



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Patrones climáticos de evapotranspiración total y presencia
de dióxido de azufre en la Reserva de la Biosfera de la
Sierra Gorda

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

Luis Daniel Hernández Balbuena

Asesorado por

Dr. Marco Antonio Mora Ramírez
M. en C. Luis Alberto Rendón Delgado

Puebla Pue.
19 de marzo de 2026



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Patrones climáticos de evapotranspiración total y presencia
de dióxido de azufre en la Reserva de la Biosfera de la
Sierra Gorda

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

Luis Daniel Hernández Balbuena

Asesorado por

Dr. Marco Antonio Mora Ramírez
M. en C. Luis Alberto Rendón Delgado

Puebla Pue.
19 de marzo de 2026

Título: Patrones climáticos de evapotranspiración total y presencia de dióxido de azufre en la Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda

Estudiante: LUIS DANIEL HERNÁNDEZ BALBUENA

COMITÉ

Dr. Iván Fuentesilla Carcamo
Presidente

Dr. Wuiyebaldo Fermín Guerrero
Sánchez
Secretario

Dr. Jenaro Reyes Matamoros
Vocal

Dr. Carlos Ignacio Robledo Sánchez
Suplente

Dr. Marco Antonio Mora Ramírez
Asesor

M. en C. Luis Alberto Rendón Delgado
Coasesor

Agradecimientos

A mi madre

Por no cansarse de demostrarme su amor y todos los días esforzarse para que mi hermano y yo nos superemos.

A mi padre

Por apoyarme durante toda mi etapa escolar y mantenernos como prioridad.

A mi hermano y abuelos

Por estar para mí desde que tengo memoria, cuidarme y consentirme.

A mis tíos, Luis, Alberto, Alfredo y Maribel

Por todas las veces que me han apoyado de corazón y brindado enseñanzas que me han llevado a ser la persona que soy hoy.

A mis asesores

Al Dr. Marco Mora por apoyarme a continuar y abrir nuevas puertas en el mundo de la investigación, al Mtro. Luis Rendón por su gran apoyo en este capítulo final de mi licenciatura.

A todos mis amigos y seres queridos

Por ser parte de mi vida y poner su granito de arena en mantenerme siempre feliz y positivo.

Al jurado

Por su tiempo invertido durante mi proceso de titulación.

Índice general

Resumen	1
1. Introducción	3
1.1. Presentación	3
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Motivación	4
1.4. Objetivo general	4
1.5. Objetivos particulares	4
2. Marco teórico	7
2.1. Biodiversidad y clima en la Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda	7
2.2. Evapotranspiración	7
2.2.1. Estimación de la ET mediante percepción remota	9
2.3. Efectos negativos en ecosistemas por presencia de SO ₂	9
2.4. Enfoque analítico	11
2.4.1. Anomalías climáticas	11
2.4.2. Retro trayectorias con HYSPLIT	12
2.4.3. Coeficiente de correlación	12
2.4.4. Estimador Theil-Sen	13
3. Metodología	15
3.1. Dominio espacial y temporal	15
3.2. Variables ambientales	15
3.3. Análisis de retro trayectorias	17
3.4. Análisis de datos por percepción remota	17
3.4.1. Correlación de Pearson	17
3.4.2. Anomalía Relativa (RA)	18
3.4.3. Estimador Theil-Sen	19
4. Resultados	21
4.1. Frecuencia de trayectorias en épocas secas-calientes y secas-frías	21
4.2. Patrones mensuales	21
4.3. Series de tiempo y correlaciones	24
4.4. Anomalías relativas y tendencias	29
5. Discusión de resultados	37
6. Conclusiones	39
A. Pruebas de significancia	41
B. Coeficientes de correlación de Spearman	45

C. Coeficientes de correlación de Kendall	47
D. Índices de estacionalidad	49
E. Nomenclatura	51
Bibliografía	53

Índice de figuras

2.1. Representación de la influencia de la ET en el ciclo hidrológico	8
2.2. Actividades petroleras en la zona del Golfo de México	11
2.3. Representación de diferentes índices de correlación	13
3.1. Ubicación de la Zona de Estudio (línea roja) y los puntos representativos de las regiones: semiurbana (R_1), semiárida (R_2) y bosque de montaña (R_3)	16
3.2. Representación de extracción de datos para las tres regiones en simultáneo	17
4.1. Frecuencia de trayectorias hacia la RBSG durante la época secas-calientes (MAM) durante el periodo 2000 - 2024	22
4.2. Frecuencia de trayectorias hacia la RBSG durante la época de secas-frías (DEF) durante el periodo 2000 - 2024	22
4.3. Promedios mensuales en el periodo 2000 – 2024 en la región R_1	23
4.4. Promedios mensuales en el periodo 2000 – 2024 en la región R_2	23
4.5. Promedios mensuales en el periodo 2000 – 2024 en la región R_3	24
4.6. Variación temporal de T, RH y PBLH en la región R_1	24
4.7. Variación temporal de EVI, Pp, ET y SO_2 en la región R_1	25
4.8. Mapa de correlación de Pearson en la región R_1	25
4.9. Variación temporal de T, RH y PBLH en la región R_2	26
4.10. Variación temporal de EVI, Pp, ET y SO_2 en la región R_2	26
4.11. Mapa de correlación de Pearson en la región R_2	27
4.12. Variación temporal de T, RH y PBLH en la región R_3	27

4.13. Variación temporal de EVI, Pp, ET y SO ₂ en la región R ₃	28
4.14. Mapa de correlación de Pearson en la región R ₃	28
4.15. Distribución de la anomalía relativa de Evapotranspiración Total durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R ₁ , R ₂ y R ₃	29
4.16. Distribución de la anomalía relativa de Dióxido de Azufre durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R ₁ , R ₂ y R ₃	30
4.17. Tendencias de Evapotranspiración Total vs Dióxido de Azufre para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R ₁ , R ₂ , y R ₃	30
4.18. Distribución de la anomalía relativa de Precipitación durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R ₁ , R ₂ y R ₃	31
4.19. Tendencias de Evapotranspiración Total vs Precipitación para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R ₁ , R ₂ , y R ₃	31
4.20. Distribución de la anomalía relativa de Índice de Vegetación Mejorado durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R ₁ , R ₂ y R ₃	32
4.21. Tendencias de Evapotranspiración Total vs Índice de Vegetación Mejorado para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R ₁ , R ₂ , y R ₃	32
4.22. Distribución de la anomalía relativa de Temperatura durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R ₁ , R ₂ y R ₃	33
4.23. Tendencias de Evapotranspiración Total vs Temperatura para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R ₁ , R ₂ , y R ₃	33
4.24. Distribución de la anomalía relativa de la Altura de la Capa Límite Planetaria durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R ₁ , R ₂ y R ₃	34
4.25. Tendencias de Evapotranspiración Total vs Altura de la Capa Límite Planetaria para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R ₁ , R ₂ , y R ₃	35
4.26. Distribución de la anomalía relativa de Humedad Relativa durante el periodo 2000 – 2024, en las regiones R ₁ , R ₂ y R ₃	35
4.27. Tendencias de Evapotranspiración Total vs Humedad Relativa para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R ₁ , R ₂ , y R ₃	36
B.1. Coeficientes de correlación en la región R ₁	45

<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	XI
B.2. Coeficientes de correlación en la región R_2	46
B.3. Coeficientes de correlación en la región R_3	46
C.1. Coeficientes de correlación en la región R_1	47
C.2. Coeficientes de correlación en la región R_2	48
C.3. Coeficientes de correlación en la región R_3	48

Índice de tablas

3.1. Resumen de variables y fuentes de datos utilizadas.	16
A.1. Valores críticos de t para la prueba de dos colas	41
A.2. Niveles de confianza evaluados para los coeficientes de correlación en R_1	42
A.3. Niveles de confianza evaluados para los coeficientes de correlación en R_2	43
A.4. Niveles de confianza evaluados para los coeficientes de correlación en R_3	44
D.1. Índices de estacionalidad en la región R_1	49
D.2. Índices de estacionalidad en la región R_2	50
D.3. Índices de estacionalidad en la región R_3	50

Resumen

La Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda (RBSG) es una región ubicada en el centro-norte de México; es una zona de alta biodiversidad y de gran importancia para el ciclo hidrológico. Este estudio integra dos enfoques complementarios para evaluar las presiones ambientales que afectan esta área protegida: la presencia de dióxido de azufre (SO_2) de origen antropogénico y los patrones climáticos de evapotranspiración total (ET) durante el periodo 2000-2024, empleando una combinación de datos satelitales, modelos de reanálisis y modelos de trayectoria para analizar la presencia de concentraciones de SO_2 sobre la RBSG (R_3), su origen y su relación con la ET, contrastando los resultados con dos regiones adicionales, una semiurbana (R_1) y otra semidesértica (R_2). Los resultados indican que las emisiones de SO_2 derivadas de actividades petroleras en el Golfo de México influyen significativamente en las concentraciones de SO_2 observadas sobre la RBSG (R_3), mostrando una mayor concentración que en las regiones R_1 y R_2 . Además, se observó una posible correlación entre las concentraciones de SO_2 y la ET, lo que sugiere un efecto fisiológico en la vegetación, aunque se requieren estudios in situ para confirmar este vínculo. Por otro lado, el análisis de los patrones climáticos reveló anomalías significativas en la RBSG (R_3), incluyendo un aumento de la temperatura (especialmente en las épocas secas-calientes y lluviosas) y una reducción de la precipitación en los últimos 25 años, tendencia que se observa con menor magnitud en R_1 y R_2 . Asimismo, la vegetación en R_3 mostró anomalías positivas en épocas secas, a diferencia de las demás regiones, lo que podría estar relacionado con su resiliencia o con alteraciones en los ciclos hídricos. La ET presentó valores negativos en épocas secas-calientes, asociado al incremento térmico y la reducción de humedad relativa.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Presentación

Las áreas naturales protegidas (ANP) se establecen dada la importancia que se le da a la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas, así como el interés por regular los procesos ambientales que garanticen su equilibrio, particularmente para asegurar el balance hídrico del planeta [61]. Las ANP son de interés para la investigación, debido a la compleja interacción que puede existir entre su vegetación, el clima y la presión constante de actividades antropogénicas e industriales [24]. En el centro-norte de México se encuentra la Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda (RBSG), una zona con una amplia biodiversidad que contribuye al equilibrio del ciclo hidrológico. La RBSG es una zona bien conservada; sin embargo, las actividades antropogénicas entran en la discusión, ya que, si bien la RBSG no se encuentra aparentemente expuesta a ellas, las emisiones de contaminantes como el dióxido de azufre (SO_2), generadas por la quema de combustibles fósiles, pueden ser transportadas por largas distancias desde su fuente y capturadas por el ecosistema. La evapotranspiración total (ET)[38] es una variable crucial en el ciclo hidrológico, y permite evaluar el retorno de agua a la atmósfera a través de la evaporación de agua del suelo (cuerpos de agua y superficies) y la transpiración de la vegetación a través de los estomas.

En este contexto, y hasta donde sabemos, no existen estudios en la RBSG sobre los patrones de ET, uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico, ni estudios sobre el impacto que puede tener el depósito seco de SO_2 en la región o sobre otros factores ambientales. Por ello, resulta importante analizar el comportamiento de los patrones de ET en la RBSG durante los últimos veinticinco años y la posible influencia de variables ambientales y del depósito de SO_2 .

1.2. Planteamiento del problema

Además de la precipitación y las escorrentías, la ET regula la temperatura superficial, la disponibilidad y distribución del agua en la superficie de la Tierra [38]. En una relación cíclica la ET depende de la vegetación. Las plantas liberan vapor de agua a través de los poros en sus hojas (estomas), provocando pérdida de energía, y promoviendo un enfriamiento por transpiración, lo que puede reducir la temperatura local de las hojas y del aire varios grados [13]. La ET también genera un efecto "succión" que atrae agua y minerales desde las raíces hasta el dosel [71]. En este sentido si las tasas de ET son bajas, las plantas no pueden obtener los nutrientes que necesitan para crecer y esto suele asociarse con estrés por sequía o degradación del suelo. Por otra parte y en general, si la ET tiene valores elevados, suele indicar que un ecosistema es exuberante y saludable. Ahora bien, además de depender de la vegetación, la ET depende de la contaminación del aire [67]. El SO_2 es un contaminante atmosférico, subproducto de la quema de combustibles fósiles, que puede alterar los procesos biológicos de las plantas. El SO_2 ambiental entra en la planta

principalmente a través de los estomas, los mismos poros que se utilizan para la transpiración. En bajas concentraciones, el SO_2 puede provocar que los estomas permanezcan abiertos más tiempo del debido, lo que provoca un aumento de la ET y una pérdida excesiva de agua. Sin embargo, en altas concentraciones, la planta sufre lesiones inducidas por el SO_2 generando un cierre estomático, lo que reduce drásticamente la tasa de ET [42]. Por lo tanto, la relación entre la ET y el SO_2 es un ejemplo clásico de cómo los contaminantes atmosféricos pueden alterar los procesos biológicos de las plantas y en este sentido es importante investigar la relación de la ET con la contaminación del aire (SO_2) para gestionar la salud de los ecosistemas, y con ello el clima del planeta y la salud pública.

La RBSG con su gran biodiversidad es un área que se encuentra a centenas de kilómetros de zonas costeras de en el Golfo de México donde se realizan diversas actividades petroleras (plataformas, refinerías) y que generan emisiones significativas de SO_2 , estimando un aproximado de 185,907 toneladas por año, lo que posiciona a México provisionalmente como el cuarto país en el mundo con mayor generación de concentraciones de SO_2 , solo por debajo de India, China y Rusia [53, 59]. De acuerdo con la literatura, el SO_2 puede ser transportado centenas de kilómetros [55], antes de depositarse en el suelo, por efectos mecánicos del viento (depósito seco), lo que posibilita que pueda depositarse sobre la vegetación de la RBSG. A pesar de este riesgo potencial, y hasta donde sabemos, no se han realizado estudios. De lo anterior se desprenden varias preguntas. Durante los últimos veinticinco años ¿cuáles son los patrones mensuales y anuales de la ET?, ¿se presentan anomalías en algunas variables ambientales y la ET?, ¿existen fuentes de SO_2 cuyas emisiones sean depositadas sobre la RBSG?, ¿hay una relación significativa entre la ET y la presencia de SO_2 en la RBSG?

1.3. Motivación

Dado el territorio inexplorado que representa la RBSG en términos de las variables meteorológicas, de los cambios en la vegetación a nivel regional y variables ambientales a largo plazo, es indispensable realizar una caracterización espacio-temporal de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y precipitación), abundancia de la vegetación, tasa de ET y concentraciones de SO_2 . Esto permitirá evaluar por primera vez para la RBSG la interacción entre la ET y SO_2 , dado que las evaluaciones ambientales actuales suelen basarse en datos locales generalizados que no captan la dinámica micro climática y de la vegetación en la región a lo largo del tiempo. Además, si bien se sospecha la presencia de SO_2 debido a su relativa cercanía con una refinería (Francisco y Madero) y otras fuentes más alejadas como las plataformas de PEMEX en la zona de Tabasco, se carecen de datos (espaciales y temporales) de las concentraciones de SO_2 y las fuentes primarias que las originan. Este trabajo, contribuye a (i) mejorar la comprensión de la relación de los patrones espacio-temporales de la ET y su respuesta frente a variaciones en variables ambientales (temperatura, humedad y vegetación), (ii) estimar las concentraciones de SO_2 en la RBSG, (iii) determinar en todo caso el origen del SO_2 que se observado en la RBSG y (iv) diagnosticar el impacto que generan las concentraciones de SO_2 en la ET dentro de la RBSG.

1.4. Objetivo general

Caracterizar e investigar las relaciones entre las variables ET, SO_2 , T, Pp, RH, EVI y PBLH en el periodo 2000-2024 en la RBSG.

1.5. Objetivos particulares

- Delimitar la zona de estudio, que incluya la RBSG y al menos dos sitios más con vegetación contrastante entre sí y para cada sitio realizar lo siguiente:

- Obtener los promedios mensuales de los últimos 25 años (2000 – 2024) de la ET, SO_2 , índice de vegetación mejorado (EVI), temperatura (T), precipitación (Pp), humedad relativa (RH) y altura de la capa límite planetaria (PBLH).
- Investigar la correlación entre las variables y contrastar entre los tres sitios.
- Calcular la anomalía climática de las variables, de cada año respecto al periodo de los últimos veinticinco años.
- Determinar el origen del SO_2 que se deposita sobre la RBSG y su impacto en la ET.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Biodiversidad y clima en la Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda

La Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda es parte del Programa Hombre y Biosfera de la UNESCO, y comprende un área aproximada de 383,567 hectáreas en un rango de elevación entre 200 y 3160 m.s.n.m., ocupando el 32 % del estado de Querétaro [5]. Es conocida por contar con una gran biodiversidad, albergando alrededor de 132 especies entre anfibios y reptiles [20], 342 especies de aves, 27 especies de peces, 127 especies de hongos, 800 especies de mariposas que representan cerca del 30 % del total que hay en México, también hay 110 especies de mamíferos [5], que corresponden aproximadamente al 74 % de los mamíferos en el noreste de México [43]. Es una de las regiones boscosas mejor conservadas del país, con alrededor de 1,724 especies de flora [3]. Sin embargo, esta biodiversidad enfrenta amenazas significativas. Entre ellas, especies invasoras, incluyendo peces depredadores y moluscos potencialmente transmisores de patógenos, que han sido introducidas en la región sin autorización, poniendo en peligro a los ecosistemas acuáticos y especies nativas [49]. Así mismo, el deterioro forestal es una preocupación en esta zona; la RBSG se encuentra dentro de la Sierra Gorda, esta última pertenece al Estado de San Luis Potosí al norte, y al sur parte del estado de Guanajuato. En el caso de la Sierra Gorda de Guanajuato, aproximadamente el 45 % de la cubierta vegetal presenta algún nivel de degradación [65]. A pesar de que la región cuenta con su estatus de protección, la biodiversidad de la reserva permanece poco estudiada, particularmente en los ecosistemas acuáticos [49]. La región también cuenta con 36 especies de herpetofauna, de las cuales el 80 % se encuentra en alguna categoría de riesgo [39].

Por otra parte, la RBSG no solo es un punto crítico de biodiversidad, sino también un ejemplo de turismo sostenible, que ofrece actividades eco-turísticas que benefician a las comunidades locales y promueven la conservación [32].

A pesar de su importancia ecológica, no hemos encontrado estudios sobre la ET, es decir, la evaporación de agua del suelo y de las plantas, que, como veremos en la siguiente sección, es clave para el ciclo hidrológico del agua que a su vez es determinante para conservar la biodiversidad.

2.2. Evapotranspiración

La Figura 2.1 muestra un esquema del ciclo hidrológico, donde la ET desempeña un papel crucial, regresando a la atmósfera cerca del 60 % de la precipitación total [41], además influye en la humedad del suelo, la humedad atmosférica, la disponibilidad de agua y, sobre todo, actúa como un regulador natural de la temperatura superficial debido a que la ET consume aproximadamente

más del 50 % de la radiación solar sobre la superficie y el flujo de calor latente [62, 51]. Así mismo, la ET es una componente clave en el monitoreo ambiental y los estudios de balance hídrico [36]. En los climas áridos la combinación de bajas precipitaciones con una alta tasa de ET tienden a ser característicos, debido a que en dichos ecosistemas la ET puede ser responsable hasta del 90 % de la pérdida de precipitación anual [70, 33]. La transpiración es el principal contribuyente a las interacciones suelo-atmósfera, particularmente en regiones de transición entre climas secos y húmedos [51].

La ET es una variable de interés en estudios climatológicos, hidrológicos, agrícolas y forestales. Sin embargo, aún es difícil de cuantificar experimentalmente sin requerir de costosos equipos disponibles en terreno [52]. Los estudios de campo dedicados a la medición de la ET suelen enfrentar numerosos desafíos operativos y económicos, lo que limita su implementación, especialmente en ecosistemas áridos y semiáridos [9, 72]. Por ejemplo, en un ecosistema de matorral semiárido se demostró que los cambios en el uso del suelo modifican significativamente los flujos de ET, lo que evidencia la sensibilidad eco-hidrológica de estos ambientes [27]. Pese a su alta precisión, métodos de medición in situ para la ET siguen siendo geográficamente limitados debido a los elevados costos de instalación (10,000 - 30,000 USD), la necesidad de mantenimiento especializado y las dificultades logísticas en zonas remotas [26].

Alternativamente, la ET puede estimarse de forma indirecta mediante lisímetros, que consisten en tanques cilíndricos enterrados en el suelo, con agua y vegetación, diseñados para registrar las fluctuaciones diarias del nivel freático, la temperatura superficial y otras variables meteorológicas, obtenidas mediante estaciones automáticas. Aunque estos sistemas permiten realizar experimentos controlados y series temporales de alta resolución, su aplicación requiere infraestructura costosa y su estimación demanda cálculos complejos, dado el número de factores meteorológicos, edáficos y biológicos que intervienen en el proceso de ET [56]. Finalmente, este tipo de estudios resultan imprácticos para dar un seguimiento de largo plazo de la ET.



Figura 2.1: Representación de la influencia de la ET en el ciclo hidrológico

La importancia de la ET le otorga mayor peso a su correcta estimación. Existen diversos métodos directos e indirectos para estimarla, incluyendo datos satelitales, balance hídrico, balance energético, modelos dinámicos de vegetación, temperatura, radiación, combinados y enfoques de inteligencia artificial [36, 64]. También se han manejado modelos matemáticos como Blaney-Criddle, Penman-FAO, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor y Penman-Monteith, [19]. Debido a que las mediciones directas de la evapotranspiración a niveles regionales podrían llegar a ser muy costosas, estos distintos métodos han demostrado estimar de manera aceptable la ET; sin embargo, estas ecuaciones dependen de un número de parámetros no siempre fáciles de obtener [47]. El modelo

Penman-Monteith, que incorpora variables ambientales y fisiológicas, se ha utilizado para estimar la ET en diferentes ecosistemas [11]. Los bosques en regiones montañosas pueden proporcionar servicios ecosistémicos que favorecen la ET y regulan el balance hídrico [11]. Comprender la ET es esencial para identificar eventos extremos como inundaciones, sequías y olas de calor, así como para gestionar los recursos hídricos para el crecimiento de la población [51, 64].

2.2.1. Estimación de la ET mediante percepción remota

Como alternativa a los métodos expuestos en la sección anterior, se encuentran las mediciones de percepción remota basadas en datos satelitales, que tienen la ventaja de ser disponibles en extensiones de terreno y escalas temporales amplias. Existen ejemplos en los que se han estimado los valores de la ET mediante modelos alimentados con datos satelitales. El modelo Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration (METRIC) puede calcular la ET a partir de imágenes satelitales obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Su funcionamiento y eficiencia para calcular la ET fueron validados mediante mediciones de flujos turbulentos con torres de Eddy Covariance, [16]. Además, esta misma metodología fue validada mediante el mismo proceso en la región de las costas de Sonora, lo que concluyó que el uso de datos satelitales para estimar la ET es confiable. Sin embargo, debe seguirse evaluando su precisión [52].

Por otra parte, en la región pampeana argentina (RPA) se estimó la ET mediante datos satelitales y reanálisis empleando herramientas de Google Earth Engine, así como la ecuación de Priestley-Taylor (PT) combinada con información de humedad del suelo. Estos productos fueron valorados en siete estaciones de la RPA, cuyos resultados validaron el uso de esta metodología como herramienta para el cálculo de la ET [21].

Así mismo, en la Provincia de Buenos Aires, se buscó determinar la ET utilizando imágenes satelitales de MODIS, para así prescindir de las mediciones *in situ*, comparando los datos con la ET obtenida por medio del Balance Hidrológico de Thornthwaite-Mather se mostró finalmente una buena correspondencia entre ambos [14]. Además, se han evaluado los diferentes productos de ET disponibles en modelos de reanálisis como MERRA-2, ERA 4, TerraClimate y MOD16A2, considerando los errores resultantes de la evaluación y observando en general un buen comportamiento del conjunto de los productos evaluados. Se puede concluir que el uso de estos modelos para determinar la ET es confiable y todos pueden ser utilizados para ello [21].

La precisión de los datos satelitales podría verse comprometida por las condiciones meteorológicas; por tal motivo, se evalúa su influencia en las estimaciones de ET. En 2020 se evaluó y comparó la precisión de la calibración automatizada del algoritmo SEBAL utilizando dos fuentes de datos meteorológicos de entrada diferentes, entre ellas mediciones terrestres de una torre de flujo de covarianza de remolinos y datos de reanálisis (MERRA-2), para estimar la distribución de la energía superficial y los flujos de agua durante la estación seca en una zona de transición entre la selva tropical y la sabana. Los resultados indicaron una alta precisión para la ET diaria, utilizando tanto mediciones terrestres como reanálisis (MERRA-2), lo que sugiere una baja sensibilidad a las entradas meteorológicas [34].

2.3. Efectos negativos en ecosistemas por presencia de SO_2

Las investigaciones sobre el SO_2 y la ET revelan interacciones complejas. La exposición breve al SO_2 puede aumentar las tasas de transpiración en las plantas [8]. Se ha explorado la relación entre la ET y los compuestos atmosféricos, incluido el SO_2 . En la Amazonía, la carga de aerosoles proveniente de la quema de biomasa afecta las tasas de ET, y los eventos de “El Niño” influyen en esta interacción [44]. La temperatura se correlaciona fuertemente con la ET en la zona del lago Titicaca, mientras que la humedad muestra una influencia mínima [48]. En México, las concentraciones de SO_2 a nivel superficial presentan efectos variables en el rendimiento de los cultivos:

los cultivos resistentes son aquellos que tienden a mostrar un mayor rendimiento bajo exposición a concentraciones de SO₂, mientras que los cultivos sensibles son aquellos que experimentan una notable disminución con respecto a los promedios de producción nacionales, lo que demuestra una influencia directa de las concentraciones de SO₂ [22]. Investigaciones anteriores encontraron que el contenido de SO₂ en la precipitación se relaciona estrechamente con las concentraciones en el aire superficial, contribuyendo hasta en un 13 % a la acidez libre total en la precipitación invernal [46]. Estos estudios resaltan las interacciones complejas entre el SO₂ atmosférico, la ET y los factores ambientales, y enfatizan la necesidad de investigaciones adicionales para comprender sus relaciones e impactos en los ecosistemas y la agricultura. Regularmente la vegetación de una región se ve relacionada con la precipitación en la misma; sin embargo, esta relación puede o no ser lineal, dependiendo de las variaciones de la región y más importante aún, de su tipo de vegetación. Por ejemplo, en zonas altas, generalmente la precipitación suele ser suficiente para satisfacer la demanda de ET, impidiendo que la vegetación se vea afectada por causa de estrés hídrico [17]. Sin embargo, la presencia de altas concentraciones de SO₂ representa una amenaza potencial para los ecosistemas. En las plantas se manifiestan diversos efectos negativos, como la reducción de la fotosíntesis, alteraciones en el metabolismo y la aparición de mutaciones. A mayor escala, estas alteraciones y mutaciones se observan como brotes de manchas lechosas en las hojas y un cambio de pigmentación a un tono rojizo cuando los síntomas se agudizan, mientras que, a largo plazo, las lesiones se manifiestan con la aparición de clorosis en las hojas [28]. Las actividades industriales y antropogénicas incrementan principalmente las emisiones de SO₂ el cual tiende a oxidarse comúnmente y a formar SO₃, el cual al entrar en contacto con el agua, forma ácido sulfúrico (H₂SO₄), uno de los principales componentes de la lluvia ácida, la cual es señalada como uno de los aspectos más graves de la contaminación a nivel global, ha registrado efectos nocivos en bosques y lagos en ciudades con alta actividad industrial, bajo estas circunstancias se registra pérdida de vegetación en los bosques por envenenamiento de la flora y baja de diversas especies que habitan cuerpos de agua expuestos [25, 28]. En el contexto de México, las zonas de exploración y producción petrolera en el Golfo de México conforman un conjunto de fuentes antropogénicas de mayor impacto debido a que la extracción de petróleo crudo y sus procesos se producen grandes volúmenes de azufre hacia la atmósfera, lo que termina siendo emisiones de SO₂ propagadas hacia lugares cercanos, contaminando sus ecosistemas, en la Figura 2.2 se observa la ubicación donde se llevan a cabo actividades petroleras en la zona del Golfo de México[58].



Figura 2.2: Actividades petroleras en la zona del Golfo de México

En la Amazonia, los aerosoles, que pueden incluir SO_2 , tienen una relación compleja con la evapotranspiración. Esta relación se ve influenciada además por los eventos ENSO, donde los aerosoles muestran una correlación positiva con la ET hasta cierto umbral de concentración [44]. Se considera una carga crítica de S (azufre) aquella que sobrepasa el umbral de $2.7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo que es equivalente a una concentración superficial de $5.4 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ de SO_2 , para ser considerada como un precursor a efectos ambientales negativos [23]. Estos hallazgos subrayan la naturaleza multifacética del impacto del SO_2 sobre la evapotranspiración, influenciada por diversos factores ambientales y condiciones atmosféricas.

2.4. Enfoque analítico

2.4.1. Anomalías climáticas

Cuando se habla de anomalías climáticas, se hace referencia al cambio o la variación del clima con posibles impactos ambientales; dicha variación es estadísticamente significativa a largo plazo con respecto a los promedios históricos a escala global o regional dentro de los parámetros de temperatura, precipitación, viento, humedad, vegetación, etc. [12]. Estas anomalías pueden ser positivas o negativas dependiendo del contexto de la variable, por ejemplo, en el caso de la precipitación, se hablaría de una anomalía positiva en presencia de abundantes lluvias y en el caso de una escasez de lluvias se trataría de una anomalía negativa [7].

Dichas anomalías pueden traer consigo consecuencias directas a su entorno, como lo pueden ser la presencia de sequías, aumento de incendios forestales, fuertes precipitaciones e incluso disminución del potencial de producción hidroeléctrica [50]. Las anomalías climáticas pueden ser identificadas mediante métodos de geoprocusamiento, el análisis de tendencias en series de tiempo, promedios móviles e índices como el de precipitación estandarizada [7, 37].

2.4.2. Retro trayectorias con HYSPLIT

HYSPLIT es un modelo para simular la dispersión y precipitación de partículas, así como también brinda la función de estimar las trayectorias hacia atrás (retro trayectorias), lo que le permite a los investigadores determinar variables como el tiempo que permanecen los contaminantes en la atmósfera y la dispersión de estos mismos, partículas, restos de ceniza, entre otros contaminantes atmosféricos. Cuenta con la capacidad de trabajar con datos meteorológicos de modelos como el WRF (Weather Research and Forecasting) para predecir concentraciones de contaminantes e identificar sus fuentes de origen [30, 69]. Además es un modelo de gran utilidad que no solo permite determinar las fuentes de origen sino también el momento determinado de su asentamiento y la altura de los contaminantes, lo cual trabajando en conjunto con datos *in situ* y observacionales, es posible evaluar las contribuciones de las fuentes de origen en la calidad del aire [31, 69], el modelo HYSPLIT ha sido aplicado en diferentes contextos como erupciones volcánicas, accidentes industriales y emisiones rutinarias de centrales eléctricas [69], en Cataluña, España se ha utilizado con éxito para estimar las trayectorias de las partículas de los penachos de humo que han surgido de los mayores incendios que han presentado [10]; en Colombia rastreo con éxito el origen de masas de aire que presentan características con el potencial de afectar la calidad del aire [31].

Para calcular la trayectoria de una partícula, el modelo HYSPLIT parte de una posición inicial $P(t)$ y utiliza la suma de los vectores de velocidad para predecir la siguiente posición, es decir:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t$$

Mientras que la posición final se calcula a partir de la velocidad promedio entre la posición inicial y la primera posición aproximada, dada como:

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0,5[V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]\Delta t$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0,5[V(P, t) + V(\{P(t) + [V(P, t)\Delta t]\}, t + \Delta t)]\Delta t$$

Además, es posible hacer el análisis de trayectorias desde distintas configuraciones de simulación como matriz, ensamble y frecuencia, dependiendo de las necesidades del usuario, una simulación de matriz de trayectorias permite analizar un área de origen amplia a diferencia de un solo punto, un ensamble permite analizar diferentes trayectorias desde un mismo punto de partida generando ligeras variaciones en los parámetros meteorológicos, mientras que la opción de frecuencia brinda una constante simulación de trayectorias durante intervalos de tiempo para calcular la recurrencia de las trayectorias.

2.4.3. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación de Spearman no mide la relación lineal entre dos variables, como se suele afirmar; de hecho, mide la precisión con la que una función monótona arbitraria puede describir una relación entre dos variables, sin realizar suposiciones sobre la distribución de frecuencias de las variables [29]. Por otro lado, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida estadística que cuantifica la fuerza y la dirección de las relaciones lineales entre dos variables cuantitativas [40]. Se dice que dos variables están correlacionadas si el cambio en una variable va acompañado de un cambio en la otra, ya sea en la misma dirección o en la opuesta [68]. El coeficiente, típicamente denotado por la letra griega ρ (rho), varía de -1,0 a +1,0, donde los valores más cercanos a estos extremos indican relaciones lineales más fuertes. Sin embargo, se deben manejar con cautela las limitaciones analíticas, incluida la presencia de valores atípicos que pueden enmascarar correlaciones reales o crear asociaciones espurias [45]. El coeficiente se calcula como la relación entre la covarianza entre variables y el producto de sus desviaciones estándar. En la Figura 2.3 se representa gráficamente el comportamiento de los datos respecto al índice

de correlación obtenido. Sin embargo, el coeficiente de correlación de Pearson por si solo puede considerarse poco fiable sin una prueba de significancia que proporcione un intervalo de confianza suficiente para garantizar la validez de la interpretación de los resultados, en estos casos se hace uso del t-value para calcular los niveles de confianza [60].

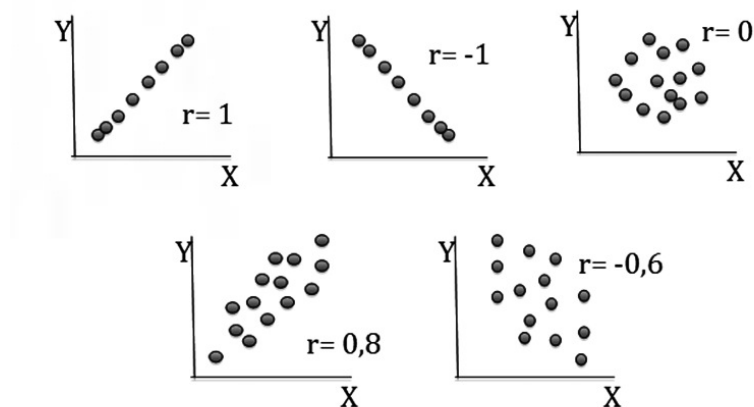


Figura 2.3: Representación de diferentes índices de correlación

2.4.4. Estimador Theil-Sen

En el análisis estadístico, la estimación de tendencias es una de las técnicas más utilizadas y, comúnmente, cuando se requieren estos análisis, la mayoría recurre al método de mínimos cuadrados. Sin embargo, este método suele presentar problemas en su estimación cuando el conjunto de datos presenta valores atípicos. [6]. En contraste, el estimador Theil-Sen resulta consistente y robusto por su resistencia a los valores atípicos [66, 57].

Se ha investigado intencionalmente qué pasaría si las condiciones provocaran un bajo rendimiento del método de mínimos cuadrados, y se ha observado que en estas circunstancias la regresión de Theil-Sen tiende a tener un buen rendimiento [6]. Se realizó un estudio para demostrar la importancia de la elección del método para estimar tendencias, utilizando series de 67 años de índices climáticos ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices). El estudio demostró que, incluso con una ligera presencia de valores atípicos, los resultados son significativamente diferentes, enfatizando las ventajas del estimador Theil – Sen sobre el método de mínimos cuadrados, [18].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Dominio espacial y temporal

El área de estudio seleccionada se muestra en la Figura 3.1, comprende una parte urbana ubicada al noreste de la ciudad de Querétaro que se extiende hasta el noroeste del estado de Querétaro, pasando por la Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda (RBSG). Dentro de esta zona se ubican tres regiones con características bien definidas y contrastantes entre ellas (semiurbano, semiárida y forestal), que permiten hacer una comparación y ayudar a determinar los factores que influyen en el comportamiento de las variables de estudio. Las regiones se centran en los sitios ubicados en: R_1 (-100.416 °W, 20.557 °N), R_2 (-99.782 °W, 21.140 °N) y R_3 (-99.217 °W, 21.467 °N). La región R_1 cuenta con características urbanas como, poca vegetación, asentamiento urbano. La región R_2 es semiárida, la vegetación dominante está constituida principalmente por matorral tropical y/o subtropical y una ligera presencia de suelo desnudo, y por otro lado tenemos una tercera región (R_3) donde predomina la vegetación de bosque templado y tropical, aunque también existe una ligera presencia de matorrales templados, pastizales tropicales y suelo agrícola. La diferencia en el tipo de vegetación y de suelo entre las tres regiones servirá para contrastar los patrones de ET e investigar cómo estos se correlacionan con otras variables ambientales.

Dentro de las zonas semiáridas la precipitación y la capacidad evaporativa planta-atmósfera son consideradas como las características climáticas más importantes [15], la vegetación correspondiente a este tipo de regiones suele a ser más sensible a la precipitación para su beneficio y se vuelve dependiente de ella, estudios han mostrado esta dependencia mediante datos satelitales que muestran un desfase temporal en los picos de las variables y mediante datos in situ que corresponden directamente y muestran claramente la relación precipitación-vegetación [54].

3.2. Variables ambientales

A partir de bases de datos satelitales y de modelos de reanálisis, se colectarán archivos ráster con los promedios mensuales de los últimos veinticinco años (2000-2024) de la precipitación (Pp), temperatura (T), humedad relativa (RH), evapotranspiración total (ET), capa límite planetaria (PBLH), índice de vegetación mejorado (EVI) y dióxido de azufre (SO_2). La Tabla 3.1 muestra un resumen de las características de las variables de estudio. Todas estas variables se obtienen a través de la aplicación web de la NASA [1], excepto en el caso del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) que se obtuvo a través de la plataforma de Google Earth Engine (MODIS) [2].

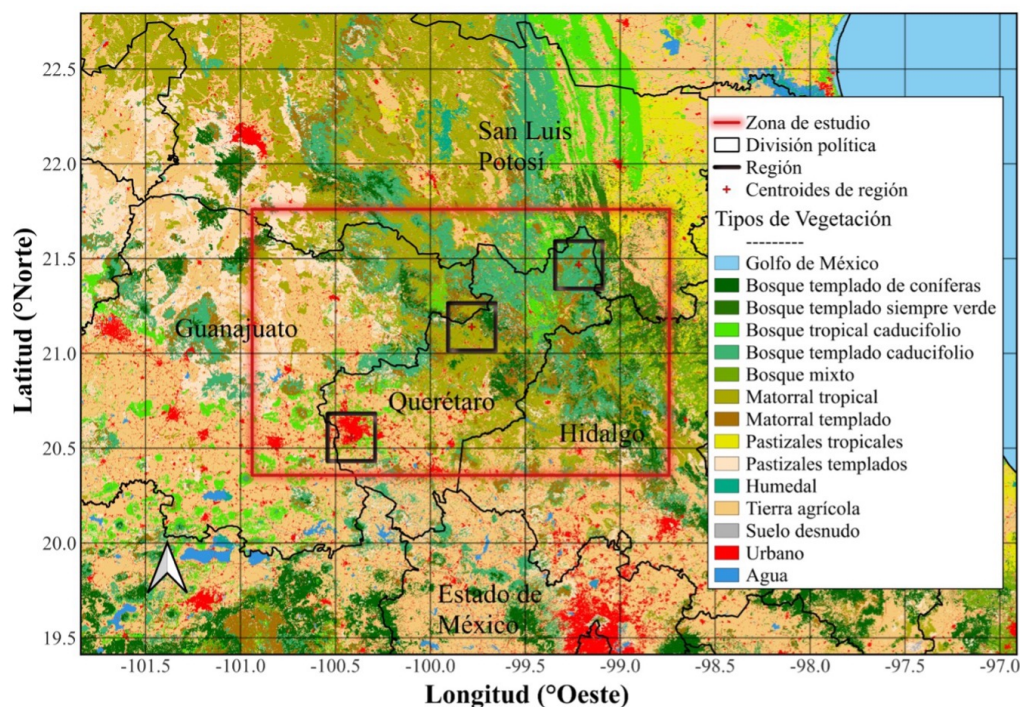


Figura 3.1: Ubicación de la Zona de Estudio (línea roja) y los puntos representativos de las regiones: semiurbana (R_1), semiárida (R_2) y bosque de montaña (R_3)

Variables	Unidades	Fuente	Res. Esp.	Res. Temp.
Evapotranspiración total (ET)	mm h^{-1}	MERRA-2	$0.5^\circ \times 0.625^\circ$	M
Dióxido de azufre (SO_2)	kg m^{-2}	MERRA-2	$0.5^\circ \times 0.625^\circ$	M
Precipitación (Pp)	mm h^{-1}	GLDAS	0.25°	M
Índice de vegetación mejorado (EVI)	-	MODIS	1 km	M
Temperatura (T)	$^\circ\text{C}$	FLDAS	0.1°	M
Humedad relativa (RH)	-	MERRA-2	$0.5^\circ \times 0.625^\circ$	M
Altura de la capa límite planetaria (PBLH)	m	MERRA-2	$0.5^\circ \times 0.625^\circ$	M

Tabla 3.1: Resumen de variables y fuentes de datos utilizadas.

Los rasters mensuales descargados tienen una extensión que abarca el área de estudio en su totalidad. Para cada variable, las capas ráster que corresponden a los meses desde 2000 hasta 2024 se apilan (300 capas), como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.2. Acto seguido, se utiliza la herramienta “Point sampling tool” en QGIS (v3.34) para extraer de una sola vez los datos mensuales de cada región.

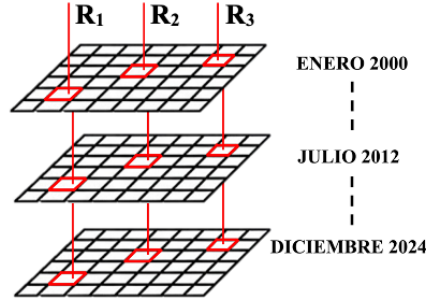


Figura 3.2: Representación de extracción de datos para las tres regiones en simultáneo

3.3. Análisis de retro trayectorias

El modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory - HYSPLIT)[4] se empleó para modelar el transporte de parcelas de aire y determinar el origen de las que llegan a la RBSG, representada por el sitio R3 (-99.217 °W, 21.467 °N), y, con ello, identificar posibles fuentes de emisión de SO₂ que impacten la RBSG.

El modelo se ejecuto y se alimentó de datos meteorológicos de NCEP/NCAR Global Reanalysis Data con una resolución espacial de 2.5° x 2.5° y una resolución temporal de 6 h. Se realizaron simulaciones de retro trayectorias con una duración total de 36 h, donde el modelo lanza una nueva trayectoria cada 6 h. La altura del punto inicial fue de 1,000 m por encima del nivel del suelo. Las simulaciones fueron generadas para todos los días del mes en cuestión. Se consideraron las temporadas de secas-calientes (marzo, abril y mayo -MAM) y la de secas frías (diciembre, enero y febrero - DEF).

Se empleó la herramienta de análisis de frecuencias de trayectorias para calcular dichas trayectorias. Esta herramienta cuenta el número de veces que una parcela de aire, en una trayectoria, atraviesa alguna de las celdas del dominio espacial. La frecuencia de trayectorias F para la celda (i, j) se calcula como:

$$F_{i,j} = 100 \times \frac{\sum P_{i,j}}{N} \quad (3.1)$$

Donde $P_{i,j}$ es la presencia de una trayectoria en la celda (i, j) , contada una vez por cada trayectoria y N corresponde al número total de trayectorias.

3.4. Análisis de datos por percepción remota

3.4.1. Correlación de Pearson

El coeficiente de Pearson se calcula como la relación entre la covarianza entre las variables y el producto de sus desviaciones estándar; se dice que dos variables están correlacionadas si el cambio en una variable va acompañado de un cambio en la otra, ya sea en la misma dirección o en la opuesta. En este trabajo se analizan varias variables en un mismo periodo en un mismo sitio y nos interesa saber cómo los patrones de estas se comportan y qué influyen en dichos patrones, para ello utilizamos el coeficiente de correlación de Pearson, para medir la intensidad con la que dichas variables se vinculan entre sí y su dirección. Nos ayudará a determinar si los valores de una variable varían de manera consistente con respecto a los de otra, o si, en su lugar, estas no se asocian entre sí y sus patrones son independientes. Matemáticamente se ve de la siguiente manera:

$$r_s = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{[\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.2)$$

$$-1 \leq r_s \leq 1 \quad (3.3)$$

donde $\bar{X}$ y $\bar{Y}$ son las medias muestrales de X y Y , y r_s es el coeficiente de correlación de Pearson.

Además, se evaluán los índices de correlación bajo el método de Spearman y Kendall para obtener una comparación, sin embargo, para el análisis se considera solo el índice obtenido bajo el método de Pearson. Es importante mencionar que factores como el tamaño de las muestras, la variabilidad de los datos, los errores de medición y la presencia de datos atípicos pueden afectar la precisión de la correlación; por ello, se deben considerar estos factores para usar entradas con errores mínimos, lo que nos permitirá una interpretación de la covarianza más precisa y coherente [35]. Considerando esto, se utilizó el método de rango intercuartílico para detectar los valores atípicos y evitar un mal calculo en los índices de correlación. Además, se utilizó una prueba de significancia para evaluar la fiabilidad de la correlación, con base en los valores críticos de la distribución “t de Student” [60].

$$t = r_s \sqrt{\frac{n-2}{1-r_s^2}} \quad (3.4)$$

Donde:

- t es el t-value calculado
- r_s es el coeficiente de correlación de Pearson
- n es la muestra

Posteriormente se utiliza el siguiente criterio de decisión

$$|t| > t_{critico} \quad (3.5)$$

Donde:

- α es el nivel de significancia
- gl son los grados de libertad ($n-2$)
- $t_{critico}$ es el valor crítico de la distribución t de Student

3.4.2. Anomalía Relativa (RA)

Para determinar las anomalías climáticas en meses de 2024 respecto a todo el periodo (2000-2024) se empleó la definición:

$$RA = \frac{x_{mm} - x_{clim}}{x_{season}} \quad (3.6)$$

Donde x_{mm} representa el promedio mensual (2024), x_{clim} representa el promedio mensual acumulado (2000 - 2024) y x_{season} representa el promedio trimestral acumulado, relativo a x_{mm} (2000 - 2024). Si la RA es positiva, significa que para 2024 el valor está por encima del promedio; si es negativa, el valor habrá disminuido en ese año respecto al promedio de los últimos 20 años. La RA definida así considera la división del promedio trimestral, que es una variación de otros estudios donde se divide por la desviación estándar de los datos, ya que así la comparación resulta ser más sencilla [63]. Sin embargo, dado que para este caso se consideran los datos continuos del periodo 2000-2024 y las condiciones tienen influencia en el comportamiento de estas variables, se optó por cambiar la desviación estándar por x_{season} , para obtener una anomalía más precisa con respecto a cada año.

3.4.3. Estimador Theil-Sen

El estimador de Theil-Sen es un método para ajustar una línea a puntos de muestra en el plano (una forma de regresión lineal simple) eligiendo la mediana de las pendientes de todas las líneas a partir de pares de puntos. La pendiente se calcula como: $\frac{(y_j - y_i)}{(x_j - x_i)}$. Luego de ello, se deben calcular todas las intersecciones b_i resolviendo la ecuación de la recta para cada punto, y a partir de ello se toma igualmente la mediana de todo el conjunto de intersecciones para obtener la recta $y = mx + b$ estimada, recordando que la pendiente y la intersección son las medianas de sus respectivos conjuntos calculados [6]. Además se calculan los índices de estacionalidad y se hace una comparación con los promedios anuales de las anomalías calculadas y las tendencias, para determinar el impacto de las tendencias estimadas.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Frecuencia de trayectorias en épocas secas-calientes y secas-frías

La época de secas-calientes nos muestra que durante el periodo comprendido entre 2000-2024 las emisiones producidas por los complejos petroleros ubicados en la zona cercana al Golfo de México muestran una frecuencia en trayectorias de partículas que precipitan sobre la RBSG, durante los meses de marzo, abril y mayo (Figura 4.1), las fuentes de origen muestran una mayor distribución entre la zona del Golfo de México y el suroeste, y a su vez se presenta una frecuencia de trayectorias provenientes de las zonas petroleras.

Asimismo, en la época de secas-frías las corrientes de aire generan trayectorias que llevan a las emisiones producidas por las zonas petroleras a la RBSG, además se muestra una mayor cobertura de toda la zona costera con corrientes de aire desde Tabasco, Campeche y Yucatán (Figura 4.2) así como también se muestran trayectorias desde la zona del suroeste, es en esta época donde las trayectorias toman una mayor frecuencia originadas desde la zona del Golfo de México.

4.2. Patrones mensuales

Los patrones mensuales de ET y de variables hidroclimáticas exhiben respuestas heterogéneas entre las tres regiones, condicionadas por diferencias en la cobertura vegetal, la disponibilidad hídrica y el régimen atmosférico. Este análisis regional permite identificar los mecanismos de control que modulan la variabilidad de la ET en ambientes urbanos, semiáridos y forestales. La Figura 4.3 muestra los promedios mensuales de la ET, EVI, SO_2 , Pp, T, RH y la PBLH en el periodo 2000-2024 para la región R_1 . Se observa un incremento de la ET durante la temporada de lluvias, lo cual es coherente con la mayor disponibilidad hídrica en el sistema. Aunque la cobertura vegetal es relativamente baja en este periodo, la presencia continua de humedad superficial y atmosférica favorece el aumento de la ET, lo que evidencia la dependencia directa de la ET respecto de las precipitaciones. Es notorio que en temporada de lluvias el SO_2 muestra una disminución en sus concentraciones, por el contrario, la RH, la ET y el EVI, muestran un aumento en sus valores, para el caso de la T y la PBLH, pasa algo diferente a los demás casos, cuando se hace presente la temporada de lluvias sus valores comienzan a bajar, sin embargo, al terminar la temporada de lluvias los valores de T y PBLH continúan bajando, a diferencia de las concentraciones en ascenso de SO_2 al disminuir la temporada de lluvias.

Por el contrario, en R_2 , ver Figura 4.4, se observa una reducción notable de los valores de ET.

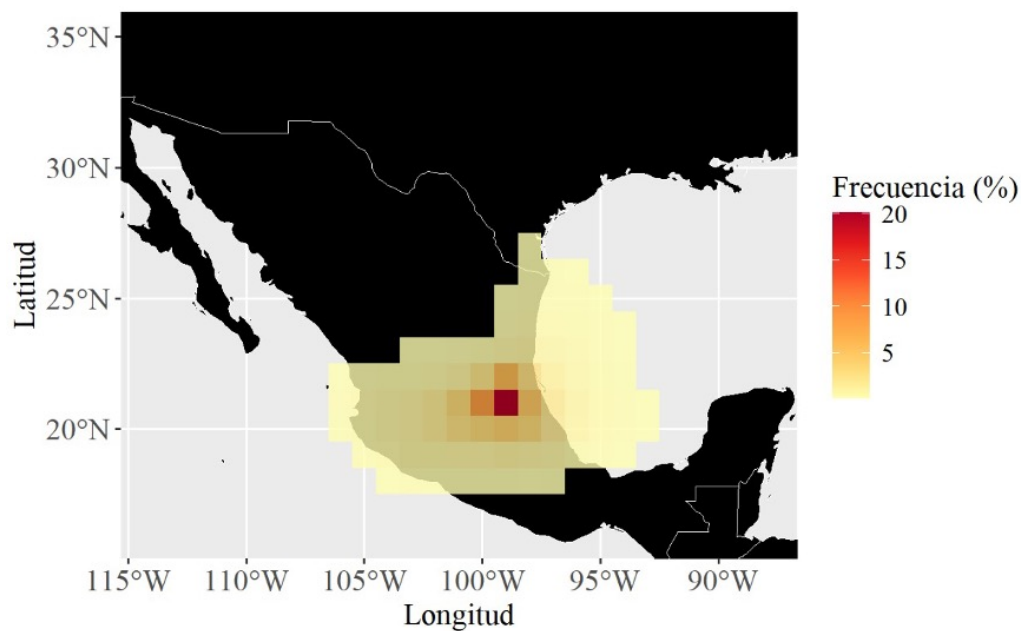


Figura 4.1: Frecuencia de trayectorias hacia la RBSG durante la época secas-calientes (MAM) durante el periodo 2000 - 2024

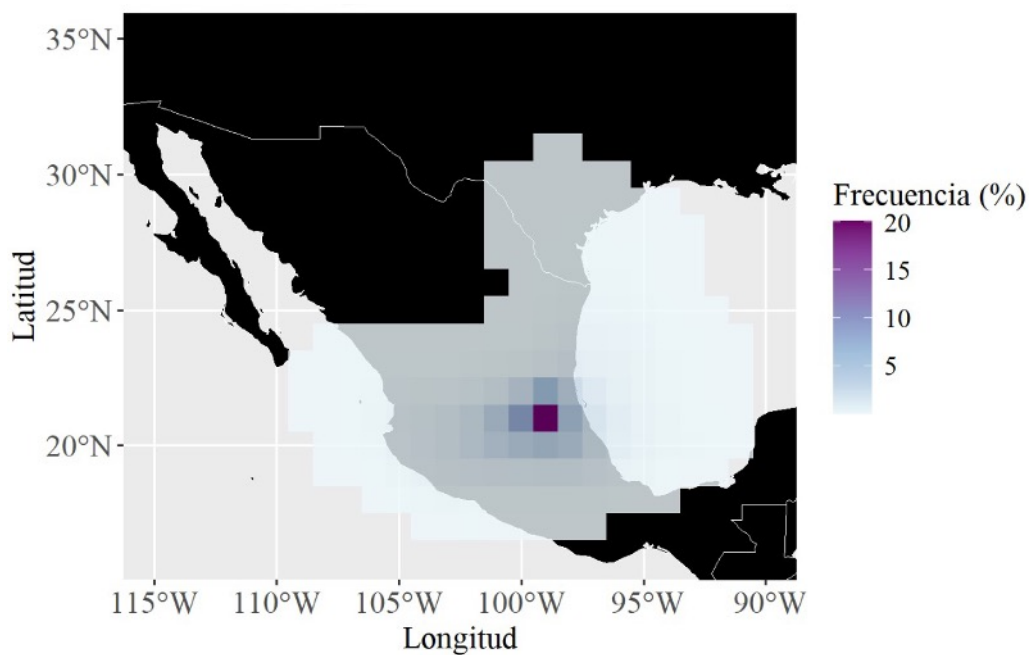


Figura 4.2: Frecuencia de trayectorias hacia la RBSG durante la época de secas-frías (DEF) durante el periodo 2000 - 2024

Esta disminución se relaciona principalmente con la menor cantidad de lluvia registrada en este periodo. A pesar de que la RH es elevada, su contribución al proceso de la ET es limitada, lo que

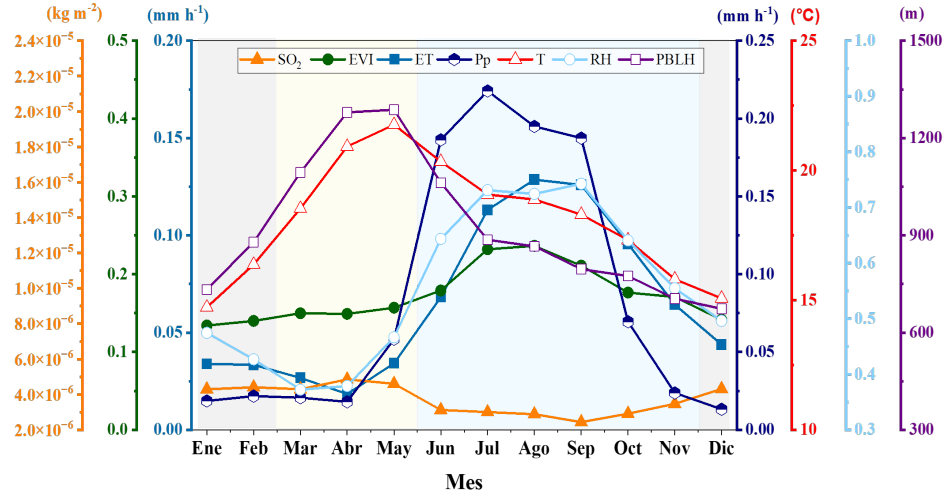


Figura 4.3: Promedios mensuales en el periodo 2000 – 2024 en la región R₁

confirma que la Pp constituye el componente determinante para sostener niveles más altos de ET. Además, se observa una relación más cercana con el EVI, lo que nos indica que, al ser una región semiárida, la ET se vuelve más dependiente de la vegetación disponible. Mientras que SO₂, T y PBLH responden de manera negativa a la Pp, con la T y PBLH presentando un descenso incluso terminando la temporada de lluvias, además de que la T reportada es más baja que en la región R₁.

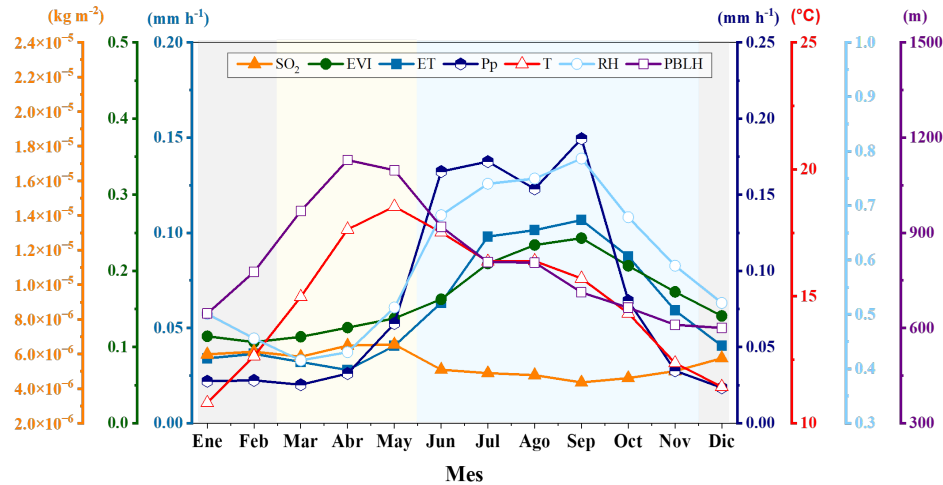


Figura 4.4: Promedios mensuales en el periodo 2000 – 2024 en la región R₂

Finalmente, en la R₃ (Figura 4.5) se aprecia un incremento en la ET aun cuando la Pp es ligeramente inferior a la de R₁. Este comportamiento se atribuye al tipo de cobertura vegetal y a la presencia de cuerpos de agua, los cuales actúan como fuentes adicionales de humedad, favoreciendo valores más elevados de ET. Se puede apreciar que el EVI tiene una mayor abundancia y, en temporada de lluvias, no hay un incremento significativo en la vegetación; incluso, manteniendo

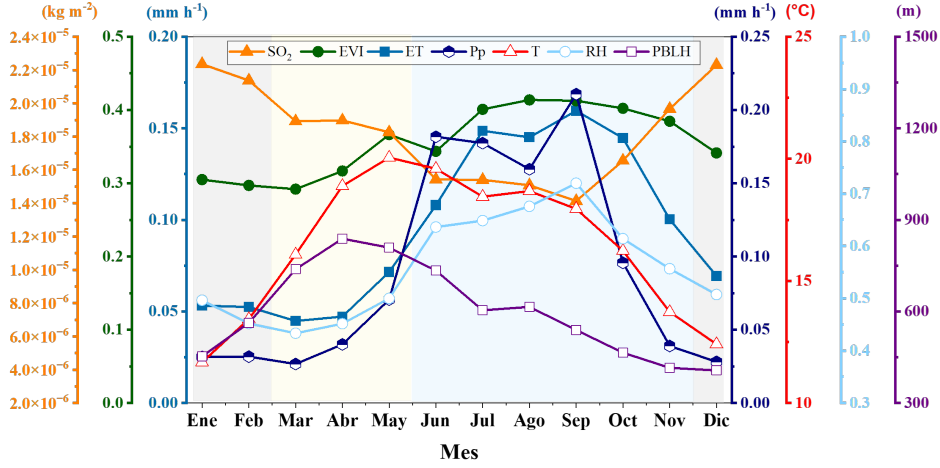


Figura 4.5: Promedios mensuales en el periodo 2000 – 2024 en la región R_3

valores altos después de la temporada de lluvias. En el caso del SO_2 , las concentraciones son más altas respecto a las otras dos regiones, solo disminuyendo durante la época de lluvias. Y se puede observar cómo la altura de la capa límite planetaria es menor que en las otras dos regiones, lo que indica una menor distribución de contaminantes en el aire y lo que podría estar influyendo en las concentraciones superficiales de SO_2 .

4.3. Series de tiempo y correlaciones

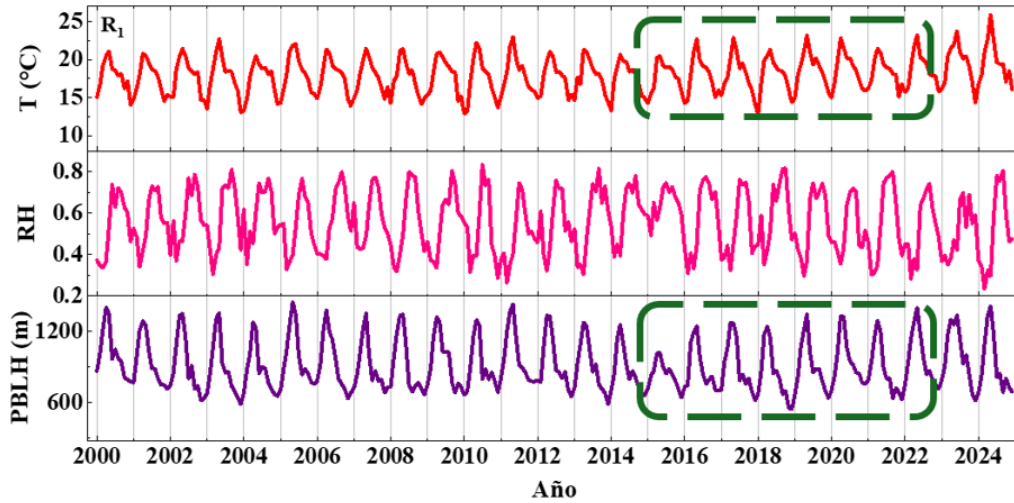


Figura 4.6: Variación temporal de T, RH y PBLH en la región R_1

Las series temporales analizadas para R_1 revelan patrones bien definidos en la dinámica anual de las variables hidroclimáticas y biofísicas evaluadas (Figuras 4.6 y 4.7). Entre 2008 y 2013, se identifica un periodo en el que la Pp y el EVI presentan una disminución marcada, lo que coincide con un descenso moderado de la ET. Aunque la reducción de Pp y EVI sugiere una menor

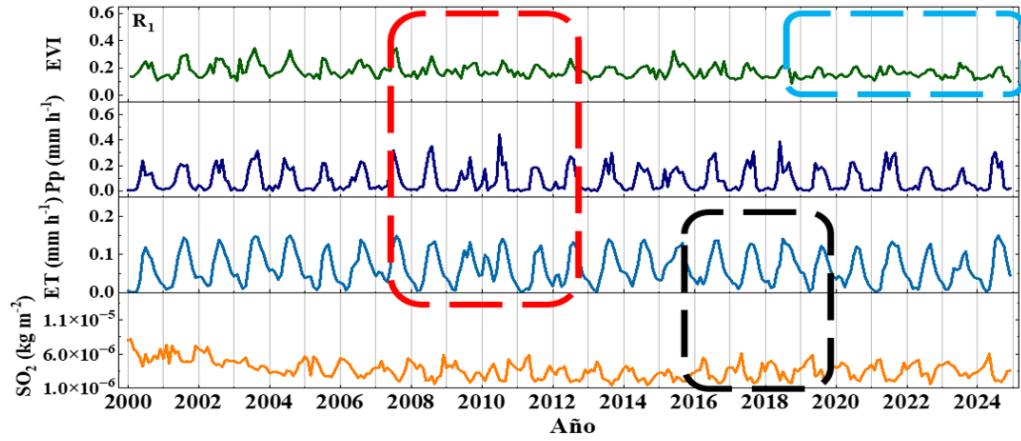


Figura 4.7: Variación temporal de EVI, Pp, ET y SO₂ en la región R₁

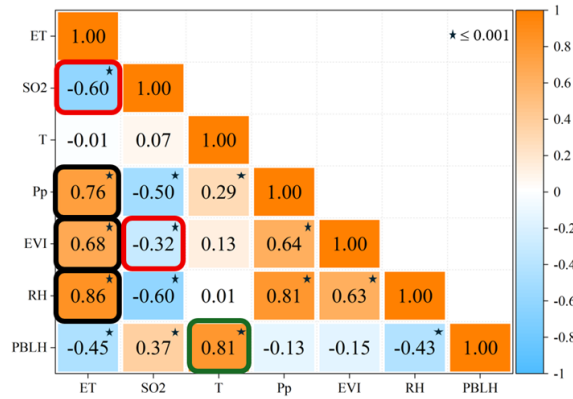


Figura 4.8: Mapa de correlación de Pearson en la región R₁

disponibilidad hídrica y una menor actividad vegetativa, los valores máximos de ET se mantienen relativamente constantes. Este comportamiento puede explicarse por el papel importante de la RH, que presenta una correlación fuerte con la ET ($r_s = 0.86$). Esto indica que, incluso en condiciones de baja concentración de Pp, una atmósfera con niveles altos de RH (Figura 5) puede sostener los niveles de ET.

La matriz de correlación (Figura 4.8) confirma estas relaciones al mostrar asociaciones positivas y significativas (en un intervalo de confianza de 99.9%) entre la ET y Pp ($r_s = 0.74$), EVI ($r_s = 0.69$) y, especialmente, RH ($r_s = 0.86$). En contraste, la T presenta una relación prácticamente nula con la ET ($r_s = -0.02$), lo que resalta que, en esta región, la disponibilidad hídrica y la presencia de vegetación activa son los principales controladores del proceso de ET, más que la variabilidad térmica. Por otro lado, se muestra una influencia negativa entre el SO₂, la ET ($r_s = -0.61$), y la Pp ($r_s = -0.51$), lo que nos indica un claro efecto negativo por parte del SO₂ a la ET, mientras que la Pp funciona como un lavado superficial que disminuye las concentraciones de SO₂.

Es importante destacar que, en los años más recientes, los máximos de EVI muestran una reducción progresiva. Este fenómeno podría estar vinculado a cambios en el uso del suelo, en particular a procesos de urbanización, que disminuyen la cobertura vegetal y limitan la capacidad de la superficie para sostener los valores de ET. La disminución en la actividad

vegetativa, reflejada en el EVI, coincide con su correlación positiva con la ET, reforzando el papel de la vegetación como componente clave en la transpiración y en la modulación de la ET total.

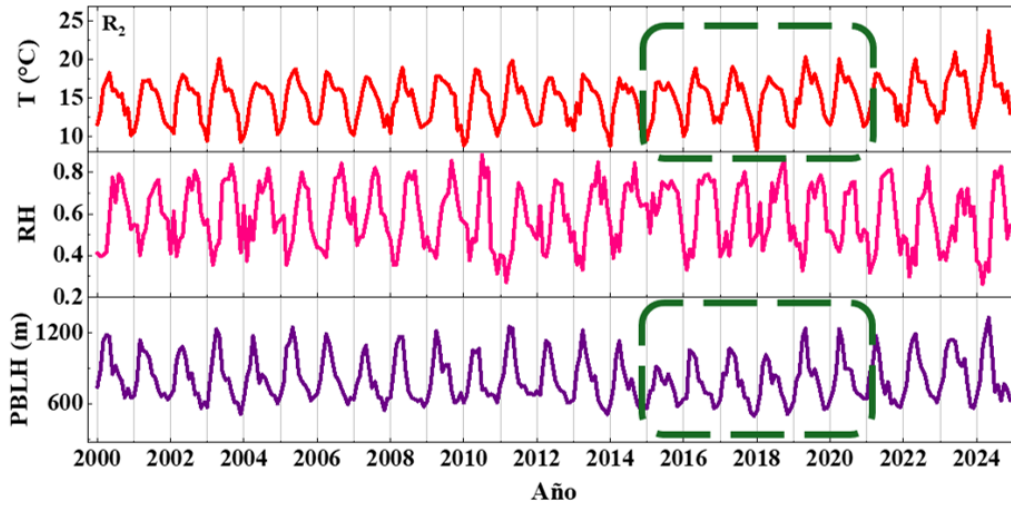


Figura 4.9: Variación temporal de T, RH y PBLH en la región R₂

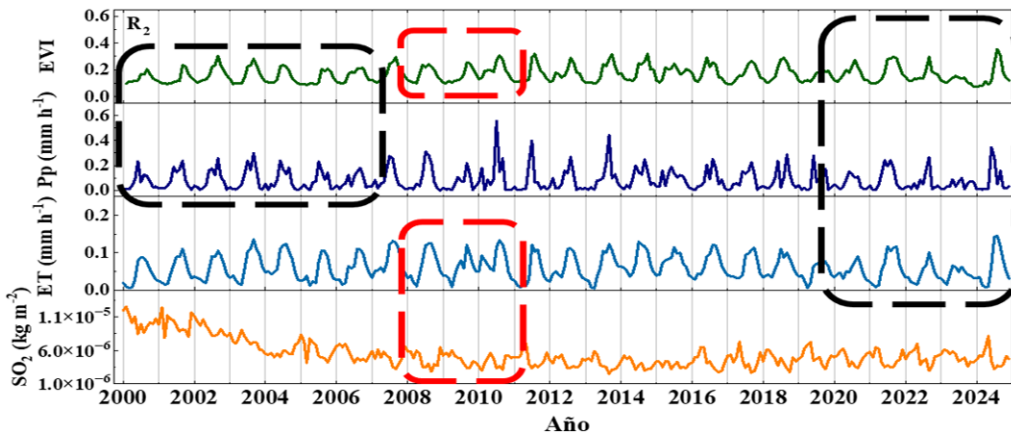
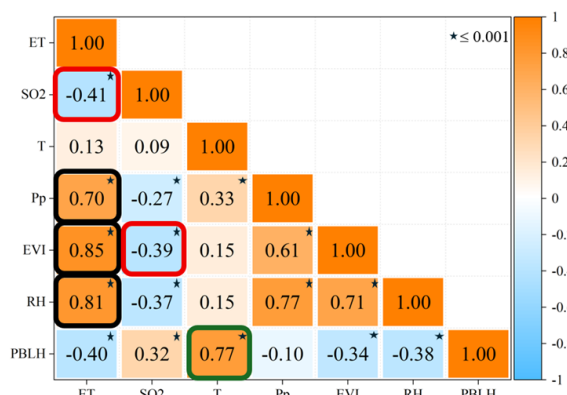
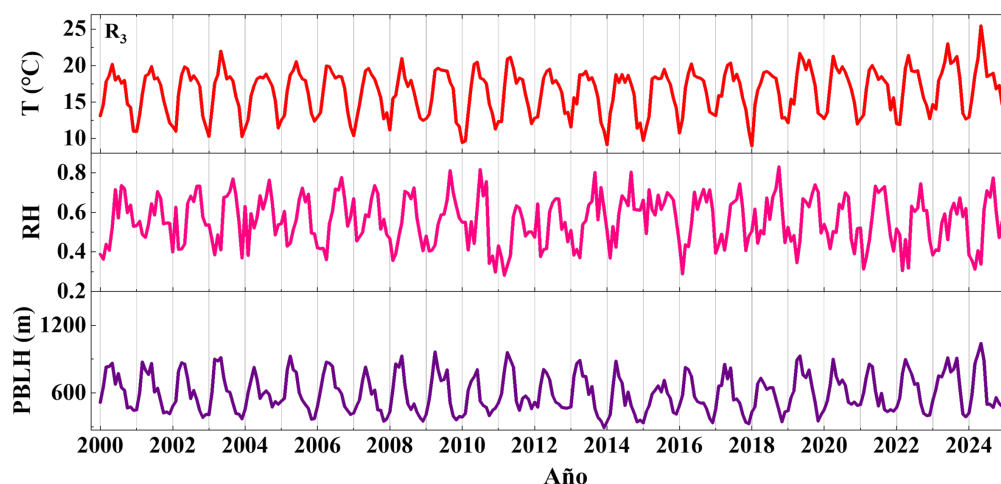


Figura 4.10: Variación temporal de EVI, Pp, ET y SO₂ en la región R₂

En las Figuras 4.9 y 4.10 se observa la dinámica temporal de T, RH, PBLH, Pp, EVI, ET y SO₂ en la zona R₂, caracterizada por matorral semidesértico y ausencia de cuerpos de agua permanentes. Durante los primeros años del periodo (2000-2007) y nuevamente hacia el final (2020-2024) se observa un comportamiento claramente proporcional entre la Pp y el EVI. Este patrón sugiere una respuesta casi inmediata de la vegetación a los pulsos de lluvia, lo cual es esperable en ecosistemas áridos donde predominan arbustos y matorrales altamente dependientes de la disponibilidad hídrica. Asimismo, entre 2011 y 2015 se identifica un periodo en el que la ET presenta variaciones más marcadas, coincidiendo con las fluctuaciones del EVI. Dado que la región carece de cuerpos de agua superficiales y la humedad del suelo depende casi exclusivamente de la lluvia, es razonable inferir que la ET durante este lapso estuvo fuertemente modulada por la vegetación activa disponible. La disminución temporal en la productividad vegetal durante esos años se refleja en reducciones de la ET.

Figura 4.11: Mapa de correlación de Pearson en la región R_2

La matriz de correlación (Figura 4.11) confirma esta relación funcional. El EVI presenta la correlación más alta con la ET ($r_s = 0.85$ en un intervalo de confianza del 99.9 %), lo que evidencia que la vegetación es el principal regulador de las pérdidas de agua a la atmósfera en esta zona. Del mismo modo, la correlación entre Pp y EVI ($r_s = 0.59$) es consistente con la dependencia fisiológica de la vegetación del matorral respecto a los eventos de Pp. En conjunto, estos resultados refuerzan la idea de que en ambientes semiáridos la lluvia gobierna la respuesta del dosel vegetal, y este a su vez controla la dinámica de la ET. Por otra parte, la T muestra una correlación alta con la PBLH ($r_s = 0.78$), lo cual sugiere que, la altura alcanzable por la capa se ve modulada por la temperatura, además en R_2 la disponibilidad de agua es un factor mucho más limitante que las condiciones térmicas a diferencia de zonas urbanas o agrícolas. Finalmente, las correlaciones entre RH y tanto Pp como ET ($r_s > 0.75$) respaldan esta interpretación, lo que indica que la humedad ambiental responde a los mismos ciclos de disponibilidad hídrica que determinan la actividad vegetal.

Figura 4.12: Variación temporal de T, RH y PBLH en la región R_3

A diferencia de lo observado en las otras regiones, la dinámica de la vegetación en R_3 no depende de manera directa de la Pp. La Figura 4.13 muestra que la región R_3 presenta una cobertura vegetal más densa y valores de EVI consistentemente superiores respecto a R_1 y R_2 . Por ejemplo, entre 2010 y 2013, la Pp fue mayor que en el periodo 2022-2024. Sin embargo, el

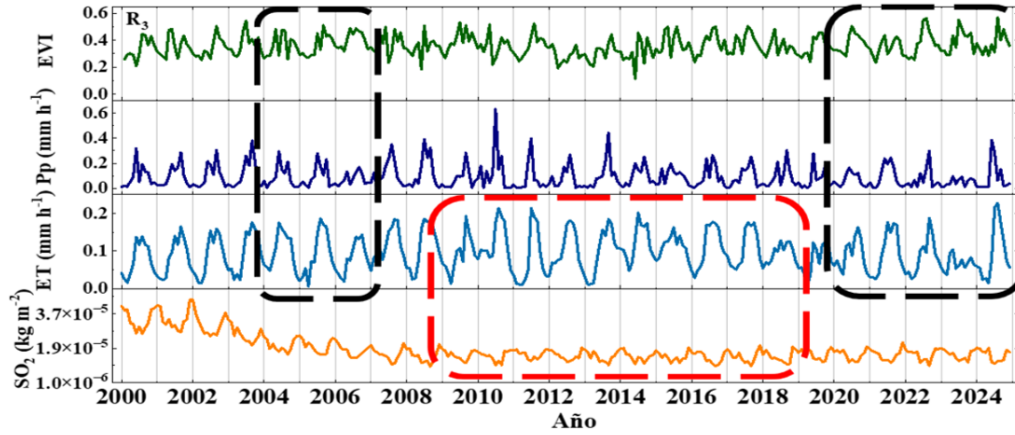


Figura 4.13: Variación temporal de EVI, Pp, ET y SO₂ en la región R₃

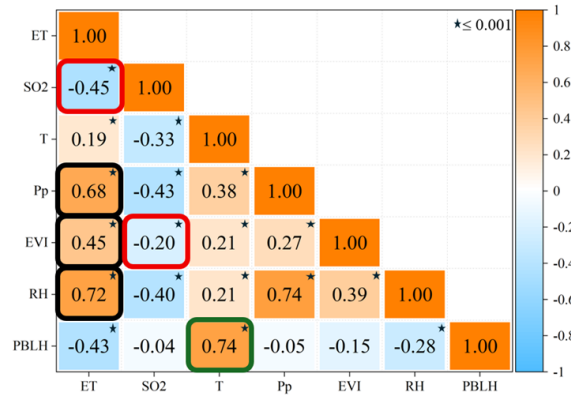


Figura 4.14: Mapa de correlación de Pearson en la región R₃

EVI no muestra una disminución significativa en ninguno de los dos intervalos. Esto sugiere que la vegetación boscosa de esta zona posee una mayor resiliencia hidrológica, posiblemente debido a su estructura radicular profunda y a la disponibilidad de humedad asociada a la presencia de cuerpos de agua en la región. El índice de correlación (Figura 4.14) refuerza esta interpretación, ya que no muestra una correlación fuerte entre EVI y Pp ($r_s = 0.21$), lo cual podemos considerar cierto, dado que se encuentra en un intervalo de confianza del 99.9%. Aunque en esta región tanto la ET como el EVI presentan valores más altos que en R₁ y R₂, la correlación entre EVI y ET es la más baja entre las tres zonas ($r_s = 0.44$). Esta relación reducida se explica porque, a diferencia de los ecosistemas áridos o urbano-semiáridos donde la ET es fuertemente controlada por la vegetación, en R₃ existe una contribución adicional proveniente de los cuerpos de agua. Este aporte hidrológico, independiente del vigor vegetativo, incrementa la ET total y debilita la relación estadística entre ambas variables. Además, la PBLH mantiene los valores más bajos que en las otras dos regiones (Figura 4.12) lo que puede ayudar a explicar las mayores concentraciones de SO₂ por la dificultad de su distribución, se puede observar que la correlación ($r_s = -0.39$) entre ET y SO₂ aparentemente muestra que a pesar de haber mayor concentración superficial de SO₂ en esta región, el impacto es menor en la ET que en otras zonas con menor disponibilidad hídrica y de vegetación activa.

Por otro lado, la ET muestra una correlación elevada con la RH ($r_s = 0.72$) y una correlación moderada con la Pp ($r_s = 0.66$), lo que indica que, en este sistema, la disponibilidad atmosférica de

humedad y los aportes superficiales de agua desempeñan un papel más determinante en el proceso evaporativo que la actividad vegetativa. Este patrón contrasta con lo observado en R_1 y R_2 , donde la ET depende principalmente del vigor de la vegetación y de la Pp.

4.4. Anomalías relativas y tendencias

La ET presenta mayormente una RA negativa en las tres regiones, como se evidencia en la Figura 4.15, lo que indica, en promedio, una tendencia decreciente. Mientras que en la Figura 4.16 se puede observar que, a partir de 2005, la RA para SO_2 en las tres regiones igualmente tienden a ser negativas, sin embargo, en R_3 se muestra una menor variabilidad, lo que nos indica que las concentraciones de SO_2 son más estables sufriendo pocas alteraciones por las condiciones climatológicas de la región, mientras que en R_1 y R_2 las concentraciones sufren alteraciones constantes por lo que muestran una mayor distribución. Además, en la Figura 4.17 se muestra cómo el SO_2 presenta una tendencia negativa en las tres regiones, aunque R_1 y R_2 muestran una tendencia negativa en la ET mayor que en R_3 lo que indica que la presencia de SO_2 no es un factor determinante en la pérdida de ET para la región R_3 .

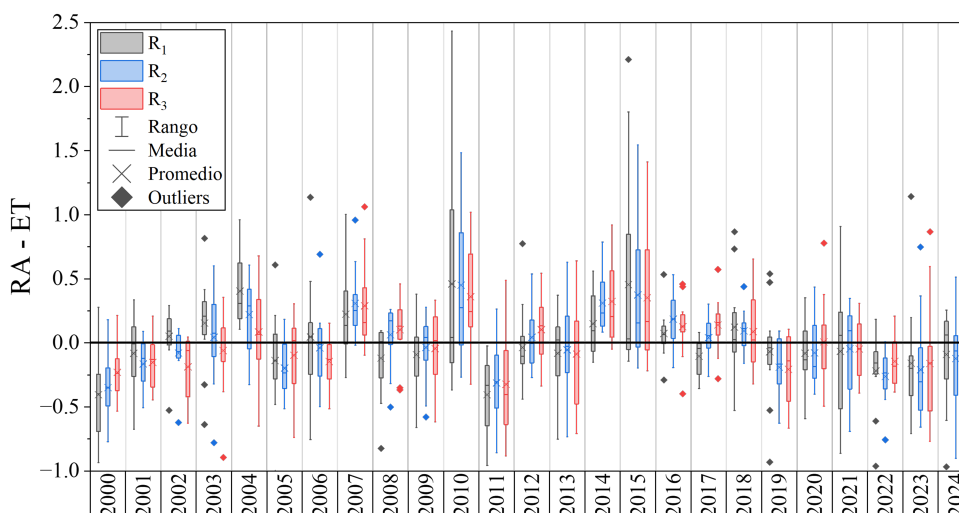


Figura 4.15: Distribución de la anomalía relativa de Evapotranspiración Total durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R_1 , R_2 y R_3

La Figura 4.18 presenta la comparación entre la dispersión de la variabilidad (RA) de la Pp en las tres regiones, la mayoría de los promedios se encuentran por debajo del 0, es decir, que en promedio la Pp en las tres regiones ha sido decreciente, de igual manera, se observa que la variabilidad de la RA es grande esto debido a la presencia de temporadas de lluvias y temporadas secas durante el año. En la Figura 4.19 se observa que la precipitación presenta una tendencia negativa en las tres regiones; sin embargo, en la región R_3 se observa una pendiente negativa más pronunciada. Además, podemos notar cuencia a ello.

En la Figura 4.20 se distingue la comparación entre la dispersión de la variabilidad (RA) del EVI en las tres regiones, para R_1 , podemos observar que a partir de 2017 la RA en promedio tiende a ser negativa lo cual podría deberse a actividades de urbanización y en consecuencia presentar efectos negativos en la ET, en el caso de la región R_2 , se muestran la mayoría de promedios cercanos a cero, sin embargo la dispersión en esta región es muy alta lo cual se debe a que sus cambios de

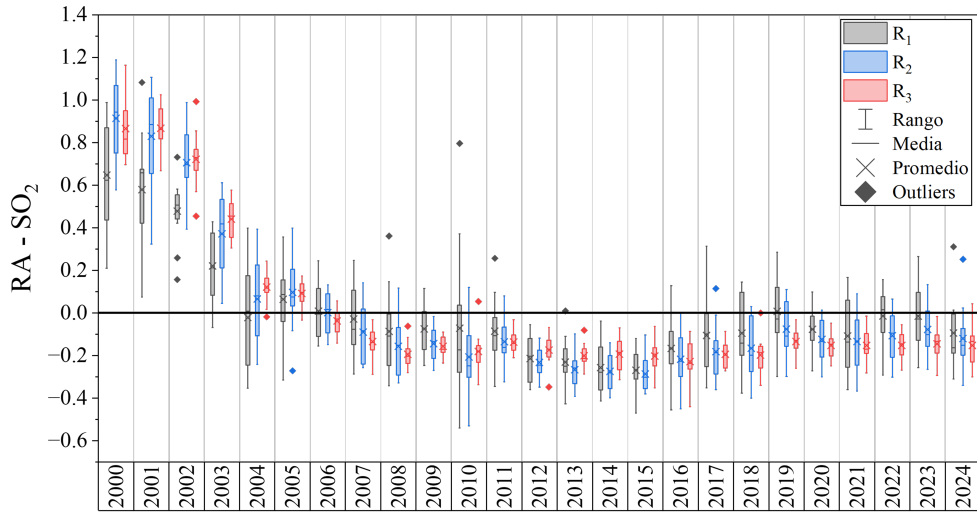


Figura 4.16: Distribución de la anomalía relativa de Dióxido de Azufre durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R_1 , R_2 y R_3

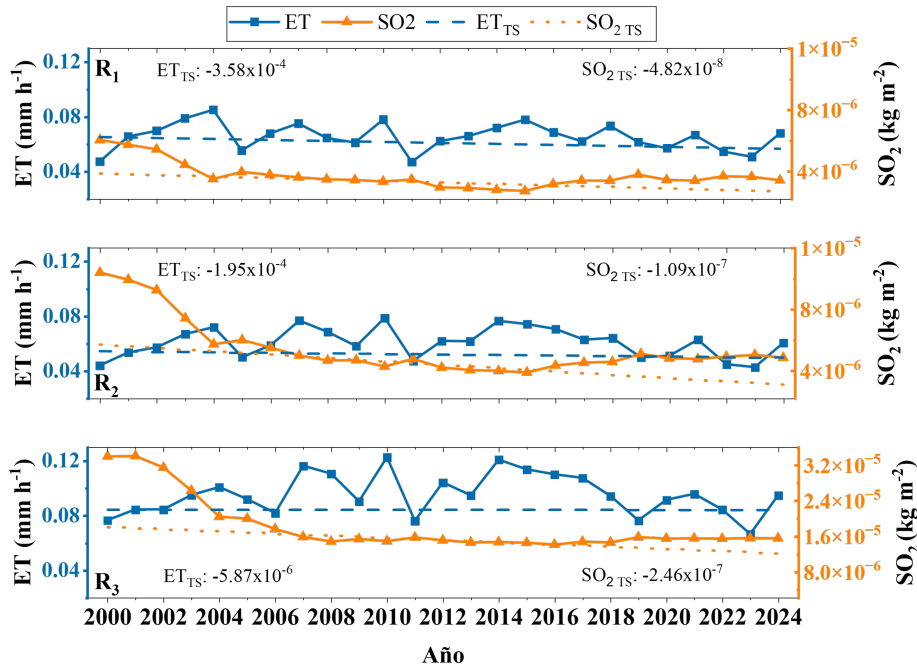


Figura 4.17: Tendencias de Evapotranspiración Total vs Dióxido de Azufre para el periodo 2000 - 2024 en las regiones R_1 , R_2 , y R_3 .

vegetación durante el año son muy drásticos, es decir mientras haya lluvias la RA tiende a ser positiva, pero cuando termina la temporada de lluvias rápidamente pasa a ser negativa al ser un lugar semiárido dependiente de las lluvias para mantener su vegetación activa, por parte de la región R_3 , se logra apreciar que en los dos últimos años la RA ha tendido a ser negativa prácticamente en gran parte del año, sin embargo, durante todo el periodo presenta un comportamiento intermitente

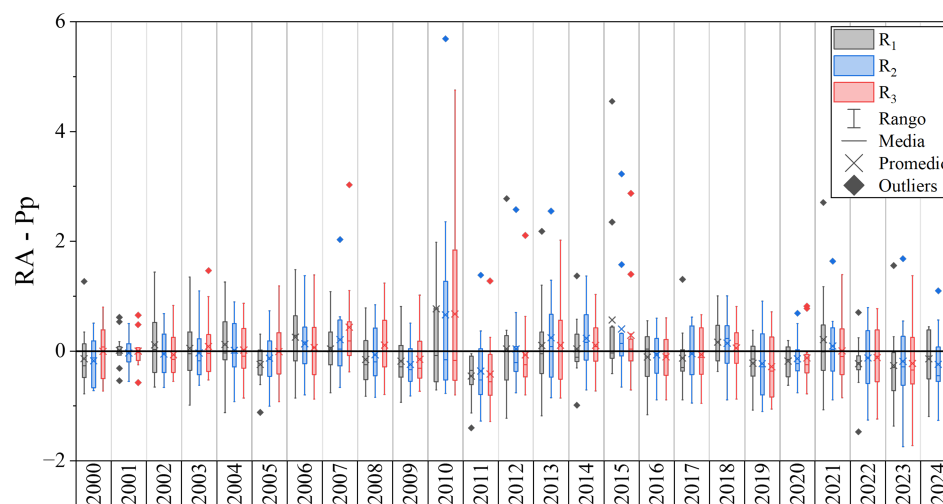


Figura 4.18: Distribución de la anomalía relativa de Precipitación durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R_1 , R_2 y R_3

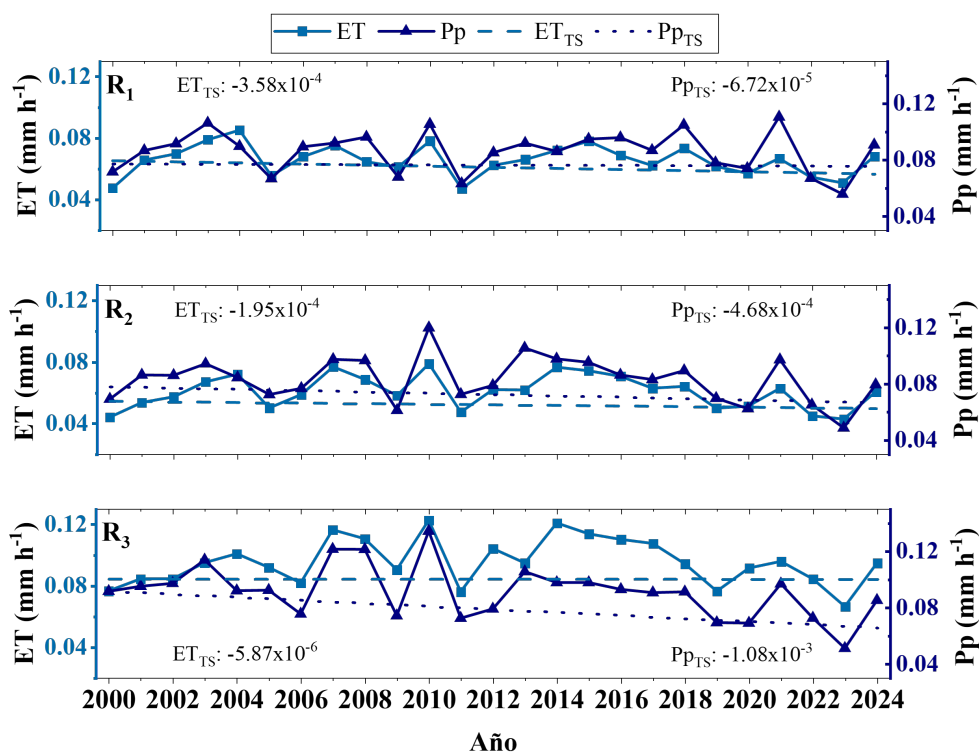


Figura 4.19: Tendencias de Evapotranspiración Total vs Precipitación para el periodo 2000 - 2024 en las regiones R_1 , R_2 , y R_3 .

en las RA siendo positivas y negativas por lo cual se esperaría que en años próximos vuelva a ser positiva. Además, de la Figura 4.21 se puede observar que solamente en la región R_1 , es donde la

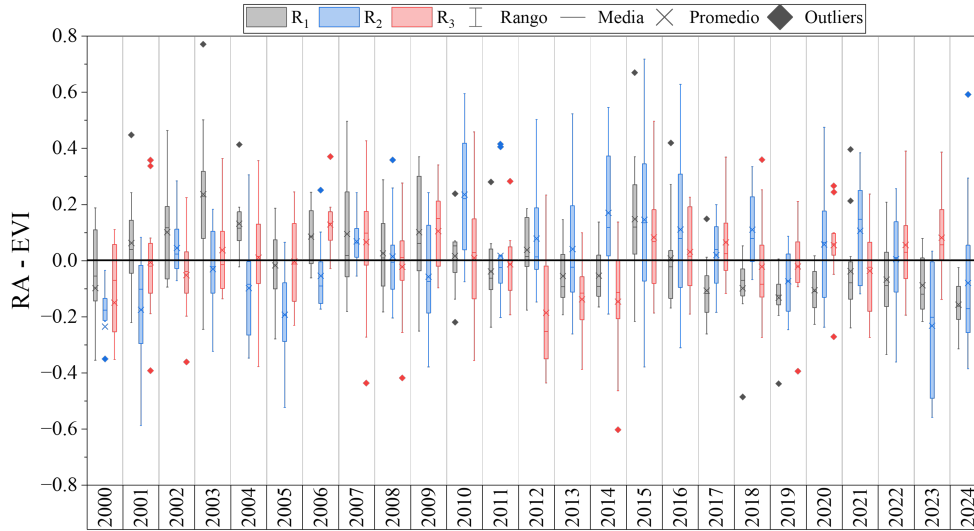


Figura 4.20: Distribución de la anomalía relativa de Índice de Vegetación Mejorado durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R_1 , R_2 y R_3

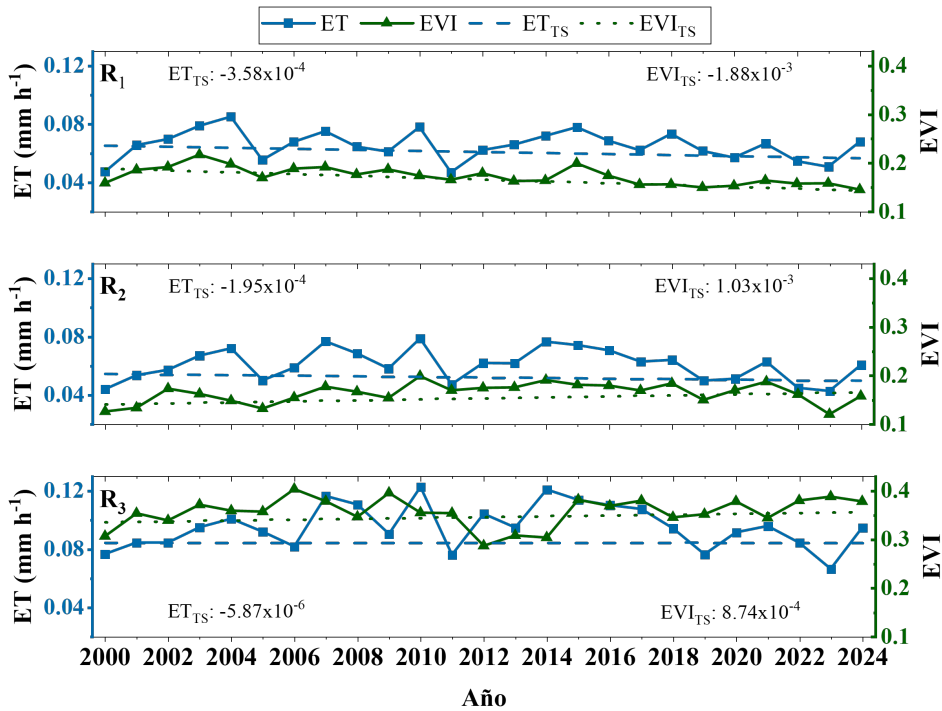


Figura 4.21: Tendencias de Evapotranspiración Total vs Índice de Vegetación Mejorado para el periodo 2000 - 2024 en las regiones R_1 , R_2 , y R_3 .

vegetación tiene una tendencia negativa la cual marca una diferencia respecto a la precipitación ya que, en este caso, la tendencia negativa de la vegetación si se ve relacionada con la tendencia nega-

tiva de la ET siendo ambas variables en esta región las pendientes decrecientes de mayor magnitud.

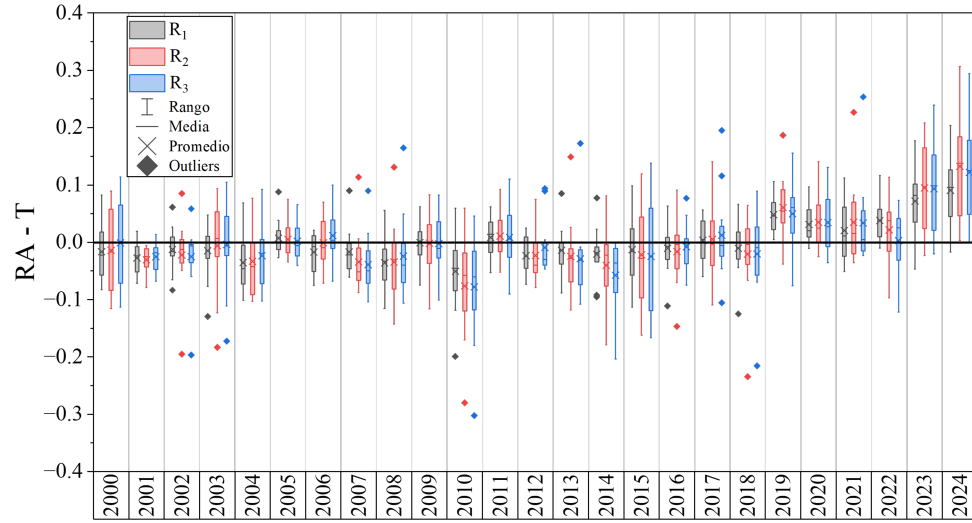


Figura 4.22: Distribución de la anomalía relativa de Temperatura durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R_1 , R_2 y R_3

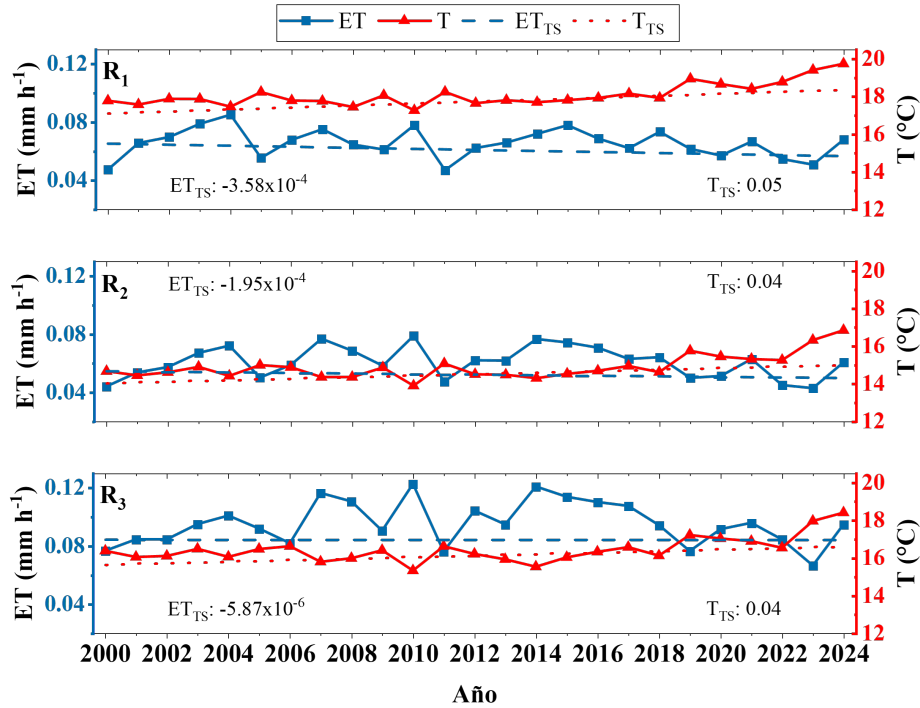


Figura 4.23: Tendencias de Evapotranspiración Total vs Temperatura para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R_1 , R_2 , y R_3 .

En los últimos años (2019-2024) se puede observar un incremento en la RA de la T para las tres regiones (Figura 4.22), aunque esta es mínima y con variabilidad alta, esto nos indica que en los siguientes años la T tomará una tendencia a incrementar en las tres regiones, y habrá que observar cómo se comporta la ET en esos últimos años para ver si hay una influencia directa. Las tendencias que se muestran en la Figura 4.23 refuerzan lo que indican las RA en el periodo 2019 – 2024. En las tres regiones se muestra una tendencia positiva muy pequeña, sin embargo, es en la región R_1 donde tenemos mayor temperatura respecto a las demás regiones, las cuales mayormente se mantienen por debajo de los 18 °C. Se podría interpretar que al incrementar la T, la ET disminuye, lo que parece contradictorio con lo que debería suceder. La interpretación más coherente es que la disminución de ET, al ser un factor que regula la T, sea esto lo que provoca estos incrementos en la T de las regiones.

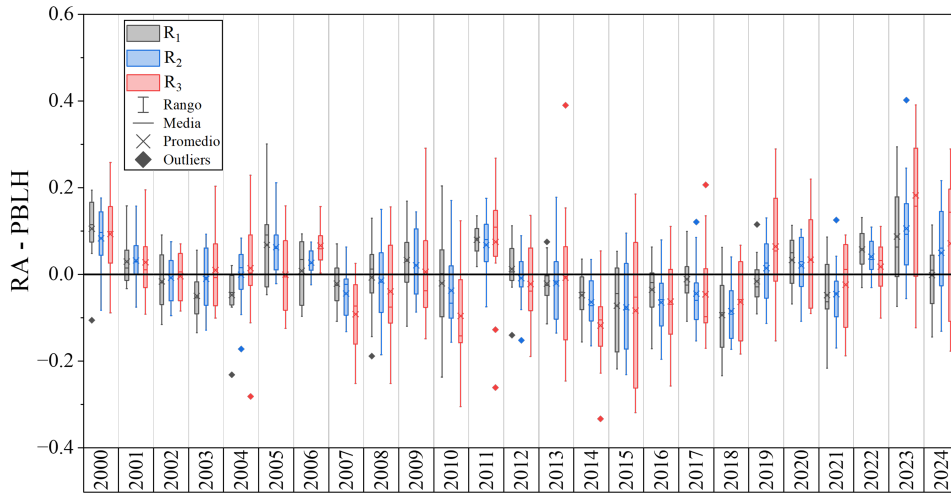


Figura 4.24: Distribución de la anomalía relativa de la Altura de la Capa Límite Planetaria durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R_1 , R_2 y R_3

Los resultados mostrados en la Figura 4.24 sugieren, en promedio, una RA negativa para las tres regiones; sin embargo, se observa que para R_3 la variación es mayor, mientras que R_1 y R_2 , a pesar de tener características diferentes, presentan un comportamiento similar. Por otro lado, se muestran las tendencias estimadas de la PBLH (Figura 4.25). Es notorio que en R_3 el decrecimiento es menor; sin embargo, los valores de la altura son menores, por lo cual esto podría influir en la distribución de los vapores de agua, manteniendo una concentración mayor en la zona y reduciendo la tendencia negativa de la ET en R_3 .

En los años más recientes (2019 – 2024) la RH a mostrado una tendencia negativa en la RA (Figura 4.26), debido a los cambios de temporada durante el transcurso de un año la RA muestra una distribución mediana en las tres regiones, con base a lo mostrado en la Figura 4.27, se indica que las 3 regiones mantienen una tendencia negativa similar; aunque, esta pérdida de humedad es pequeña casi nula, debe tomarse en cuenta ya que como se observa la RH representa muy bien el comportamiento de la ET ya que indica la disponibilidad hídrica en las tres regiones.

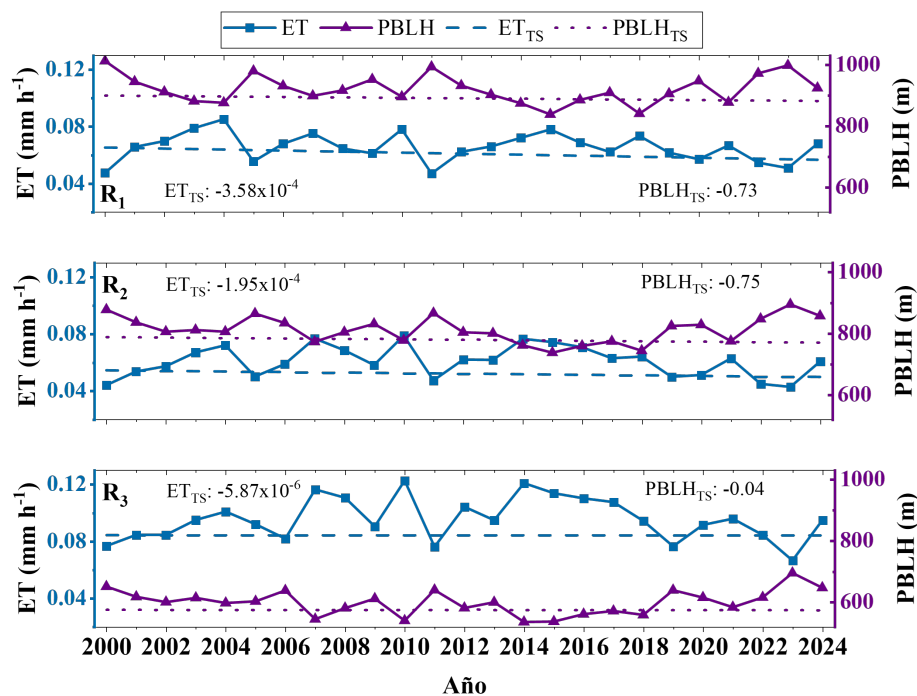


Figura 4.25: Tendencias de Evapotranspiración Total vs Altura de la Capa Límite Planetaria para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R₁, R₂, y R₃.

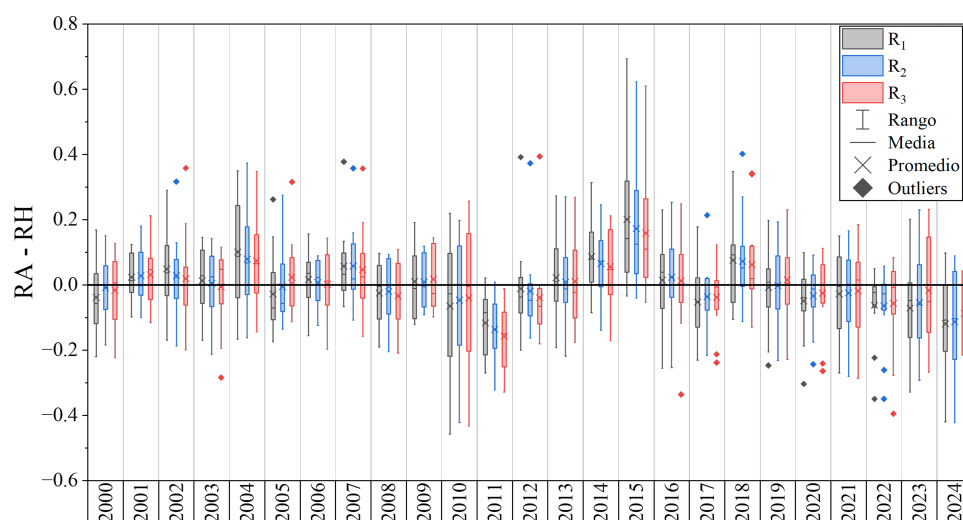


Figura 4.26: Distribución de la anomalía relativa de Humedad Relativa durante el periodo 2000 - 2024, en las regiones R₁, R₂ y R₃

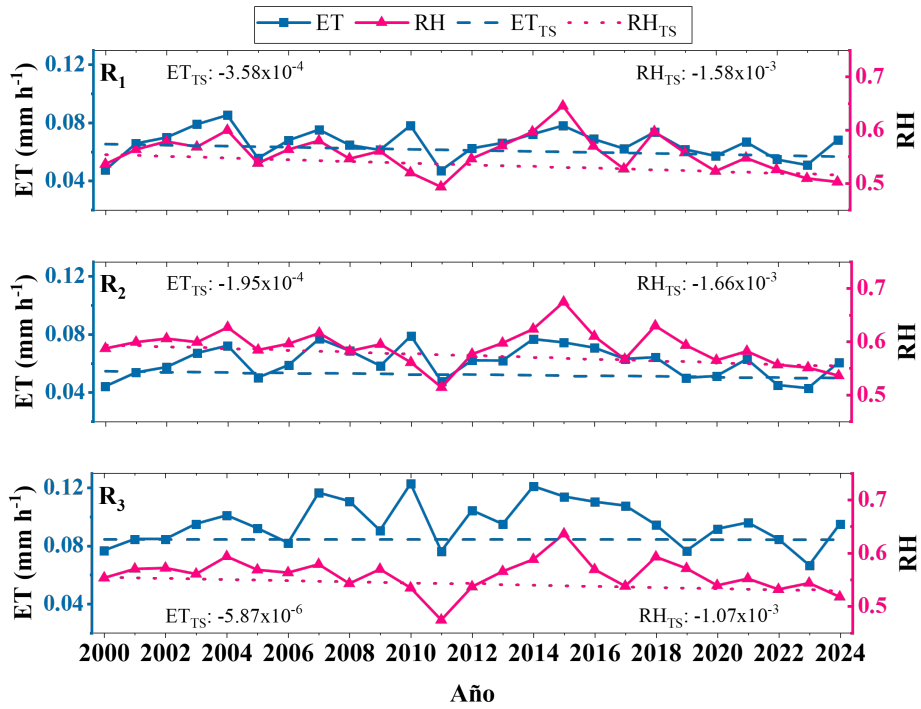


Figura 4.27: Tendencias de Evapotranspiración Total vs Humedad Relativa para el periodo 2000 – 2024 en las regiones R₁, R₂, y R₃.

Capítulo 5

Discusión de resultados

Los mapas de frecuencias de trayectorias pueden ser difíciles de interpretar debido a que son simulaciones de retro trayectorias. Es normal que se muestre una mayor frecuencia cerca de la ubicación analizada, ya que todas las trayectorias se concentran en este punto. Sin embargo, aun así podemos analizar la frecuencia entre los puntos más alejados, es así como podemos determinar que durante las épocas secas-calientes y secas-frías gran parte de las aportaciones de emisiones de SO_2 en la RBSG se originan a partir de las zonas petroleras ubicadas en el Golfo de México, lo que confirma una relación directa entre estas infraestructuras y las mayores concentraciones superficiales de SO_2 en comparación con R_1 y R_2 .

Con respecto a las concentraciones de SO_2 los resultados muestran una mayor concentración en R_3 , esto se relaciona directamente con las trayectorias de viento hacia la RBSG, en los mapas de frecuencia de trayectorias se muestra como la distribución de estas vienen desde la parte suroeste del país y en gran parte de la zona costera del golfo de México, lo que trae consigo las emisiones de SO_2 que se originan en estas zonas, además se determinó que la PBLH muestra valores más bajos (máximos por debajo de 800 m.) en comparación a R_1 y R_2 (mínimos por arriba de 800 m.), esto podría indicar que en R_3 la distribución de los contaminantes es menor, por lo cual tiene sentido observar una mayor concentración superficial de SO_2 , y a su vez, podría indicar que la altura baja toma función como un domo protector para la RBSG lo que evitaría una concentración de SO_2 mayor aún, debido a su exposición a estas zonas. Por otro lado, las concentraciones de SO_2 no indican un efecto significativo en la ET; incluso, siendo R_3 la región con las mayores concentraciones, la tendencia de la ET no refleja un impacto directo. Además, en esta región, se determinó una tendencia a disminuir para las concentraciones de SO_2 y se muestra una consistencia en los promedios de las anomalías manteniéndose por debajo de cero, por lo que las emisiones que llegan a concentrarse no son suficientes para representar una amenaza para la ET. De igual modo, considerando que el umbral de concentración superficial de SO_2 para ser considerado dañino a escala mensual es de $4.5 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-2}$ [23], los resultados evidencian que actualmente no hay un índice de riesgo significativo en la RBSG por la precipitación de SO_2 , sin embargo, se muestran valores cercanos al umbral, por lo cual un aumento en la emisiones antropogénicas de SO_2 podría llegar a afectar en un futuro.

En el caso de la Pp, se muestran correlaciones positivas con la ET ($R_1: r_s = 0.76$, $R_2: r_s = 0.70$, $R_3: r_s = 0.68$), indicando una mayor influencia en R_1 , sin embargo, las diferencias son pequeñas, incluso se logra apreciar en la Figura 18 que los patrones de ET y Pp tienen un comportamiento muy similar, aunque es importante notar que las tendencias indican una menor caída de ET en R_3 , mientras que en esta misma región se reporta el mayor descenso de la Pp en comparación con R_1 y R_2 , esto evidencia que la ET tienen una mayor dependencia de la Pp en regiones con características urbanas y semiaridas. Con ello también se puede observar la correlación con el

EVI ($R_1: r_s = 0.64$, $R_2: r_s = 0.61$, $R_3: r_s = 0.27$), esta nos indica que en R_3 el EVI no presenta una relación tan estrecha con la Pp, a diferencia de lo observado en R_1 y R_2 , donde la vegetación responde casi directamente a los pulsos de Pp.

Los índices de correlación entre la ET y EVI ($R_1: r_s = 0.68$, $R_2: r_s = 0.85$, $R_3: r_s = 0.45$) muestran que la influencia en la dinámica de la ET no es lineal respecto a la cantidad de vegetación en la zona, la correlación en R_2 es muy grande, esto nos indica que la ET en esta zona depende altamente de la cantidad de vegetación disponible, lo cual causa mucho sentido al ser una región semiárida y no contar con otros aportes hídricos como cuerpos de agua, por otro lado podemos observar que en R_3 se muestra una mayor cobertura de vegetación, sin embargo, esto no hace más dependiente a la ET de ella, en este caso se observa una correlación mucho menor lo que nos indica que en zonas boscosas con cuerpos de agua la dinámica de la ET se ve más distribuida entre ambos factores. Además, se puede observar que la vegetación en R_3 presenta una mayor resiliencia ante la carencia de Pp en temporadas secas, en comparación con la vegetación de R_1 y R_2 , la cual muestra un comportamiento en proporción a la Pp.

La T no muestra una correlación significativa con la ET para ninguna de las tres regiones ($R_1: r_s = -0.01$, $R_2: r_s = 0.13$, $R_3: r_s = 0.19$), lo que sugiere que el comportamiento de la ET está determinado principalmente por la disponibilidad hídrica y la estructura de la vegetación, sin embargo, los resultados nos muestran que la ET sí mantiene una influencia en la T, en las tres regiones se observa a nivel anual (Figura 4.23) que la T tiende a disminuir cuando la ET aumenta, lo que nos indica que la ET funciona como un regulador de la T en cualquier sitio y bajo cualquier contexto climatológico y fisiográfico, esto es importante ya que, nos demuestra que la priorización de la ET puede influir en reducir la T a nivel global. Además, se evidencia que, aunque la tendencia negativa de la ET en las tres regiones es relativamente pequeña, es suficiente para incrementar la T con el paso de los años, como se aprecia que, a partir de 2022, la T se ha incrementado en consecuencia de la disminución de la ET.

Los resultados también muestran que la RH toma un papel importante en la dinámica de la ET, la correlación entre estas variables ($R_1: r_s = 0.86$, $R_2: r_s = 0.81$, $R_3: r_s = 0.72$) indican una influencia directa, por lo cual el comportamiento de la RH podría ayudar a predecir los patrones de la ET, sin embargo, estos patrones tiende a mostrar diferencias entre si en regiones donde la ET no se encuentra determinada principalmente por la disponibilidad hídrica asociada a la Pp, en la Figura 4.27 se muestra como el comportamiento entre la RH y ET en la región R_3 llegan a tener menos similitudes que en R_1 y R_2 , esto indica que las regiones donde la disponibilidad hídrica es altamente dependiente de la cantidad de Pp van a mostrar patrones de comportamiento casi idénticos entre Pp, RH y ET.

En general, la dinámica de la ET se ve influida principalmente por la disponibilidad hidrológica de la región, aunque este impacto no es homogéneo. Como se ha evidenciado, las características fisiográficas toman un rol importante dentro del nivel de impacto que estas variables hidrológicas generan en la ET. Se ha mostrado que regiones como R_1 y R_2 presentan una mayor sensibilidad a las variaciones climáticas, lo que refleja una dependencia constante de la Pp. Por otro lado, aunque la Pp es importante en regiones como R_3 , esta dependencia no es tan fuerte.

Capítulo 6

Conclusiones

En regiones urbanas (R_1), nos encontramos con un nivel de RH capaz de influir en la ET al amplificar el efecto de la Pp. Al tener una mayor disponibilidad de humedad en la atmósfera, la vegetación activa de la zona tiene mayor facilidad para transpirar, lo que aumenta directamente la ET. Por lo tanto, en estas zonas la interacción entre la RH y la Pp se traduce en valores de ET más altos que en regiones con RH más bajo, así como en zonas desérticas o semidesérticas. En regiones con características semidesérticas (R_2), los patrones de ET se ven condicionados directamente por el estrés hídrico, lo que pone a la Pp y al EVI como variables críticas de las cuales depende la ET casi en su totalidad. La escasez de agua hace que la vegetación dependa directamente de las lluvias para su actividad transpiratoria, mientras que el EVI refleja la capacidad de la cobertura vegetal para aprovechar la Pp disponible.

Por otro lado, los patrones de ET en la RBSG (R_3) se ven influenciados por variables como la Pp, RH y EVI, sin embargo, estas variables no predominan en su comportamiento, se ha demostrado que al ser una área con alta densidad de vegetación y presencia de cuerpos de agua (como bosques y zonas montañosas), los valores de la ET se ven influenciados en gran parte por su mismo ecosistema, incluso al tener un mayor volumen de vegetación no significa que toda esta sea la responsable del proceso de la ET, se mostró que bajo este contexto fisiográfico es posible la presencia de valores más altos de ET en comparación a las otras regiones a pesar de mantener un volumen de Pp inferior a la presente en estas otras regiones, adjudicando estos resultados a la presencia de agua superficial como ríos, lagos, etc., contrarrestando así el posible efecto negativo que podría causar una baja presencia de la Pp.

Esta investigación logró evidenciar que la ET no solo depende de las variables climatológicas, sino también de las características fisiográficas y los ecosistemas presentes en la región, destacando la importancia de analizar escalas locales para la gestión hídrica y ambiental, ya que estrategias generalizadas podrían subestimar o sobrestimar la demanda de la ET.

Finalmente, se identificó que la cercanía de la RBSG a las actividades antropogénicas relacionadas con la extracción de petróleo ocasiona una mayor concentración de SO_2 con respecto a las presentes en R_1 y R_2 . Apesar de su proximidad y exposición a dichas emisiones la altura de la capa límite planetaria sirve como un domo que protege a la RBSG. Asimismo, se demostró que las concentraciones superficiales de SO_2 en la RBSG no representan un riesgo actualmente y, considerando la tendencia estimada, no representarán un problema a menos que las emisiones antropogénicas de SO_2 sean intensificadas a gran escala.

Apéndice A

Pruebas de significancia

A continuación se presentan las tablas de valores obtenidos tras la evaluación de los índices de correlación de Pearson obtenidos a través de la prueba t, además de los valores de t-crítico utilizados

gl	$\alpha = 0,20$	$\alpha = 0,15$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,025$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,005$	$\alpha = 0,001$
1	3.078	4.165	6.314	12.706	25.452	63.657	127.321	636.619
2	1.886	2.282	2.92	4.303	6.205	9.925	14.089	31.599
3	1.638	1.924	2.353	3.182	4.177	5.841	7.453	12.924
4	1.533	1.778	2.132	2.776	3.495	4.604	5.598	8.61
5	1.476	1.699	2.015	2.571	3.163	4.032	4.773	6.869
10	1.372	1.559	1.812	2.228	2.634	3.169	3.581	4.587
20	1.325	1.497	1.725	2.086	2.423	2.845	3.153	3.85
30	1.31	1.477	1.697	2.042	2.36	2.75	3.03	3.646
40	1.303	1.468	1.684	2.021	2.329	2.704	2.971	3.551
60	1.296	1.458	1.671	2.0	2.299	2.66	2.915	3.46
100	1.29	1.451	1.66	1.984	2.276	2.626	2.871	3.39
1000	1.282	1.441	1.646	1.962	2.245	2.581	2.813	3.300
∞	1.282	1.44	1.645	1.96	2.241	2.576	2.807	3.291

Tabla A.1: Valores críticos de t para la prueba de dos colas

Variables	t-value	t-crítico = 1.962 $\alpha = 0,05$	t-crítico = 2.581 $\alpha = 0,01$	t-crítico = 3.3 $\alpha = 0,001$
ET – SO ₂	-13.2213	+	+	+
ET – T	-0.3955	—	—	—
ET – Pp	19.1067	+	+	+
ET – EVI	16.2322	+	+	+
ET – RH	29.0463	+	+	+
ET – PBLH	-8.8200	+	+	+
SO ₂ – T	1.0226	—	—	—
SO ₂ – Pp	-10.1891	+	+	+
SO ₂ – EVI	-6.3769	+	+	+
SO ₂ – RH	-13.1561	+	+	+
SO ₂ – PBLH	6.6332	+	+	+
T – Pp	4.8790	+	+	+
T – EVI	2.4278	+	—	—
T – RH	-0.1274	—	—	—
T – PBLH	23.9688	+	+	+
Pp – EVI	13.7787	+	+	+
Pp – RH	23.8485	+	+	+
Pp – PBLH	-2.3959	+	—	—
EVI – RH	13.7939	+	+	+
EVI – PBLH	-2.4732	+	—	—
RH – PBLH	-8.2528	+	+	+

Tabla A.2: Niveles de confianza evaluados para los coeficientes de correlación en R_1

Variables	t-value	t-crítico = 1.962 $\alpha = 0,05$	t-crítico = 2.581 $\alpha = 0,01$	t-crítico = 3.3 $\alpha = 0,001$
ET – SO ₂	-8.1226	+	+	+
ET – T	1.8529	—	—	—
ET – Pp	16.4918	+	+	+
ET – EVI	28.0043	+	+	+
ET – RH	24.2768	+	+	+
ET – PBLH	-7.4309	+	+	+
SO ₂ – T	0.5674	—	—	—
SO ₂ – Pp	-5.0094	+	+	+
SO ₂ – EVI	-8.1356	+	+	+
SO ₂ – RH	-5.8926	+	+	+
SO ₂ – PBLH	5.1140	+	+	+
T – Pp	5.4565	+	+	+
T – EVI	2.3403	+	—	—
T – RH	2.1776	+	—	—
T – PBLH	21.2463	+	+	+
Pp – EVI	12.6122	+	+	+
Pp – RH	19.3089	+	+	+
Pp – PBLH	-1.8815	—	—	—
EVI – RH	17.2959	+	+	+
EVI – PBLH	-6.2175	+	+	+
RH – PBLH	-7.0405	+	+	+

Tabla A.3: Niveles de confianza evaluados para los coeficientes de correlación en R_2

Variables	t-value	t-crítico = 1.962 $\alpha = 0,05$	t-crítico = 2.581 $\alpha = 0,01$	t-crítico = 3.3 $\alpha = 0,001$
ET – SO ₂	-7.2261	+	+	+
ET – T	3.4862	+	+	+
ET – Pp	15.3518	+	+	+
ET – EVI	8.4174	+	+	+
ET – RH	18.1151	+	+	+
ET – PBLH	-8.0872	+	+	+
SO ₂ – T	-5.4581	+	+	+
SO ₂ – Pp	-5.3883	+	+	+
SO ₂ – EVI	-3.6887	+	+	+
SO ₂ – RH	-4.9262	+	+	+
SO ₂ – PBLH	-0.5085	—	—	—
T – Pp	6.5273	+	+	+
T – EVI	3.6125	+	+	+
T – RH	3.7609	+	+	+
T – PBLH	18.7952	+	+	+
Pp – EVI	3.7535	+	+	+
Pp – RH	17.9715	+	+	+
Pp – PBLH	-1.0637	—	—	—
EVI – RH	7.1618	+	+	+
EVI – PBLH	-2.4589	+	—	—
RH – PBLH	-5.0081	+	+	+

Tabla A.4: Niveles de confianza evaluados para los coeficientes de correlación en R₃

Apéndice B

Coeficientes de correlación de Spearman

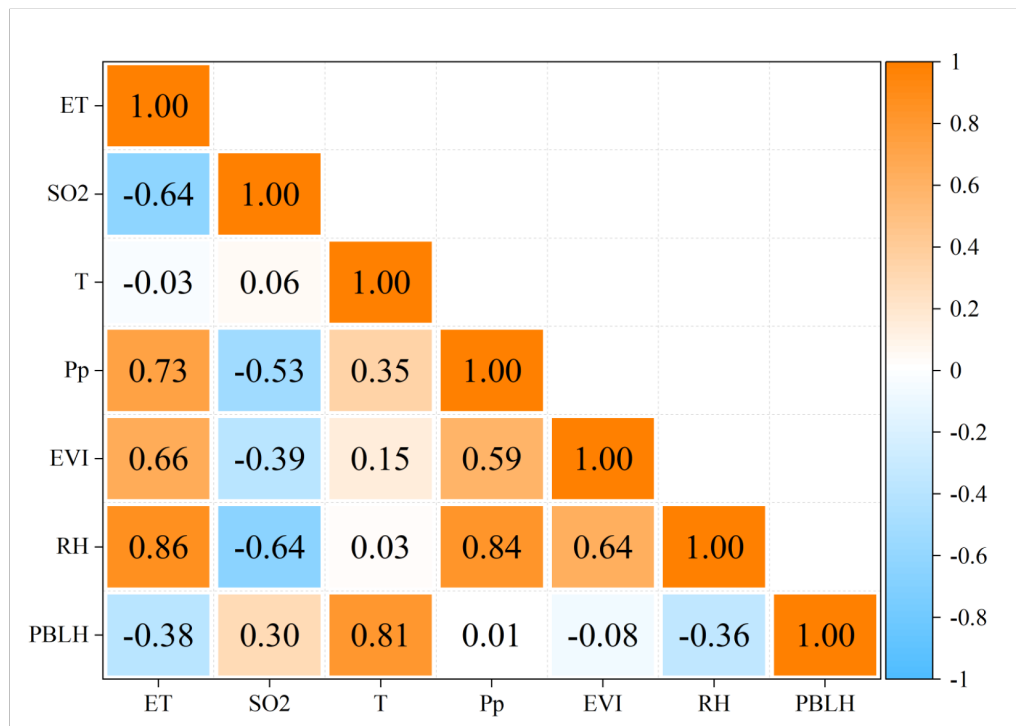


Figura B.1: Coeficientes de correlación en la región R_1

Coeficientes de correlación de Spearman

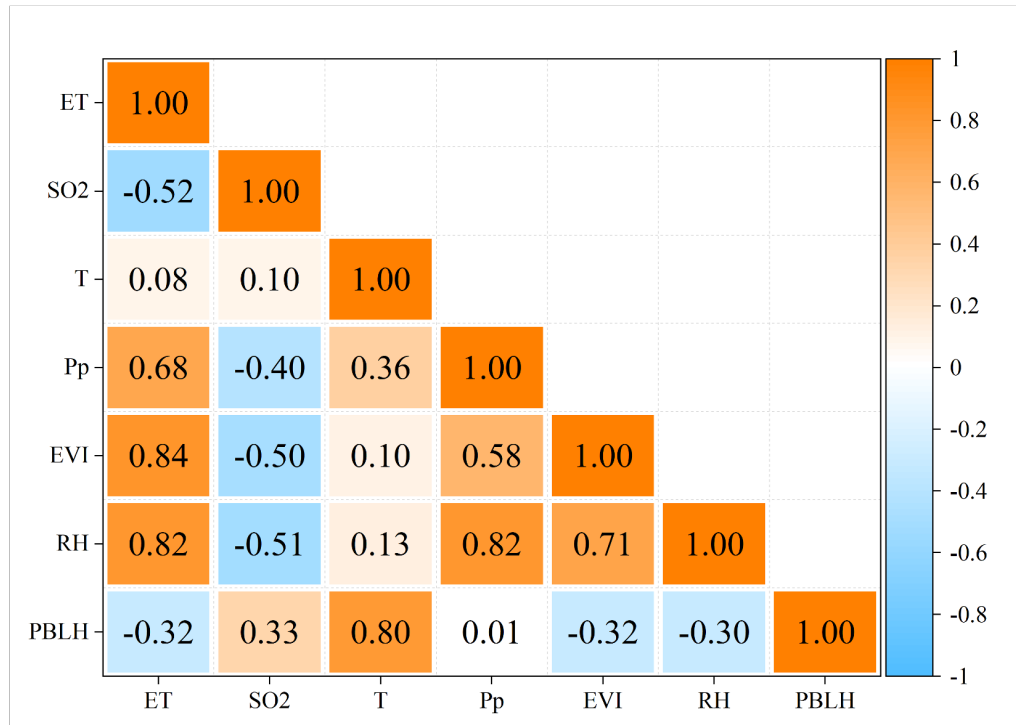


Figura B.2: Coeficientes de correlación en la región R_2

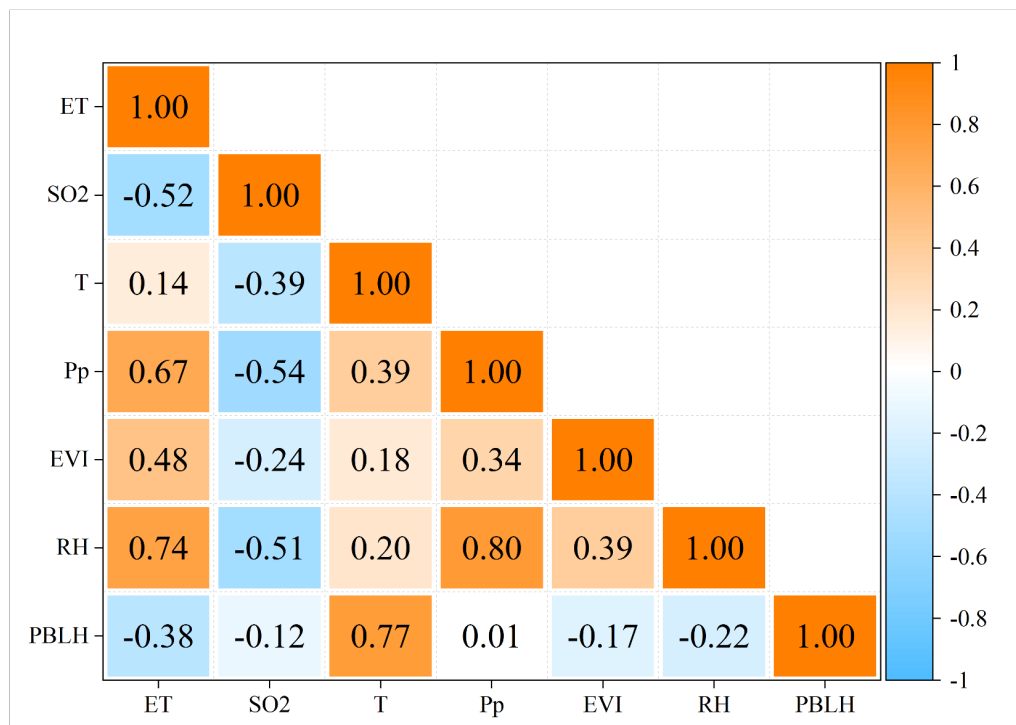


Figura B.3: Coeficientes de correlación en la región R_3

Apéndice C

Coeficientes de correlación de Kendall

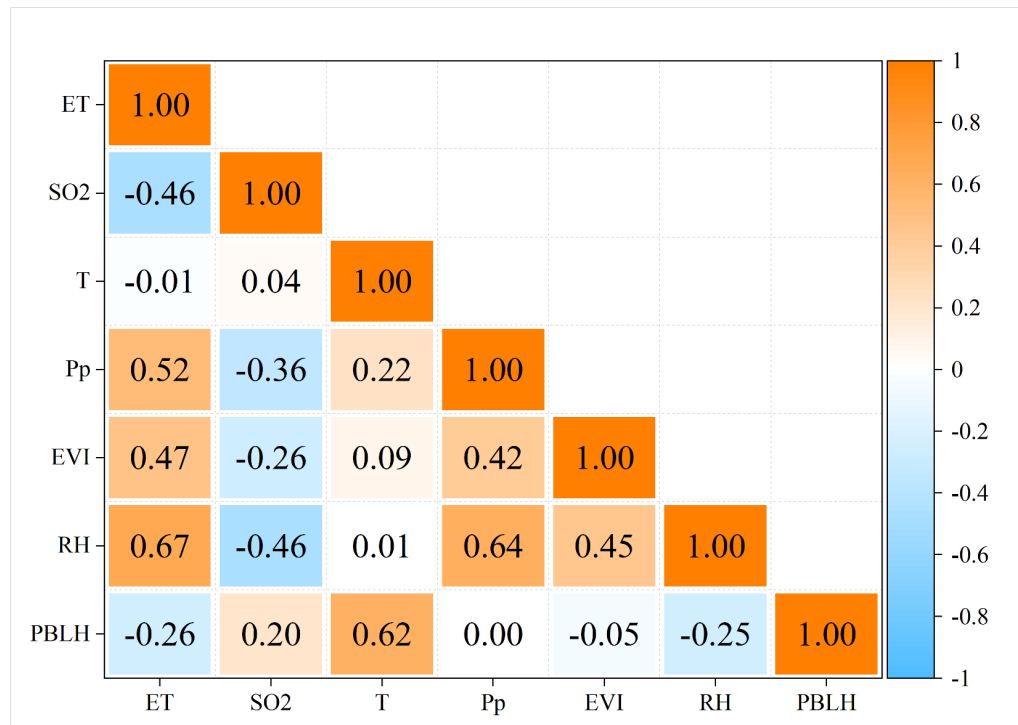


Figura C.1: Coeficientes de correlación en la región R_1

Coeficientes de correlación de Kendall

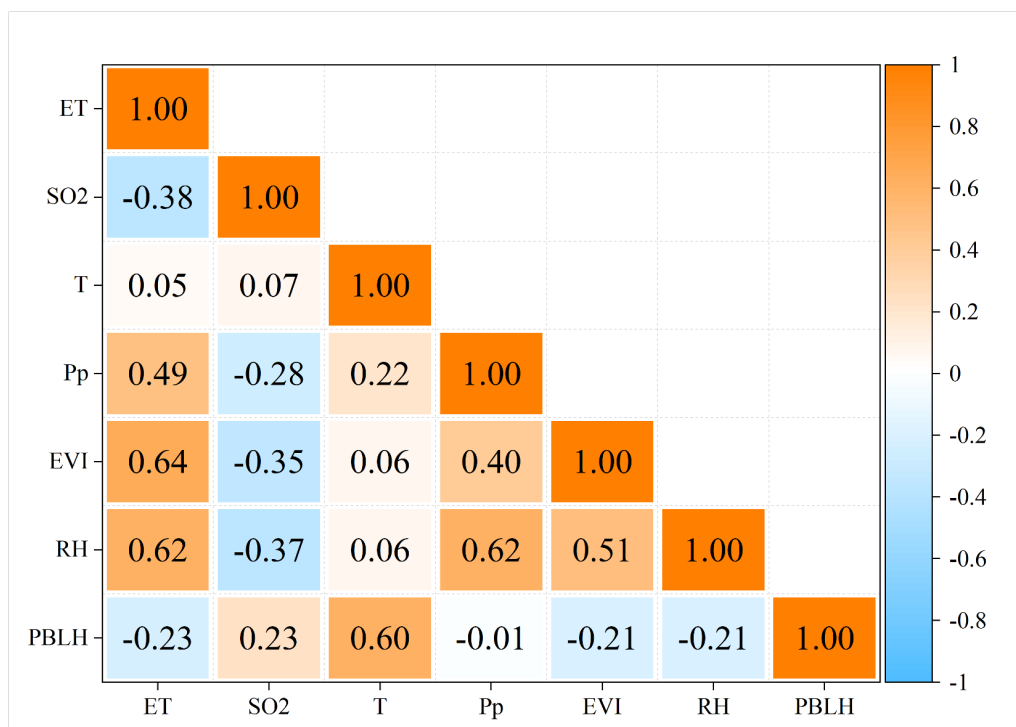


Figura C.2: Coeficientes de correlación en la región R_2

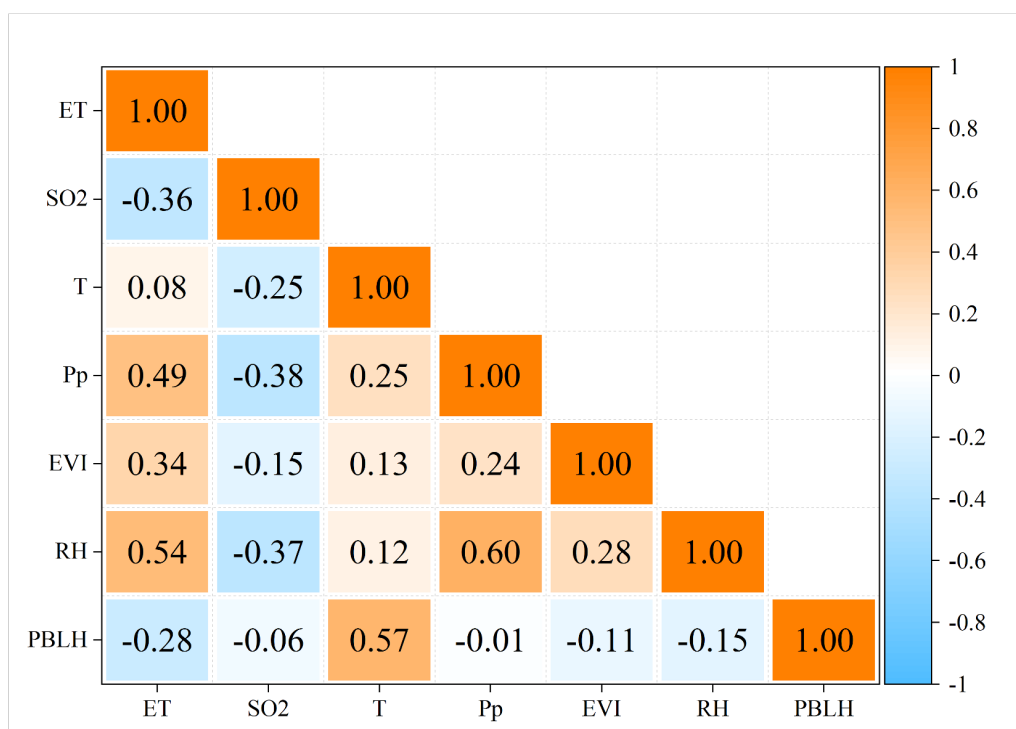


Figura C.3: Coeficientes de correlación en la región R_3

Apéndice D

Índices de estacionalidad

Mes	ET	SO ₂	EVI	Pp	T	RH	PBLH
Enero	0.5179	1.1542	0.7745	0.2171	0.8139	0.8559	0.7969
Febrero	0.5101	1.1853	0.8082	0.2526	0.9051	0.7700	0.9559
Marzo	0.4073	1.1562	0.8659	0.2405	1.0241	0.6712	1.1895
Abril	0.2813	1.3053	0.8608	0.2098	1.1564	0.6836	1.3912
Mayo	0.5221	1.2391	0.9069	0.6793	1.2030	0.8418	1.3998
Junio	1.0407	0.8415	1.0347	2.1702	1.1243	1.1606	1.1551
Julio	1.7258	0.8079	1.3405	2.5363	1.0542	1.3189	0.9637
Agosto	1.9633	0.7767	1.3662	2.2712	1.0437	1.3069	0.9418
Septiembre	1.9213	0.6563	1.2191	2.1830	1.0114	1.3398	0.8652
Octubre	1.4588	0.7834	1.0191	0.8093	0.9571	1.1558	0.8422
Noviembre	0.9823	0.9348	0.9868	0.2766	0.8739	1.0003	0.7662
Diciembre	0.6691	1.1593	0.8173	0.1543	0.8329	0.8951	0.7323

Tabla D.1: Índices de estacionalidad en la región R₁

Mes	ET	SO ₂	EVI	Pp	T	RH	PBLH
Enero	0.5613	1.0959	0.6968	0.3328	0.7255	0.8511	0.7957
Febrero	0.6001	1.1235	0.6502	0.3396	0.8489	0.7745	0.9571
Marzo	0.5308	1.0705	0.6925	0.3051	1.0056	0.7061	1.1936
Abril	0.4607	1.1881	0.7662	0.3934	1.1841	0.7313	1.3918
Mayo	0.6699	1.2011	0.8401	0.7896	1.2448	0.8713	1.3521
Junio	1.0427	0.9330	0.9934	1.9933	1.1760	1.1591	1.1330
Julio	1.6152	0.8966	1.2792	2.0714	1.0992	1.2573	0.9951
Agosto	1.6714	0.8759	1.4276	1.8552	1.1006	1.2736	0.9938
Septiembre	1.7585	0.7980	1.4829	2.2523	1.0545	1.3362	0.8776
Octubre	1.4432	0.8447	1.2603	0.9704	0.9624	1.1528	0.8186
Noviembre	0.9765	0.9190	1.0517	0.4154	0.8306	1.0015	0.7520
Diciembre	0.6698	1.0536	0.8591	0.2815	0.7680	0.8853	0.7396

Tabla D.2: Índices de estacionalidad en la región R₂

Mes	ET	SO ₂	EVI	Pp	T	RH	PBLH
Enero	0.5571	1.2279	0.8557	0.3453	0.7103	0.8901	0.7574
Febrero	0.5497	1.1741	0.8333	0.3481	0.8178	0.8103	0.9402
Marzo	0.4694	1.0394	0.8193	0.2922	0.9786	0.7771	1.2340
Abril	0.4945	1.0424	0.8888	0.4400	1.1496	0.8099	1.4014
Mayo	0.7501	1.0031	1.0284	0.7748	1.2204	0.8968	1.3522
Junio	1.1324	0.8476	0.9640	1.9961	1.1927	1.1410	1.2264
Julio	1.5584	0.8461	1.1252	1.9475	1.1229	1.1630	1.0092
Agosto	1.5209	0.8284	1.1612	1.7521	1.1369	1.2116	1.0278
Septiembre	1.6733	0.7764	1.1581	2.3155	1.0923	1.2913	0.9009
Octubre	1.5165	0.9093	1.1288	1.0516	0.9879	1.1010	0.7769
Noviembre	1.0507	1.0804	1.0793	0.4279	0.8354	0.9981	0.6938
Diciembre	0.7269	1.2250	0.9581	0.3089	0.7553	0.9097	0.6799

Tabla D.3: Índices de estacionalidad en la región R₃

Apéndice E

Nomenclatura

$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
ET	Evapotranspiración total
EVI	Índice de vegetación mejorado
kg m^{-2}	Kilogramos por metro cuadrado
m	Metros
M	Mensual
mm h^{-1}	Milímetro por hora
msnm	Metros sobre el nivel del mar
PBLH	Altura de la capa límite planetaria
Pp	Precipitación
R₁	Región 1
R₂	Región 2
R₃	Región 3
RA	Anomalía relativa
RBSG	Reserva de la Biosfera de la Sierra Gorda
RH	Humedad relativa
r_s	Índice de correlación de Pearson
SO₂	Dióxido de azufre
T	Temperatura
X_{clim}	Acumulado promedio mensual (2000 – 2024)
X_{mm}	Promedio mensual (2024)
X_{season}	Acumulado promedio trimestral (2000 – 2024)

Bibliografía

- [1] Giovanni. Last accessed 15 May 2025 <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
- [2] Google earth engine. Last accessed 09 May 2025 <https://earthengine.google.com/>.
- [3] La reserva de la biosfera sierra gorda cumple 20 años de su decreto | comisión nacional de Áreas naturales protegidas | gobierno | gob.mx.
- [4] Ready hysplit. Last accessed 20 Ago 2025 <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajasrc.pl>.
- [5] Reserva de la biósfera – grupo ecológico sierra gorda iap.
- [6] Theil-sen regression: Programming and understanding an outlier-resistant alternative to least squares | uva library.
- [7] Jacinto Arroyo Aliaga, Pedro Gurmendi Párraga, and Elizabeth Machuca Manrique. Efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de nieve de los glaciares centrales del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 05, 6 2015.
- [8] T. W. Ashenden. Effects of so₂ and no₂ pollution on transportation in phaseolus vulgaris l. *Environmental Pollution (1970)*, 18:45–50, 1 1979.
- [9] K. V. Athira, Eswar Rajasekaran, Gilles Boulet, Rahul Nigam, and Bimal K. Bhattacharya. Multiscale evaluation of three remote sensing-based evapotranspiration models across the humid to arid tropics: a study over india. *Hydrological Sciences Journal*, 70:2379–2400, 2025.
- [10] Bountouraby Balde and Cristina Vega-García. Estimación de emisiones de gei y sus trayectorias en grandes incendios forestales en cataluña, España. *Madera y Bosques*, 25:2521764, 9 2019.
- [11] Mónica Ballinas, Manuel Esperón-Rodríguez, and Víctor L. Barradas. Estimación de la evapotranspiración en la región montañosa central de Veracruz, México. *Bosque (Valdivia)*, 36:445–455, 2015.
- [12] Orfeu Bertolami and Frederico Francisco. Revista de ciência elementar alterações climáticas e o sistema terrestre. 2020.
- [13] Susanne Von Caemmerer and Neil Baker. The biology of transpiration. from guard cells to globe. *Plant Physiology*, 143:3, 2007.
- [14] Gabriela Helena Calvo. Estimación de la evapotranspiración a escala regional mediante teledetección satelital tesis de maestría presentada por para optar al grado académico de magíster en geomática.
- [15] L. Carretero. Estructura y productividad de la vegetación de estepa mediterránea semiárida en relación con la variabilidad climática: el sistema de ladera en rambla honda (almería). 2000.

- [16] Carlos Raúl Castañeda-Ibáñez, Héctor Flores-Magdaleno, Mario Martínez-Menes, Salvador Esparza-Govea, Demetrio Fernández-Reynoso, Víctor Prado-Hernández, Fermín Pascual-Ramírez, and México Ocampo. Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5:537–545, 9 2018.
- [17] Chung Te Chang, Su Fen Wang, Matthew A. Vadeboncoeur, and Teng Chiu Lin. Relating vegetation dynamics to temperature and precipitation at monthly and annual timescales in taiwan using modis vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 35:598–620, 2014.
- [18] Hristo Chervenkov and Kiril Slavov. Theil–sen estimator vs. ordinary least squares — trend analysis for selected etccdi climate indices. *Comptes Rendus de L’Academie Bulgare des Sciences*, 72:47–54, 2019.
- [19] Eduardo Chávez-Ramírez, Guillermo González-Cervantes, José Luis González-Barrios, Enrique Dzul-López, Ignacio Sánchez-Cohen, Armando López-Santos, and Jorge Armando Chávez-Simental. Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. *Tecnología y ciencias del agua*, 4:115–126, 2013.
- [20] Raciél Cruz-Elizalde, Norma Hernández-Camacho, Rubén Pineda-López, and Robert W. Jones. Anfibios y reptiles de la reserva de la biosfera sierra gorda de querétaro, méxico: riqueza de especies, estado de conservación y comparación con otras áreas naturales protegidas del centro de méxico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94:e945135–e945135, 10 2023.
- [21] María Florencia Degano and Raúl Eduardo Rivas. Evaluación de los productos de evapotranspiración disponibles en climate engine y del algoritmo support vector machine regression con datos nasa power. *Revista de geología aplicada a la ingeniería y al ambiente*, pages 55–66, 7 2023.
- [22] Rafael García, Carmen Delgado, Rubén Cejudo, Anahí Aguilera, Avto Gogichaishvili, and Francisco Bautista. The color of urban dust as an indicator of heavy metal pollution. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XXVI:3–15, 2020.
- [23] Linda H. Geiser, Heather Root, Robert J. Smith, Sarah E. Jovan, Larry St Clair, and Karen L. Dillman. Lichen-based critical loads for deposition of nitrogen and sulfur in us forests. *Environmental Pollution*, 291:118187, 12 2021.
- [24] Jonas Geldmann, Andrea Manica, Neil D. Burgess, Lauren Coad, and Andrew Balmford. A global-level assessment of the effectiveness of protected areas at resisting anthropogenic pressures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116:23209–23215, 11 2019.
- [25] Luis Fernando Garcés Giraldo and Marta Lucía Hernández Ángel. La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local.
- [26] Edward P. Glenn, Alfredo R. Huete, Pamela L. Nagler, Katherine K. Hirschboeck, and Paul Brown. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26:139–168, 2007.
- [27] Tingting Gong, Huimin Lei, Dawen Yang, Yang Jiao, and Hanbo Yang. Monitoring the variations of evapotranspiration due to land use/cover change in a semiarid shrubland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21:863–877, 2 2017.
- [28] Diódoro Granados-Sánchez, Georgina F. López-Ríos, and Miguel Ángel Sánchez-Hernández. Acid rain and forest ecosystems. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XVI:187–206, 12 2010.

- [29] Jan Hauke and Tomasz Kossowski. Comparison of values of pearson's and spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones Geographicae*, 30:87–93, 6 2011.
- [30] Catherine Hayer, Mike Burton, Catherine Hayer, and Mike Burton. Application of back trajectory modelling to tropomi so2 observations to retrieve sub-daily volcanic fluxes. *EGUGA*, page 17999, 3 2020.
- [31] Omar Javier Ramírez Hernández. Origen de masas de aire en cuatro ciudades de colombia mediante el modelo hysplit. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5:103, 5 2014.
- [32] Ana-Karen HUERTA-MENDOZA and Laura FISCHER. Sierra gorda biosphere reserve, querétaro, mexico: An example of sustainable tourism. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 12:766, 6 2021.
- [33] Travis E. Huxman, Bradford P. Wilcox, David D. Breshears, Russell L. Scott, Keirith A. Snyder, Eric E. Small, Kevin Hultine, William T. Pockman, and Robert B. Jackson. Ecohydrological implications of woody plant encroachment. *Ecology*, 86:308–319, 2 2005.
- [34] Leonardo Laipelt, Anderson Luis Ruhoff, Ayan Santos Fleischmann, Rafael Henrique Bloedow Kayser, Elisa de Mello Kich, Humberto Ribeiro da Rocha, and Christopher Michael Usher Neale. Assessment of an automated calibration of the sebal algorithm to estimate dry-season surface-energy partitioning in a forest–savanna transition in brazil. *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 1108*, 12:1108, 3 2020.
- [35] Hernández Lalinde, Juan Diego, Espinosa Castro, Chacón Rangel, José Gerardo, Toloza Sierra, Cristian Andrés, Arenas Torrado, Marilly Karina, Carrillo Sierra, Sandra Milena, Bermúdez Pirela, and Valmore José. Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de pearson: definición, propiedades y suposiciones. 2018.
- [36] Antonio Celso De Sousa Leite, Simone De, Paula Silva, Elane Menezes De Farias, and Josiclêda Domiciano Galvêncio. A importância da evapotranspiração para o monitoramento ambiental: uma comparação através das ferramentas sebal/metric e super na bacia hidrográfica do rio brígida, pernambuco. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 12:232–339, 12 2022.
- [37] O. B. Manrique, Yuribel Gallardo Ballat, Amaury Correa Santana, and S. B. García. El cambio climático y sus evidencias en las precipitaciones. 2015.
- [38] Matthew F. McCabe and Eric F. Wood. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 105:271–285, 12 2006.
- [39] V. Uriel Mora-Macías, Juan Gualberto Colli-Mull, Raúl Hernández-árciga, Laura Alfonsina Chang-Martínez, Juan Felipe Charre-Medellín, and Margarito Álvarez Jara. Diversidad herpetofaunística y uso de microhábitat en dos tipos de vegetación en la reserva de la biosfera sierra gorda de guanajuato, méxico. *Caldasia*, 46:179–193, 2023.
- [40] Salvador Chacón Moscoso and Susana Sanduvete Chaves. Orientaciones para la elaboración del trabajo fin de estudios en psicología y ciencias afines. análisis de datos: correlación de pearson. *Portal de Vídeo Didáctico de la Universidad de Sevilla*, 10 2022.
- [41] Taikan Oki and Shinjiro Kanae. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313:1068–1072, 8 2006.
- [42] Lia Ooi, Takakazu Matsuura, Shintaro Munemasa, Yoshiyuki Murata, Maki Katsuhara, Takashi Hirayama, and Izumi C. Mori. The mechanism of so₂-induced stomatal closure differs from o₃ and co₂ responses and is mediated by nonapoptotic cell death in guard cells. *Plant Cell and Environment*, 42:437–447, 2 2019.

- [43] Miguel A. Ortega-Huerta and A. T. Peterson. Modelling spatial patterns of biodiversity for conservation prioritization in north-eastern mexico. *Diversity and Distributions*, 10:39–54, 1 2004.
- [44] Rafael Palácios, Daniela Castagna, Luzinete Barbosa, Adilson P. Souza, Breno Imbiriba, Cornélio A. Zolin, Danielle Nassarden, Leilane Duarte, Fernando G. Morais, Marco A. Franco, Glauber Cirino, Paulo Kuhn, Giordani Sodr , Leone Curado, João Basso, S rgio Roberto de Paulo, and Thiago Rodrigues. Enso effects on the relationship between aerosols and evapotranspiration in the south of the amazon biome. *Environmental Research*, 250, 6 2024.
- [45] Ranulfo Paranhos, Dalson Britto Figueiredo Filho, Enivaldo Carvalho da Rocha, José Alexandre Da Silva Júnior, Jorge Alexandre Barbosa Neves, and Manoel Leonardo Wanderley Duarte Santos. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de pearson: o retorno. *Leviathan (São Paulo)*, page 66, 8 2014.
- [46] J. A. Pena, R. G. de Pena, V. C. Bowersox, and J. F. Takacs. So2 content in precipitation and its relationship with surface concentrations of so2 in the air. *Atmospheric Environment (1967)*, 16:1711–1715, 1 1982.
- [47] Pedro J. Pérez and Francesc Castellví. Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en cataluña. *Ingeniería del agua*, 9:59, 3 2002.
- [48] Carlos Carcausto Quispe and * Autor. Dinámica de la evapotranspiración en el área del lago titicaca y en la frecuencia e intensidad de los episodios de sequía en la región de puno 2023. *Revista de Investigaciones*, 13:13–25, 3 2024.
- [49] Axel Eduardo Rico-Sánchez, Andrea Sundermann, Eugenia López-López, Martin Jonatan Torres-Olvera, Sarah Ashley Mueller, and Phillip Joschka Haubrock. Biological diversity in protected areas: Not yet known but already threatened. *Global Ecology and Conservation*, 22:e01006, 6 2020.
- [50] Alfonso J. Rodriguez-Morales. [climate change, rainfall, society and disasters in latin america: relations and needs]. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 28:165–166, 2011.
- [51] Daira A. Rosales, Romina C. Ruscica, and Anna A. S rensson. Contribuci n de las componentes de la evapotranspiración a la interacción suelo-atmósfera en sudamérica. *Meteorologica*, 50:033–033, 4 2025.
- [52] Victor Manuel Gordillo Salinas, Hector Flores Magdaleno, Leonardo Tijerina Chavez, and Ramon Arteaga Ramirez. Estimacion de la evapotranspiracion utilizando un balance de energia e imagenes satelitales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5:143–155, 3 2014.
- [53] I. Schifter, C. González-Macías, A. Miranda, and E. López-Salinas. Air emissions assessment from offshore oil activities in sonda de campeche, mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 109:135–145, 10 2005.
- [54] Heike Schmidt and Arnon Karnieli. Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment. *Journal of Arid Environments*, 45:43–59, 5 2000.
- [55] R. A. Scriven and B. E.A. Fisher. The long range transport of airborne material and its removal by deposition and washout—ii. the effect of turbulent diffusion. *Atmospheric Environment (1967)*, 9:59–68, 1 1975.
- [56] Carlos Scuderi, Adolfo Villanueva, and David Da Motta Marques. Tasa diaria de evapotranspiración para una macr fita empleando variables meteorológicas. *Cuadernos del CURIHAM*, 17:43–58, 1 2011.

- [57] Pranab K. Sen and A. K. Md. Ehsanes Saleh. The theil–sen estimator in a measurement error perspective. pages 224–234, 2010.
- [58] SENER. Sener-mapa hidrocarburos. Last accessed 15 Oct 2025 <https://mapa-hidrocarburos.energia.gob.mx/>.
- [59] Angelica Simón. Vergonzoso: México cuarto lugar global de emisiones de dióxido de azufre y "quiere más greenpeace México, 8 2019.
- [60] P L Suresh and Kalidindi Narayana Raju. Study of test for significance of pearson’s correlation coefficient. *International Journal of Science and Research*.
- [61] Hitesh Thakur, Pushpendra Raghav, Mukesh Kumar, and Fitsume Wolkeba. Surface flux equilibrium theory-derived evapotranspiration estimate outperforms ecostress, modis, and ssebp products. *Geophysical Research Letters*, 52, 5 2025.
- [62] Kevin E. Trenberth, John T. Fasullo, and Jeffrey Kiehl. Earth’s global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90:311–323, 2009.
- [63] J. M. Valencia, C. E. García, and D. Montero. Vegetation anomalies associated with the enso phenomenon in the cauca river valley, colombia. *Revista de Teledetección*, 2017:89–99, 12 2017.
- [64] Edwin Martín Pino Vargas. Evaporación y evapotranspiración en hidrología: medición, estimación y aplicaciones. *Evaporación y evapotranspiración en hidrología: medición, estimación y aplicaciones*, 3 2021.
- [65] Azucena Pérez Vega, Fernando Rocha Álvarez, Fernando Rocha Álvarez, Héctor Hugo Regil García, and Héctor Hugo Regil García. Distribución espacial del uso/cubierta del suelo y degradación forestal en la reserva de la biosfera sierra gorda de guajuato. *Acta Universitaria*, 26:33–44, 1 2016.
- [66] Xueqin Wang and Qiqing Yu. Unbiasedness of the theil–sen estimator. *Journal of Nonparametric Statistics*, 17:685–695, 9 2005.
- [67] Zhenhua Wang, Chengzhang Wang, Bin Wang, Xin Wang, Jing Li, Jin Wu, and Lingli Liu. Interactive effects of air pollutants and atmospheric moisture stress on aspen growth and photosynthesis along an urban-rural gradient. *Environmental Pollution*, 260:114076, 5 2020.
- [68] Lyndsay T Wilson. Pearson product-moment correlation. 2018.
- [69] Anjaneyulu Yerramilli, Venkata Bhaskar Rao Dodla, Venkata Srinivas Challa, LaToya Myles, William R Pendergrass, Christoph A Vogel, Hari Prasad Dasari, Francis Tuluri, Julius M Baham, Robert L Hughes, Chuck Patrick, John H Young, Shelton J Swanier, Mark G Hardy, A Yerramilli, V B R Dodla, H P Dasari, F Tuluri, J M Baham, R L Hughes, C Patrick, J H Young, S J Swanier, M G Hardy, L Myles, W R Pendergrass, C A Vogel, and V S Challa. An integrated wrf/hysplit modeling approach for the assessment of pm 2.5 source regions over the mississippi gulf coast region. *Air Qual Atmos Health*, 5:401–412, 2012.
- [70] Qiaofeng Zhang, Liping Di, Guixiang Liu, Liying Guo, and Hongbo Yu. Remote-sensing-based analysis of spatiotemporal variation of et and related parameters in xilingol steppe, china. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30:2891–2904, 2021.
- [71] Meng Zhao, Geruo A, Yanlan Liu, and Alexandra G. Konings. Evapotranspiration frequently increases during droughts. *Nature Climate Change*, 12:1024–1030, 11 2022.
- [72] Yixuan Zhu, Zhoutao Zheng, Guang Zhao, Juntao Zhu, Bo Zhao, Yihan Sun, Jie Gao, and Yangjian Zhang. Evapotranspiration increase is more sensitive to vegetation greening than to vegetation type conversion in arid and semi-arid regions of china. *Global and Planetary Change*, 244, 1 2025.