [40] S. A. Kurc and E. E. Small, “Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central new mexico,” *Water Resources Research*, vol. 40, Sept. 2004.
- [41] A. Aguilar, H. Flores, G. Crespo, M. Marín, I. Campos, and A. Calera, “Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in northwestern mexico,” *Water*, vol. 10, p. 901, July 2018.
- [42] S. Villarreal, R. Vargas, E. A. Yepez, J. S. Acosta, A. Castro, M. Escoto-Rodriguez, E. Lopez, J. Martínez-Osuna, J. C. Rodriguez, S. V. Smith, E. R. Vivoni, and C. J. Watts, “Contrasting precipitation seasonality influences evapotranspiration dynamics in water-limited shrublands,” *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 121, pp. 494–508, Feb. 2016.
- [43] G. Sun, A. Noormets, M. Gavazzi, S. McNulty, J. Chen, J.-C. Domec, J. King, D. Amatya, and R. Skaggs, “Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of north carolina, USA,” vol. 259, pp. 1299–1310, Mar. 2010.
- [44] J. Moorhead, G. Marek, P. Gowda, X. Lin, P. Colaizzi, S. Evett, and S. Kutikoff, “Evaluation of evapotranspiration from eddy covariance using large weighing lysimeters,” *Agronomy*, vol. 9, p. 99, Feb. 2019.
- [45] M. Hirschi, D. Michel, I. Lehner, and S. I. Seneviratne, “A site-level comparison of lysimeter and eddy covariance flux measurements of evapotranspiration,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, pp. 1809–1825, Mar. 2017.
- [46] S. C. Gutierrez, H. S. Cajachagua, M. S. Huanca, J. F. Rojas, Y. S. Vidal, and J. Cuxart, “Seasonal variability of daily evapotranspiration and energy fluxes in the central andes of peru using eddy covariance techniques and empirical methods,” *Atmospheric Research*, vol. 261, p. 105760, Oct. 2021.
- [47] F. P. Ramírez, “Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos,” *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 5, p. 537, Sept. 2018.
- [48] X. Shan, N. Cui, H. Cai, X. Hu, and L. Zhao, “Estimation of summer maize evapotranspiration using MARS model in the semi-arid region of northwest china,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 174, p. 105495, July 2020.
- [49] F. Granata, “Evapotranspiration evaluation models based on machine learning algorithms—a comparative study,” *Agricultural Water Management*, vol. 217, pp. 303–315, May 2019.
- [50] X. Dou and Y. Yang, “Evapotranspiration estimation using four different machine learning approaches in different terrestrial ecosystems,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 148, pp. 95–106, May 2018.
- [51] M. H. Jahangir and M. Arast, “Remote sensing products for predicting actual evapotranspiration and water stress footprints under different land cover,” vol. 266, p. 121818, Sept. 2020.

- [52] Y. Bai, J. Zhang, S. Zhang, F. Yao, and V. Magliulo, “A remote sensing-based two-leaf canopy conductance model: Global optimization and applications in modeling gross primary productivity and evapotranspiration of crops,” vol. 215, pp. 411–437, Sept. 2018.
- [53] S. Dimitriadou and K. G. Nikolakopoulos, “Remote sensing methods to estimate evapotranspiration incorporating MODIS derived data and applications over greece: a review,” SPIE, Aug. 2020.
- [54] T. Fu, X. Li, R. Jia, and L. Feng, “A novel integrated method based on a machine learning model for estimating evapotranspiration in dryland,” *Journal of Hydrology*, vol. 603, p. 126881, Dec. 2021.
- [55] K. Wang and R. E. Dickinson, “A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability,” vol. 50, May 2012.
- [56] G. Burba, *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications*. Nebraska: LI-COR Biosciences, 2005.
- [57] R. E. Kelly, N. A. Drake, and S. L. Barr, eds., *Spatial Modelling of the Terrestrial Environment*. Wiley, Apr. 2004.
- [58] J. S. B. Rivera, “Modelo de riesgo de fuego para la ecorregión de los llanos colombo-venezolanos,” Master’s thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [59] M. Leuenberger, J. Parente, M. Tonini, M. G. Pereira, and M. Kanevski, “Wildfire susceptibility mapping: Deterministic vs. stochastic approaches,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 101, pp. 194–203, Mar. 2018.
- [60] . K. D. Hurwitz, J., *Machine Learning for dummies*. John Wiley Sons, 2018.
- [61] A. Kowalczyk, *Support Vector Machines*. USA: Syncfusion, Inc., 2017.
- [62] A. Wicki, P. Lehmann, C. Hauck, and M. Stähli, “Impact of topography on in-situ soil wetness measurements for regional landslide early warning – a case study from the swiss alpine foreland,” Aug. 2022.
- [63] J. Yang, Y. A. El-Kassaby, and W. Guan, “The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, southwest china,” *Scientific Reports*, vol. 10, Oct. 2020.
- [64] H. A. Gutiérrez-Jurado, E. R. Vivoni, E. Istanbuluoglu, and R. L. Bras, “Ecohydrological response to a geomorphically significant flood event in a semiarid catchment with contrasting ecosystems,” *Geophysical Research Letters*, vol. 34, Dec. 2007.
- [65] I. Geroy, M. Gribb, H. Marshall, D. Chandler, S. Benner, and J. McNamara, “Aspect influences on soil water retention and storage,” *Hydrological Processes*, vol. 25, pp. 3836–3842, Nov. 2011.
- [66] J. E. Cantlon, “Vegetation and microclimates on north and south slopes of cusetunk mountain, new jersey,” *Ecological Monographs*, vol. 23, pp. 241–270, July 1953.
- [67] H. Peng, Y. Jia, C. Zhan, and W. Xu, “Topographic controls on ecosystem evapotranspiration and net primary productivity under climate warming in the taihang mountains, china,” *Journal of Hydrology*, vol. 581, p. 124394, Feb. 2020.

- [68] B. Faber, "SLOPE AND ASPECT EFFECT ON EVAPORATION AS MEASURED BY ATMOMETER," *Acta Horticulturae*, pp. 213–216, Dec. 2004.
- [69] N. Elnaker and T. Zaleski, "The impact of slope aspect on soil temperature and water content," 12.
- [70] B. Fan, W. Tao, G. Qin, I. Hopkins, Y. Zhang, Q. Wang, H. Lin, and L. Guo, "Soil microclimate variation in relation to slope aspect, position, and curvature in a forested catchment," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 290, p. 107999, Aug. 2020.
- [71] M. L. Goulden, R. G. Anderson, R. C. Bales, A. E. Kelly, M. Meadows, and G. C. Winston, "Evapotranspiration along an elevation gradient in california's sierra nevada," *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 117, pp. n/a–n/a, Sept. 2012.
- [72] G. Mmbando and M. Kleyer, "Mapping precipitation, temperature, and evapotranspiration in the mkomazi river basin, tanzania," *Climate*, vol. 6, p. 63, July 2018.
- [73] J. Ning, Z. Gao, R. Shi, and W. Gao, "Evapotranspiration analysis based on topography algorithm in the yellow river delta," in *SPIE Proceedings* (W. Gao, T. J. Jackson, J. Wang, and N.-B. Chang, eds.), SPIE, Sept. 2013.
- [74] I. Reid, "The influence of slope orientation upon the soil moisture regime, and its hydrogeomorphological significance," *Journal of Hydrology*, vol. 19, pp. 309–321, Aug. 1973.
- [75] T. E. Bilir, I. Fung, and T. E. Dawson, "Slope-aspect induced climate differences influence how water is exchanged between the land and atmosphere," *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 126, May 2021.
- [76] E. Vivoni, "Impact of spatially-variable soil thickness and texture on simulated hydrologic conditions in a semiarid watershed in northwest mexico," *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 33, pp. 365–377, 01 2016.
- [77] E. Beaulieu, Y. Lucas, D. Viville, F. Chabaux, P. Ackerer, Y. Godd  ris, and M.-C. Pierret, "Hydrological and vegetation response to climate change in a forested mountainous catchment," *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 2, pp. 1–15, Nov. 2016.
- [78] T. T. Gong, H. M. Lei, D. W. Yang, Y. Jiao, and H. B. Yang, "Effects of vegetation change on evapotranspiration in a semiarid shrubland of the loess plateau, china," Dec. 2014.
- [79] J. Xue and B. Su, "Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications," *Journal of Sensors*, vol. 2017, pp. 1–17, 2017.
- [80] J. Joiner, Y. Yoshida, M. Anderson, T. Holmes, C. Hain, R. Reichle, R. Koster, E. Middleton, and F.-W. Zeng, "Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales," *Remote Sensing of Environment*, vol. 219, pp. 339–352, Dec. 2018.
- [81] X. Mo, S. Liu, Z. Lin, S. Wang, and S. Hu, "Trends in land surface evapotranspiration across china with remotely sensed NDVI and climatological data for 1981–2010," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 60, pp. 2163–2177, Dec. 2015.

- [82] L. Rossato, R. C. S. Alvala, N. J. Ferreira, and J. Tomasella, "Evapotranspiration estimation in the brazil using NDVI data," in *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VII* (M. Owe and G. D'Urso, eds.), SPIE, Oct. 2005.
- [83] R. Sun, X. Gao, C.-M. Liu, and X.-W. Li, "Evapotranspiration estimation in the yellow river basin, china using integrated NDVI data," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, pp. 2523–2534, July 2004.
- [84] A. Mokhtar, H. He, K. Alsafadi, Y. Li, H. Zhao, S. Keo, C. Bai, M. Abuarab, C. Zhang, K. Elbagoury, J. Wang, and Q. He, "Evapotranspiration as a response to climate variability and ecosystem changes in southwest, china," *Environmental Earth Sciences*, vol. 79, June 2020.
- [85] C. N. DAHM, J. R. CLEVERLY, J. E. A. COONROD, J. R. THIBAUT, D. E. MCDONNELL, and D. J. GILROY, "Evapotranspiration at the land/water interface in a semi-arid drainage basin," *Freshwater Biology*, vol. 47, pp. 831–843, Apr. 2002.
- [86] H. Chen, G. Zhu, K. Zhang, J. Bi, X. Jia, B. Ding, Y. Zhang, S. Shang, N. Zhao, and W. Qin, "Evaluation of evapotranspiration models using different LAI and meteorological forcing data from 1982 to 2017," *Remote Sensing*, vol. 12, p. 2473, Aug. 2020.
- [87] X. Mo, S. Liu, Z. Lin, and W. Zhao, "Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the lushui basin," *Journal of Hydrology*, vol. 285, pp. 125–142, Jan. 2004.
- [88] J. M. Rey, "Modelling potential evapotranspiration of potential vegetation," *Ecological Modelling*, vol. 123, pp. 141–159, Nov. 1999.
- [89] C. L. Wiegand and A. J. Richardson, "Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: II. results," *Agronomy Journal*, vol. 82, pp. 630–636, May 1990.
- [90] Y. Wang, R. Li, J. Hu, X. Wang, C. Kabeja, Q. Min, and Y. Wang, "Evaluations of MODIS and microwave based satellite evapotranspiration products under varied cloud conditions over east asia forests," *Remote Sensing of Environment*, vol. 264, p. 112606, Oct. 2021.
- [91] T. Ning, Z. Li, Q. Feng, W. Chen, and Z. Li, "Effects of forest cover change on catchment evapotranspiration variation in china," *Hydrological Processes*, vol. 34, pp. 2219–2228, Feb. 2020.
- [92] Q. Shao, A. Traylen, and L. Zhang, "Nonparametric method for estimating the effects of climatic and catchment characteristics on mean annual evapotranspiration," *Water Resources Research*, vol. 48, Mar. 2012.
- [93] T. Klein, C. Randin, and C. Körner, "Water availability predicts forest canopy height at the global scale," *Ecology Letters*, vol. 18, pp. 1311–1320, Oct. 2015.
- [94] J. Pokorný and A. Rejšková, "Water cycle management," in *Encyclopedia of Ecology*, pp. 3729–3737, Elsevier, 2008.
- [95] R. H. Waring and S. W. Running, "Water cycle," in *Forest Ecosystems*, pp. 19–57, Elsevier, 2007.

- [96] O. Deng, Y. Li, R. Li, and G. Yang, “Estimation of forest ecosystem climate regulation service based on actual evapotranspiration of new urban areas in guanshanhu district, guiyang, guizhou province, china,” *Sustainability*, vol. 14, p. 10022, Aug. 2022.
- [97] K. J. Nadelhoffer, G. R. Shaver, A. Giblin, and E. B. Rastetter, “Potential impacts of climate change on nutrient cycling, decomposition, and productivity in arctic ecosystems,” in *Global Change and Arctic Terrestrial Ecosystems*, pp. 349–364, Springer New York, 1997.
- [98] W. Verstraeten, F. Veroustraete, and J. Feyen, “Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation,” *Sensors*, vol. 8, pp. 70–117, Jan. 2008.
- [99] M. Du, J. Zhang, Y. Wang, H. Liu, Z. Wang, C. Liu, Q. Yang, Y. Hu, Z. Bao, Y. Liu, J. Jin, X. Zhou, and G. Wang, “Evaluating the contribution of different environmental drivers to changes in evapotranspiration and soil moisture, a case study of the wudaogou experimental station,” *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 243, p. 103912, Dec. 2021.
- [100] M. Irannezhad, D. Chen, and B. Kløve, “The role of atmospheric circulation patterns in agro-climate variability in finland, 1961–2011,” *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, vol. 98, pp. 287–301, Dec. 2016.
- [101] J. Ryu, J. J. Kim, H. Byeon, T. Go, and S. J. Lee, “Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration,” *Environmental Pollution*, vol. 245, pp. 253–259, Feb. 2019.
- [102] B. Wang, R. Wu, and K.-M. Lau, “Interannual variability of the asian summer monsoon: Contrasts between the indian and the western north pacific–east asian monsoons*,” *Journal of Climate*, vol. 14, p. 4073–4090, Oct. 2001.
- [103] C. Li and M. Yanai, “The onset and interannual variability of the asian summer monsoon in relation to land–sea thermal contrast,” *Journal of Climate*, vol. 9, no. 2, pp. 358–375, 1996.
- [104] D. K. Adams and A. C. Comrie, “The north american monsoon,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, pp. 2197–2213, Oct. 1997.
- [105] E. Dinerstein, D. Olson, A. Joshi, C. Vynne, N. D. Burgess, E. Wikramanayake, N. Hahn, S. Palminteri, P. Hedao, R. Noss, M. Hansen, H. Locke, E. C. Ellis, B. Jones, C. V. Barber, R. Hayes, C. Kormos, V. Martin, E. Crist, W. Sechrest, L. Price, J. E. M. Baillie, D. Weeden, K. Suckling, C. Davis, N. Sizer, R. Moore, D. Thau, T. Birch, P. Potapov, S. Turubanova, A. Tyukavina, N. de Souza, L. Pintea, J. C. Brito, O. A. Llewellyn, A. G. Miller, A. Patzelt, S. A. Ghazanfar, J. Timberlake, H. Klöser, Y. Shennan-Farpón, R. Kindt, J.-P. B. Lillesø, P. van Breugel, L. Graudal, M. Voge, K. F. Al-Shammari, and M. Saleem, “An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm,” *BioScience*, vol. 67, pp. 534–545, Apr. 2017.
- [106] T. Foken, R. Leuning, S. R. Oncley, M. Mauder, and M. Aubinet, “Corrections and data quality control,” in *Eddy Covariance*, pp. 85–131, Springer Netherlands, Nov. 2011.
- [107] K. Wilson, A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. Ibrom, B. Law, A. Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oechel, J. Tenhunen, R. Valentini, and S. Verma, “Energy

- balance closure at FLUXNET sites,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113, pp. 223–243, Dec. 2002.
- [108] A. Almeida, A. Ribeiro, F. Leite, R. Souza, M. Gonzaga, and W. Santos, “Water balance in a tropical eucalyptus plantations in the doce river basin, eastern brazil,” *Journal of Agricultural Science*, vol. 11, p. 209, 05 2019.
- [109] F. S. Chapin, P. A. Matson, and P. M. Vitousek, *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer New York, 2011.
- [110] J. S. Barreto and D. Armenteras, “Open data and machine learning to model the occurrence of fire in the ecoregion of “llanos colombo–venezolanos”,” *Remote Sensing*, vol. 12, p. 3921, Nov. 2020.
- [111] T. R. McVicar, T. G. V. Niel, L. Li, M. F. Hutchinson, X. Mu, and Z. Liu, “Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences,” *Journal of Hydrology*, vol. 338, pp. 196–220, May 2007.
- [112] L. C. P. Dias, M. N. Macedo, M. H. Costa, M. T. Coe, and C. Neill, “Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the upper xingu river basin, central brazil,” *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 4, pp. 108–122, Sept. 2015.
- [113] “Google earth engine.” <https://earthengine.google.com/>.
- [114] B. Ratner, “The correlation coefficient: Its values range between 1/-1, or do they?,” *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing*, vol. 17, pp. 139–142, May 2009.
- [115] L. Breiman, “Random forests,” *Machine learning*, vol. 45, pp. 5–32, 2001.
- [116] M. Kuhn, “caret: Classification and regression trainings.”
- [117] Z. R. Pérez-Vázquez, G. Ángeles-Pérez, B. Chávez-Vergara, J. R. Valdez-Lazalde, and M. E. Ramírez-Guzmán, “Enfoque espacial para modelación de carbono en el mantillo de bosques bajo manejo forestal maderable,” *Madera y Bosques*, vol. 27, July 2021.
- [118] T.-M. Dutschmann and K. Baumann, “Evaluating high-variance leaves as uncertainty measure for random forest regression,” *Molecules*, vol. 26, p. 6514, Oct. 2021.
- [119] *Handbook of Irrigation System Selection for semi arid regions*₂₀₂₂, *place = S.l., publisher = CRC PRESS, year = 2022*.
- [120] “10.1162/153244303322753616,” *CrossRef Listing of Deleted DOIs*, vol. 1, 2000.
- [121] M. Kuhn and K. Johnson, *Applied Predictive Modeling*. Springer New York, 2013.
- [122] S. Raschka, “Model evaluation, model selection, and algorithm selection in machine learning,” 2018.
- [123] J. M. CHEN and T. A. BLACK, “Defining leaf area index for non-flat leaves,” *Plant, Cell & Environment*, vol. 15, pp. 421–429, May 1992.
- [124] V. M. Rodri
guez-Moreno and S. H. Bullock, “Comparacio

n espacial y temporal de i

ndices de la vegetacio

n para verdor y humedad y aplicacio

n para estimar LAI en el desierto sonorense,” *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 4, pp. 611–623, May 2018.

- [125] R. Fensholt, I. Sandholt, and M. S. Rasmussen, “Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 91, pp. 490–507, June 2004.
- [126] M. Yebra, A. V. Dijk, R. Leuning, A. Huete, and J. P. Guerschman, “Evaluation of optical remote sensing to estimate actual evapotranspiration and canopy conductance,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 129, pp. 250–261, Feb. 2013.
- [127] J. E. O. Noreña, , C. A. Domínguez-Ramírez, E. E. Vega-Rodríguez, A. E. Darghan-Contreras, L. E. Rodríguez-Molano, , , and and, “Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of colombia,” *Atmósfera*, vol. 30, pp. 63–76, Jan. 2017.
- [128] A. Lintern, J. Webb, D. Ryu, S. Liu, U. Bende-Michl, D. Waters, P. Leahy, P. Wilson, and A. W. Western, “Key factors influencing differences in stream water quality across space,” *WIREs Water*, vol. 5, Oct. 2017.
- [129] Y. Fang, L. R. Leung, C. D. Koven, G. Bisht, M. Detto, Y. Cheng, N. McDowell, H. Muller-Landau, S. J. Wright, and J. Q. Chambers, “Modeling the topographic influence on aboveground biomass using a coupled model of hillslope hydrology and ecosystem dynamics,” *Geoscientific Model Development*, vol. 15, pp. 7879–7901, Oct. 2022.
- [130] F. Guo, Z. Su, G. Wang, L. Sun, M. Tigabu, X. Yang, and H. Hu, “Understanding fire drivers and relative impacts in different chinese forest ecosystems,” *Science of The Total Environment*, vol. 605-606, pp. 411–425, Dec. 2017.
- [131] A. Mazrooei, M. Reitz, D. Wang, and A. Sankarasubramanian, “Urbanization impacts on evapotranspiration across various spatio-temporal scales,” *Earth's Future*, vol. 9, Aug. 2021.
- [132] E. R. Vivoni, K. Tai, and D. J. Gochis, “Effects of initial soil moisture on rainfall generation and subsequent hydrologic response during the north american monsoon,” *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, pp. 644–664, June 2009.
- [133] S. Papuga and E. Small, “Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central new mexico,” *Water Resour. Res.*, vol. 40, 09 2004.
- [134] R. Whitley, J. Beringer, L. B. Hutley, G. Abramowitz, M. G. D. Kauwe, R. Duursma, B. Evans, V. Haverd, L. Li, Y. Ryu, B. Smith, Y.-P. Wang, M. Williams, and Q. Yu, “A model inter-comparison study to examine limiting factors in modelling australian tropical savannas,” *Biogeosciences*, vol. 13, pp. 3245–3265, June 2016.

- [135] D. Kool, N. Agam, N. Lazarovitch, J. Heitman, T. Sauer, and A. Ben-Gal, “A review of approaches for evapotranspiration partitioning,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 184, pp. 56–70, Jan. 2014.
- [136] X. Wang, B. Gao, and X.-S. Wang, “Investigating the ability of deep learning on actual evapotranspiration estimation in the scarcely observed region,” *Journal of Hydrology*, vol. 607, p. 127506, Apr. 2022.

