



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

POSGRADO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

**“DEGRADACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE PROVISIÓN
HÍDRICA Y REGULACIÓN CLIMÁTICA EN LA ZONA NOROESTE DEL
ESTADO DE MÉXICO Y SUS POSIBLES IMPACTOS AL CAMBIO CLIMÁTICO”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

(ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

PRESENTA:

Marco Antonio Pérez Luna

Directora:

Dra. Fabiola S. Sosa Rodríguez

Co-director:

Dr. José Clemente Rueda Abad

Ciudad de México, 02 de febrero de 2026

Índice

Resumen	7
Abstract.....	7
Introducción.....	7
Pregunta de Investigación.....	11
Objetivo general.....	11
Objetivos particulares.	11
Hipótesis	11
Marco Teórico	11
Marco Metodológico.....	15
CAPITULOS	19
CAPÍTULO 1 SISTEMA COMPLEJO TIERRA.....	19
1.1 El ser humano	19
1.2.1 Hidrósfera	23
1.2.2 Biósfera.....	25
1.2.3 Litósfera.....	29
1.2.4 Atmósfera	32
1.3 Servicios Ecosistémicos (SE)	35
CAPÍTULO 2. PROBLEMÁTICA Y SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	40
2.1 Servicio ecosistémico de provisión hídrica	47
2.1.1 Balance Hídrico Superficial	48
2.2 SE de Regulación Climática	64
CAPÍTULO 3. CAMBIO CLIMÁTICO	68
3.1 Escenarios de cambio climático.....	72
3.2 Proyección RCP8.5 y servicios SE (provisión hídrica, regulación climática).	84
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	94
ANEXOS	97
FUENTES DE CONSULTA	102

LISTADO DE FIGURAS.

1	Instrumentos del IPCC.....	16
2	Ciclo del agua.....	23
3	Subsistema de la biosfera.....	26
4	Litósfera.....	30
5	Elementos y composición de la atmósfera.....	33
6	Ubicación geográfica del Estado de México.....	41
7	Subcuenca hidrológica.....	45
8	Ubicación de estaciones climáticas.....	49
9	Normales climáticas incompletas.....	51
10	Información generada a través del programa de cómputo RCLIMTOOL.....	51
11	Datos completos de precipitación por temporada.....	53
12	Resultado de la evapotranspiración por temporada.....	57
13	Resultado del cálculo de escurrimiento superficial por temporada.....	60
14	Resultado del cálculo de la infiltración por temporada.....	62
15	Resultado del balance hídrico superficial por temporada.....	62
16	Comportamiento de la temperatura mínima y máxima.....	65
17	Temperatura media anual.....	66
18	Proceso de reducción de sesgos.....	76
19	Script para descarga de información de modelos climáticos regionales.....	76
20	Ubicación de píxeles y de estaciones climáticas.....	76
21	Ciclo anual de precipitación y métricas de validación.....	78
22	Ciclo anual de temperatura y métricas de validación.....	78
23	Ciclo anual de precipitación, temperatura y datos observados.....	79
24	Script en MatLab.....	80
25	Resultado de la corrección de sesgos en el ciclo anual para la variable de precipitación y temperatura media.....	81
26	Resultado de la proyección de la precipitación y temperatura media al 2050.....	82
27	Proyección en percentiles de la precipitación al 2050.....	84
28	Proyección de percentiles de la temperatura media al 2050.....	85
29	Proyección de temperatura media al 2050.....	86
30	Proyección de la variable de evapotranspiración al 2050.....	89
31	Proyección del escurrimiento superficial al 2050.....	90
32	Proyección del proceso de infiltración al 2050.....	90
33	Balance hídrico proyectado al 2050 por temporadas.....	91

LISTADO DE TABLAS.

1	Municipios del noroeste del Estado de México.....	44
2	Estaciones climatológicas analizadas.....	50
3	Software para completar series climáticas.....	52
4	Resultado de la variable de precipitación de RCLIMTOOL.....	55

5	Variables necesarias para el cálculo de la evapotranspiración.....	57
6	Variables para calcular el factor K.....	60
7	Ecuaciones para el cálculo del coeficiente de escurrimiento anual.....	61
8	Instrumentos de cambio climático subnacionales.....	72
9	Modelos climáticos regionales (CORDEX).....	74
10	Sequía en el Estado de México.....	87
11	Comportamiento de la precipitación media proyectada al 2050.....	89
12	Resultados del BHS base y proyectado.....	92

Dedicada a:

A mis padres, hermana y hermanos, sin ustedes, no lo habría logrado.

Agradecimientos

Expreso mi reconocimiento a la clase trabajadora, cuyo esfuerzo colectivo, materializado a través de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), sentó las bases para que yo pudiera continuar con mi proceso formativo.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa, por abrirme sus puertas y permitirme realizar mi doctorado así mismo, agradezco a cada uno de sus departamentos y en especial a las y los servidores de tan noble institución por apoyarme en todos los trámites administrativos y demás requisitos establecidos en sus normas.

A mi asesora, la Dra. Fabiola S. Sosa Rodríguez, por su paciencia, apoyo y contribución a mi formación académica, también a mi asesor el Dr. José Clemente Rueda Abad quien por desgracia no vio culminada su colaboración pero que en donde quiera que este le envío mi más sincero agradecimiento.

A la Dra. Vanesa C. Pántano por su apoyo y bienvenida a un gran país y por compartir sus conocimientos y habilidades para hacer frente al cambio climático, a la Dra. Olga Penalba quien siempre estuvo presente y apoyó sin dudar, a mi formación académica, de verdad, gracias infinitas por todo su apoyo en mi estancia y en mi investigación.

Al Posgrado en Energía y Medio Ambiente por permitir que alumnos como yo, podamos continuar con nuestros estudios y a mis amistades que fueron parte medular para lograr este objetivo.

Resumen

La presente investigación, analiza la evolución de la percepción del ser humano sobre el medio ambiente desde un enfoque basado en la teoría de sistemas complejos, con la finalidad de conocer, de qué manera, el cambio climático afectaría dos servicios ecosistémicos clave para la dinámica estructural de la sociedad: la provisión hídrica y la regulación climática (Restrepo et. al., 2024). Para lo cual, usando modelos climáticos regionales y adaptando sus proyecciones a la climatología local, a través de la metodología de corrección de sesgos, se esperaría para el periodo del 2021-2050 una reducción de 0.58 mm/año, promedio de la precipitación media y un incremento de poco más de 5°C de la temperatura media con respecto a las variables climáticas actuales, este panorama agravaría la escasez hídrica y los eventos climatológicos extremos en la zona noroeste del Estado de México. Por lo que se concluye, la urgencia de implementar políticas integrales de gestión hídrica y adaptación climática a nivel subnacional con participación social y enfoque sostenible.

Abstract

This research analyzes the evolution of human perception of the environment from an approach based on the theory of complex systems, to understand how climate change would affect two key ecosystem services for the structural dynamics of society: water supply and climate regulation (Restrepo et. al., 2024). For which, using regional climate models and adapting their projections to local climatology, through the bias correction methodology, a moderate average reduction in average precipitation and an increase of just over 5°C in average temperature with respect to current climatic variables would be expected for the period 2021-2050, this scenario would aggravate water scarcity and extreme weather events in the northwestern part of the State of Mexico. Therefore, we conclude that it is urgent to implement comprehensive water management and climate adaptation policies with social participation and a sustainable approach.

Introducción

Una de las principales problemáticas sobre el cambio climático, se relaciona con las incertidumbres que representan los posibles impactos que sufriría el medio ambiente, en específico, aquellos relacionados con los servicios ecosistémicos (SE) de provisión hídrica y regulación climática; los cuales, suelen manifestarse a través del aumento sostenido de temperaturas, la modificación de los patrones de precipitación y la intensificación de fenómenos hidrometeorológicos extremos, con implicaciones directas sobre los sistemas naturales y sociales (IPCC, 2023).

En México, se estima un incremento de entre 0.7 °C y 1.9 °C en la temperatura media nacional desde mediados del siglo XX, con efectos particularmente marcados en las temporadas de estiaje y lluvias (Martínez-Austria & Jano-Pérez, 2021; Carrillo-Carrillo et al., 2025). Estos cambios han contribuido a una creciente presión sobre los ecosistemas que, al verse alterados

en su estructura y funcionalidad, pierden su capacidad de brindar servicios esenciales como la regulación térmica. Adicional a ello, el País enfrenta desafíos significativos en materia hídrica; más del 40 % de sus acuíferos se encuentran en condiciones de sobreexplotación, mientras que las proyecciones a mediano plazo advierten una disminución sustancial en la captación natural de agua (CONAGUA, 2023). Además, la frecuencia e intensidad de sequías se ha incrementado, afectando no solo la producción agrícola y al abastecimiento urbano, sino también la integridad de los ecosistemas que dependen de regímenes hídricos estables (Carrillo-Carrillo et al., 2025), alterando la captación, almacenamiento y distribución natural del agua (Teuling, 2024), poniendo en riesgo tanto su suministro como la estabilidad climática regional (Restrepo et al., 2024).

Bajo este contexto, se han identificado algunos de los posibles impactos que tendría el cambio climático sobre dichos SE y se han analizado en dos sentidos: **a) enfoque**, la regulación climática se analizó con base en la relación entre el calor y la atmósfera para determinar la variabilidad que pudiera presentarse con respecto a la provisión hídrica, lo cual se estimó a partir del cálculo del balance hídrico superficial; y **b) temporalidad**, este análisis se realizó en dos tiempos, el primero comprende el periodo de 1991-2020 como insumo base para proyectar la incidencia que podría tener el cambio climático sobre estos SE, y el segundo, se enfoca en el posible comportamiento que tendrían los elementos utilizados para analizar los dos SE bajo un escenario climático futuro comprendido en el periodo de 2021-2050. Dicha *temporalidad* fue definida con base en normales climáticas establecidas como estándares internacionales por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Bonilla-López, et al., 2025).

Este escenario se construyó a partir de la información de 10 modelos climáticos regionales (MCR) basados en una de las cuatro vías representativas de concentración (RCP, por sus siglas en inglés) que estableció el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) la cual es la RCP8.5. Aunque la generación de escenarios a partir de la RCP8.5, particularmente por su uso como escenario de referencia, suele percibirse como alarmista e irreal (Schwalm et. al., 2020; Hausfather & Peters, 2020), fue considerada en el presente trabajo, debido al valor analítico que representa frente a la evaluación de impactos extremos y no lineales del cambio climático, así como a la importancia que representa en la generación de análisis de resiliencia frente condiciones climática severas (Herger et. al, 2018).

Bajo el contexto de esta investigación, centrada en la caracterización de respuestas sistémicas no lineales, la RCP 8.5 nos permitió dinámicas que podrían no ser detectables bajo trayectorias de menor forzamiento (Lenton, 2023). En este sentido, el uso de la RCP8.5 se consideró bajo un enfoque metodológico deliberado para delimitar el espacio de posibles impactos máximos y brindar las bases para orientar la formulación de adaptación y mitigación robustas en contextos de alta incertidumbre climática.

La información de los MCR se obtuvo de la plataforma Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX), cuya finalidad es acercarnos a los posibles impactos con mayor severidad que podrían esperarse de incumplir con las metas establecidas en el Acuerdo de París y de los distintos mecanismos enfocados a la adaptación y mitigación del cambio climático.

Sin embargo, debido a las inconsistencias y errores que llegan a presentar estos MCR en zonas específicas del mundo, se empleó el método de corrección de sesgos con la finalidad de reducir la escala estadística con base en datos observados del periodo base, los cuales son calculados y utilizados para corregir las salidas del ensamble de los 10 MCR y de esta manera, los resultados, en teoría, sean más acordes a la climatología de la zona de estudio.

Para determinar la zona noroeste del Estado de México como el área de estudio, se consideraron variables como la población, el cambio y uso de suelo, la escasez del agua, los instrumentos municipales relacionados con temas que involucran acciones contra el cambio climático y su vulnerabilidad, así como la dependencia de la población hacia los SE de provisión hídrica y regulación climática.

Como resultado de dicho análisis, se calculó una precipitación media de 757.1 mm para la temporada de lluvias y de 153 mm para la temporada de estiaje, considerando el periodo base de 1991-2020, mientras que la temperatura media es 14.8°C para la temporada de lluvias y 13.9°C para la temporada de estiaje en el mismo periodo.

Una vez que se incorporan estos resultados a la proyección de las variables climáticas del escenario de cambio climático desarrollado para el periodo 2021-2050 a partir de los MCR, resultó en una posible disminución de la precipitación, mientras que la temperatura media alcanzaría un incremento de más de 5°C respecto al periodo base. Este posible escenario significaría un incremento en temas de escasez hídrica, periodos de sequías y eventos hidrometeorológicos extremos, entre otros.

A partir de la vinculación de los elementos y resultados mencionados anteriormente, y con la finalidad de proporcionar bases científicas referentes al posible impacto que tendría el cambio climático en los SE de provisión hídrica y regulación climática, la presente investigación se divide en tres capítulos.

En el primero, se aborda la conceptualización de la teoría de sistemas complejos representada por cuatro subsistemas integrados por procesos bioquímicos y físicos, que, al interactuar con la dinámica estructural de la sociedad, nos muestra una visión unificada del sistema tierra. Sin embargo, su alteración al interior debido a procesos emergentes nos plantea la urgencia de identificar elementos clave de reconfiguración del propio sistema con la finalidad de proporcionar los insumos científicos necesarios para diseñar y gestionar una serie de acciones que permitan la sostenibilidad del ser humano a través del análisis de dos de los servicios ecosistémicos básicos para la vida (provisión hídrica y regulación climática). En el segundo capítulo, se justifica la relevancia del área de estudio y se analizan las variables climáticas de precipitación y temperatura media, así como su vinculación con una serie de procesos que resulta en el comportamiento de cada uno de los SE en el periodo de 1991-2020. En el tercer capítulo, se muestra el análisis de las variables climáticas de precipitación y temperatura a partir de la información de 10 modelos climáticos regionales (MCR) basados en la vía representativa de concentración RCP8.5, los cuales se obtuvieron de la plataforma de CORDEX; con base en ello, se realizó un ensamble y se disminuyeron las inconsistencias que surgieron respecto a la información climática observada en el área de estudio, a través de la

metodología de corrección de sesgos. El resultado se añadió a las fórmulas empleadas en el análisis de los dos SE con la finalidad de conocer su posible comportamiento al 2050. Por último, se justifica la pertinencia de la presente investigación y se analiza el cumplimiento de sus objetivos en el apartado de discusión y conclusiones.

Cabe mencionar que, a pesar del creciente volumen de estudios sobre los posibles impactos del cambio climático en México, gran parte de la literatura se ha concentrado en análisis de carácter nacional o regional amplio, así como en evaluaciones sectoriales que privilegian variables climáticas aisladas o enfoques estrictamente hidrológicos. En el caso de los SE, los estudios existentes suelen abordar la provisión hídrica o la regulación climática de manera independiente, con escasa integración entre procesos biofísicos, dinámicas climáticas y escalas territoriales subnacionales.

Asimismo, los análisis prospectivos disponibles tienden a centrarse en escenarios de mitigación intermedia o en promedios regionales, lo que limita la comprensión de respuestas no lineales, impactos extremos y dinámicas de vulnerabilidad local, particularmente en regiones que ya enfrentan estrés hídrico, presión demográfica y cambio acelerados en el uso de suelo. Esta situación genera un vacío de conocimiento respecto a cómo el cambio climático podría incidir de manera integrada sobre SE estratégicos a escala subnacional, y cómo estas alteraciones podrían amplificar la vulnerabilidad socioambiental de territorios específicos.

Bajo este contexto, la zona del noroeste del Estado de México constituye un caso relevante de estudio debido a su alta dependencia de los SE ya mencionados, así como a la convergencia de presiones ambientales y socioeconómicas que incrementan su sensibilidad frente al cambio climático. Sin embargo, hasta el momento no se cuenta con evaluaciones prospectivas que integren escenarios de cambio climático regional, corrección de sesgos y análisis ecosistémico bajo un enfoque de sistemas complejos para esta región en específico.

De esta manera, la presente investigación busca atender este vacío, invitando a reflexionar sobre un futuro potencial en el que la inacción frente al cambio climático prevalezca. Con la finalidad de resaltar la importancia de diseñar estrategias e implementar acciones que establezcan la estructura jurídica necesaria para abordar esta problemática, promoviendo al mismo tiempo una participación más activa de la población.

Se requieren políticas locales centradas en la gestión integral del agua a corto, mediano y largo plazo, desde una perspectiva holística que permita a la sociedad y sus diversas estructuras sociales y económicas utilizar el recurso de manera sostenible, al tiempo que se proteja la capacidad natural de adaptación y resiliencia de los ecosistemas.

Pregunta de Investigación.

¿En qué medida el cambio climático, bajo un escenario climático extremo, incidirá en los servicios ecosistémicos estratégicos de provisión hídrica y regulación climática en la zona noroeste del Estado de México?

Objetivo general.

Elaborar una evaluación prospectiva del impacto del cambio climático sobre los servicios ecosistémicos de provisión hídrica y regulación climática en el noroeste del Estado de México.

Objetivos particulares.

- Caracterizar los servicios ecosistémicos de provisión hídrica y regulación climática de la zona de estudio.
- Identificar la evolución de los servicios ecosistémicos en la zona de estudio (en concordancia a las normales climáticas establecidas por el OMM).
- Comprender cómo se relaciona la vulnerabilidad socioambiental con los servicios ecosistémicos y en qué medida el cambio climático podría afectar esta relación a partir de una visión de sistemas complejos.
- Analizar cuáles son los posibles impactos del cambio climático en la zona de estudio a partir de la generación de escenarios basados en la RCP8.5.
- Investigar sobre la problemática del cambio climático, sus posibles impactos y mecanismos de adaptación y mitigación.
- Conocer el marco jurídico internacional y las principales acciones realizadas por el Gobierno Federal, Estatal y Local en materia de adaptación estatal al cambio climático.

Hipótesis

Bajo un escenario de cambio climático extremo (RCP8.5), los cambios proyectados en la precipitación y temperatura media dentro de la zona del noroeste del Estado de México afectarán de manera significativa la dinámica de los servicios ecosistémicos de provisión hídrica y regulación climática durante el periodo 2021-2050, en comparación con el periodo base 1911-2020.

Marco Teórico

La presente investigación se enmarca en una línea de análisis que parte del reconocimiento de la interrelación entre el cambio climático y los procesos naturales responsables de la provisión

de servicios ecosistémicos, particularmente aquellos relacionados con la provisión hídrica y regulación climática en la zona noroeste del Estado de México.

Para entender la complejidad de esta relación, hemos basado el presente estudio en una serie de visiones que buscan explicar este tipo de fenómenos a través de patrones, perspectivas y percepciones que han evolucionado, a la par en que se transforma el entorno y comienzan a interactuar elementos emergentes para alterar una realidad establecida en un momento y tiempo determinados. Pero no solo desde un aspecto epistemológico extremo, como se plantea en el positivismo lógico (Hahn et. al, 1978), el cual considera la relación entre distintos factores dimensionados desde diversas disciplinas que podrían, o no, incidir en la comprensión de estructuras, elementos y relaciones de ciertos eventos; sino desde un enfoque más antropocentrista (Narváez, 2025), en donde el ser humano se observa como el centro de todo y que, con la finalidad de satisfacer sus necesidades más allá de lo comprendido, ha alterado su entorno y ha generado una serie de problemáticas a partir de ello.

En este sentido, se percibe a la sociedad como un sistema que se relaciona mediante una serie de pautas, de valores comunes dentro de una estructura centrada, cuya finalidad se basa en la satisfacción de necesidades internalizadas de cada uno de sus actores (Parsons, Caballero & Castillo, 1968), llegando a un punto de convergencia en el que se produce una transformación (Luhmann, 1998), así como una integración sistémica que permite una estabilización transitoria entre diversos momentos (Giddens, 2006). La interacción de esta estructura social con la materia y energía del universo que representa la naturaleza y las reacciones químicas, biofísicas y estructurales que se generan al interior de la misma, crea una serie de procesos emergentes; en donde se consideran entradas, salidas, almacenamientos y transformaciones como condiciones de continuidad y conservación dentro de los subsistemas que comienzan a formarse, los cuales convergen y operan a través de fuerzas y procesos de selección y con distintas tasas de renovación, cuya ocupación relativa del espacio (grado de subdivisión y diversidad), seguirá cierta regularidad (Margalef, 2002). Dicho estado, uniforme y de termodinámica irreversible, aunado a la estática (el mantenimiento del sistema en un estado independiente del tiempo) y dinámica (los cambios en el sistema con el tiempo), permitirá continuos procesos de evolución hacia diferenciaciones siempre crecientes (Bertalanffy, 1968).

El efecto de la interacción de estas dos estructuras (social y ambiental) y las relaciones que se gestan en su interior, permiten situar esta investigación bajo la Teoría de Sistemas Complejos (TSC), la cual se basa en una formulación teórico-conceptual, en donde se consideran una serie de principios generales sobre la composición, dinámica y evolución de un sistema, así como una metodología interdisciplinar y una fundamentación basada en la construcción del conocimiento (Becerra, 2020).

En este contexto, actualmente se observa un desgaste entre las fronteras de ambas estructuras creando un entramado socionatural que ha sido denominado como la era del “Antropoceno”,

concebido como la crisis global de los ecosistemas, debido al impacto que representa la acción humana sobre el planeta (Figueras & Torrents, 2022), por ejemplo, en el caso de los SE entendidos como *“aquellas condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales, y las especies que los componen, sostienen y realizan la vida humana”* (Daily, 1997); estos componentes que se consumen directamente, se disfrutan o contribuyen a generar condiciones adecuadas para el bienestar del ser humano (Balvanera, 2012) se han visto alterados por actividades como la pérdida y degradación del hábitat, la sobreexplotación y uso insostenible de la biodiversidad, factores sociopolíticos y culturales, incremento en la población y en actividades económicas, mala planeación y mal manejo del capital natural, entre otros (GIZ, 2012). Mermando cada uno de los cuatro grupos en que son clasificados (abastecimiento, regulación, apoyo y culturales).

En el caso específico de esta investigación, se analizará la influencia determinante de la conducta humana sobre los componentes que influyen sobre el cambio climático (Steffen et al., 2011) y, a su vez, el impacto que este tendría sobre los SE de provisión hídrica y regulación climática.

Para ello, se han establecido una serie de acciones que se dividen en dos aspectos. El primero tiene que ver con la visión científica caracterizada por la recopilación de información por parte de la OMM sobre las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera y su relación con el aumento de temperatura sobre el planeta en las décadas de 1950 a 1980 (Dlugokencky et al., 2010), estableciéndose el sistema mundial de observación de ozono en 1957, dedicado a medir el ozono atmosférico total (Barlasina, et. al, 2019). Adicionalmente, a finales de los años sesenta, la OMM crea la Red de Estaciones de Control de la Contaminación General Atmosférica (BAPMoN), la cual analizó las concentraciones químicas de precipitación y recopilaba información sobre las medidas de aerosoles y de dióxido de carbono en la atmósfera (Koehler, 1980). Para la década de los setenta, la información recabada por estas instituciones y la generada por la comunidad científica brindó los argumentos necesarios para determinar tres problemáticas mundiales para ese entonces: 1) la amenaza de los clorofluorocarbonos, 2) la acidificación de lagos y bosques de América del Norte y Europa, y 3) el posible calentamiento global provocado por el incremento de Gases Efecto Invernadero (GEI). Una de las acciones para hacerles frente fue la creación del actual Programa de Vigilancia de la Atmósfera Global en 1989 por la OMM (Cuevas & Redondas, 2020), así como metodologías e iniciativas de organismos internacionales como la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES), que buscan integrar el análisis de los SE en la toma de decisiones, promoviendo un desarrollo sostenible en la valorización responsable de los servicios naturales, sin comprometer el bienestar de las generaciones futuras (Constanza et. al., 1997).

El segundo aspecto se enfocó en la gestión de acciones en materia de política que buscaban hacer frente a las problemáticas detectadas por la comunidad científica, tal fue el caso de la

Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano en 1972 constituyéndose como la primer reunión internacional en el que se pusieron de manifiesto, el impacto socioeconómico del deterioro ambiental, además de considerarse como el parteaguas al incorporar temas ambientales en la agenda internacional (UN, 1972). En 1979, y con la finalidad de comprender las variaciones del sistema climático global, la OMM llevó a cabo la primer Conferencia Mundial sobre el Clima en donde por primera vez se clasificó para el cambio climático como una amenaza real a nivel planetario (Aguirre, Ojeda & Eguiguren, 2010), resultado de ello, se creó el Programa Mundial sobre el Clima en 1980.

De esta manera se comienzan a tratar temas globales como la destrucción de la capa de ozono estratosférico y el calentamiento de la atmósfera en reuniones internacionales, como fue el caso de “la Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono” celebrada en 1985, donde los países parte de las Naciones Unidas se comprometieron en adoptar medidas enfocadas en la protección de la salud humana y el medio ambiente contra los efectos adversos resultantes de la alteración en la composición de la atmósfera (Sabogal, 1998).

En 1987 surge el Protocolo de Montreal para el control de sustancias agotadoras de la capa de ozono. Los compromisos adoptados en estos dos últimos eventos son de suma importancia, ya que a partir de los mecanismos y procedimientos que se implementaron, se moldeó el marco jurídico internacional sobre cambio climático (Sarmiento, 2019), brindando los elementos necesarios para la creación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en 1988, formado por científicos expertos en la materia y dirigido por dos agencias especializadas, la OMM y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

El objetivo del IPCC es analizar la información disponible sobre la ciencia y diversidad de problemas económicos, sociales y ambientales relacionados con el cambio climático a partir de lo cual, elabora informes objetivos sobre la evidencia científica disponible en la tierra (Agrawala, 1998). Para 1990, se presenta su primer informe, confirmando de una vez por todas, la existencia del cambio climático (Zhang, Zwiers & Peterson, 2008). Para ese mismo año se propone la creación de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, misma que se presentó hasta 1992 en la Cumbre de Rio de Janeiro. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), se centra en la estabilización de los GEI en la atmósfera a un nivel en el que se prevendrá la interferencia antropogénica sobre el sistema climático global (CMNUCC, 1992).

Derivada de la CMNUCC se crea la Conferencia de las Partes (COP), como órgano supremo de la convención, siendo su primera reunión en 1995 en Berlín, en la que se rescata la iniciativa de crear un instrumento que contuviera obligaciones concretas de limitación y reducción de emisiones de GEI para después del año 2000 (Lanchbery & Víctor 1995). A partir de ese entonces, se han llevado a cabo 29 reuniones de partes en donde resaltan instrumentos como el del “Protocolo de Kioto”, el Acuerdo de París y una serie de mecanismos e instrumentos

financieros, políticos y científicos que han moldeado el entorno, bajo el cual, se han diseñado e implementando acciones de mitigación y adaptación para hacer frente al cambio climático, a través de una serie de metodologías que por un lado han buscado proyectar su comportamiento, para que en una segunda instancia, se diseñen estrategias enfocadas a su mitigación y adaptación.

Bajo este contexto, el presente trabajo de investigación tomará como base el escenario generado a partir de la RCP8.5 que estableció el IPCC en su quinto informe (Pachauri, 2014), con la finalidad de explorar riesgos extremos en dos recursos fundamentales para el desarrollo de la zona de estudio.

Marco Metodológico

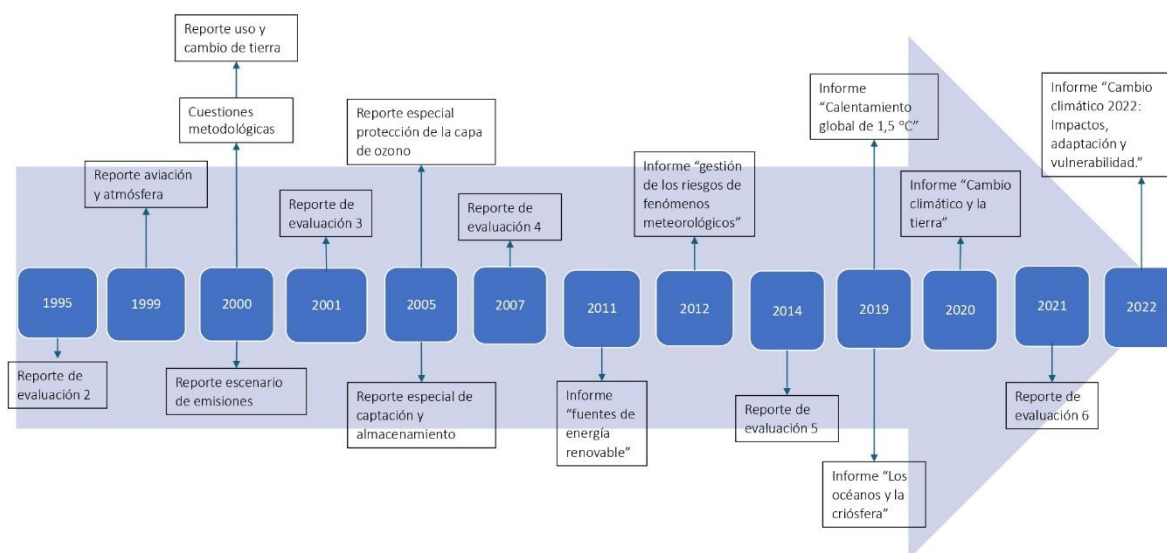
La presente investigación adopta el enfoque de la teoría de sistemas complejos concatenando una serie de aspectos técnicos y conceptuales que permiten entender de qué manera el cambio climático podría afectar los elementos y/o procesos que interactúan para proveer los SE de provisión hídrica y regulación climática. Entendiendo a los sistemas socio-ecológicos como sistemas dinámicos, caracterizados por interacciones no lineales, retroalimentaciones y dependencias espaciales y temporales entre sus componentes (García, 2020). Desde esta perspectiva, los SE no se conciben como variables independientes, sino como procesos emergentes que resultan de la interacción entre las condiciones climáticas, las características biofísicas del territorio y su variabilidad temporal.

La operacionalización de este enfoque se refleja en el diseño metodológico del estudio a través de la integración de modelos climáticos regionales, la corrección de sesgos y el análisis de cada uno de los SE a partir del comportamiento específicamente de la precipitación y temperatura media, reconociendo que la alteración en alguna de estas variables puede generar respuestas diferenciadas y no proporcionales en otros procesos (IPCC, 2021). Este enfoque es consistente con la teoría de sistemas complejos, ya que permite identificar como perturbaciones climáticas simultáneas influyen en la dinámica general del sistema, más allá de la evaluación de alguno de sus componentes individuales.

Dicho análisis prospectivo bajo un escenario de cambio climático extremo (RCP8.5) responde a la necesidad de explorar el comportamiento del sistema fuera de las condiciones históricas de referencia, lo cual resulta congruente con la aproximación sistémica al considerar posibles cambios en la magnitud y dirección de las respuestas del sistema ante forzamientos climáticos intensificados.

Considerando dicho marco, se realizó una revisión de las distintas herramientas y posibles escenarios de cambio climático proporcionados por el IPCC (Fig. 1) como principal órgano experto en la materia.

Figura 1. Instrumentos del IPCC.



Fuente: Elaboración propia.

En donde encontramos herramientas técnicas que van desde el análisis del ciclo mundial de carbono, su evolución y relación con la atmósfera y el cambio climático; mecanismos de captura y absorción de GEI; hasta aspectos generales que incluyen los cambios del clima observados y los efectos del cambio climático sobre sistemas naturales y la sociedad humana. Se identificaron sus causas y opciones de respuesta (mitigación y adaptación en sectores estratégicos) a partir de las proyecciones y futuros impactos (con base en el análisis de modelos climáticos), cuya base metodológica se localiza en el reporte técnico del Grupo de trabajo I (bases físicas) elaborado en el marco del Quinto Informe del IPCC, y, por último, el Sexto Informe en donde se denotan los impactos y riesgos climáticos sobre las personas y ecosistemas.

En dichos informes, se observa la complejidad de elaboración de los modelos climáticos actuales creados con base en un conjunto de escenarios de forzamientos antropógenos, resultando en las trayectorias de concentración representativas (RCP's), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo (FR, por sus siglas en inglés) total en el año 2100 con relación al año 1750, esto es, 2.6 W m^{-2} , para el caso del escenario RCP2.6; 4.5 W m^{-2} , para el caso del escenario RCP4.5; 6.0 W m^{-2} , en escenario RCP6.0, y 8.5 W m^{-2} , en el escenario RCP8.5 (Barlasina, Carbajal, & Condori, 2021).

A partir de lo cual se espera que el FR mantenga una tendencia decreciente hacia el 2100 esperando alcanzar 421 ppm, es decir, se alcanza un máximo y después disminuye; la RCP 4.5 cuyo FR mantenga una tendencia estable hacia el 2100 y alcanzar las 538 ppm y las RCP6.0 y RCP8.5 en las cuales el FR mantendría una tendencia creciente hacia el 2100 alcanzando las 936 ppm (Barlasina, Carbajal, & Condori, 2021).

Resultando en un incremento de temperatura que iría de 0.3°C a 1.7°C (RCP 2.6), de 1.1°C a 2.6°C (RCP4.5), de 1.4°C a 3.1°C (RCP6.0), y de 2.6°C a 4.8°C (RCP8.5). Sin embargo, esta tendencia puede verse alterada debido a que, según datos de la Red VAG de la OMM se muestra que los promedios mundiales de ppm de los tres principales GEI que contribuyen al cambio climático (CO₂, CH₄ y N₂O) han alcanzado niveles máximos al 2019, registrando 410.5 ± 0.2 ppm, 1.877 ± 2 ppb y 332.0 ± 0.1 ppb en la concentración de CO₂, CH₄ y N₂O respectivamente. Esos valores corresponden al 148%, el 260% y el 123% de los niveles preindustriales de los tres GEI (Barlasina, Carbajal, & Condori, 2021).

Con base en la actual tendencia, respecto al incremento en las emisiones de GEI a nivel mundial, bajo un supuesto de inacción y/o fracaso de los objetivos planteados en el Acuerdo de París y los alcances esperados en los diversos mecanismos de mitigación y adaptación nacionales, se ha considerado realizar la presente investigación tomando como base la RCP 8.5 con la finalidad de explorar riesgos extremos.

Para determinar la temporalidad del estudio, consideramos el periodo de 1991-2020 con base en las normales climáticas (30 años) establecidas por la OMM, (WMO, 2018). Para analizar los procesos que interactúan en la generación de los servicios ecosistémicos de estudio; nos basamos en la generación de un balance hídrico medio de la zona de estudio, considerando únicamente el aspecto superficial, lo cual representaría del SE de provisión hídrica; se estableció de esta manera después de considerar estudios similares: como el de la Sociedad Geográfica de Lima (Ordoñez, 2011) que determinó el método y las variables necesarias para calcular el balance hídrico superficial en toda la región; el de García (2013), quien evaluó las zonas prioritarias de servicios ecológicos relacionados con el agua en Veracruz (México); y el estudio de Córdoba (2011) que calculó la precipitación media en la cuenca del río Quito, en el Departamento del Chocó, Perú; dicho balance, únicamente superficial, se realizó con base en la siguiente ecuación (ec. 1):

$$BH = Pm - ETr = Esc + Inf \quad (1)$$

Donde:

BH se refiere al Balance Hídrico

Pm a la Precipitación media,

ETr a la Evapotranspiración,

Esc a la Escorrentía superficial, e

Inf a la Infiltración de agua.

En el caso del SE de la regulación climática, entendida como “la capacidad de los ecosistemas para moderar las condiciones climáticas a distintas escales espaciales y temporales, a través de procesos biofísicos que influyen en la temperatura, humedad y los flujos de energía entre

la superficie terrestre y la atmósfera” (IPBES, 2019), aunque estos procesos comprenden distintas interacciones, su análisis empírico requiere una delimitación operativa acorde a los objetivos, escala y disponibilidad de información del estudio, por lo que se considerará a partir de la relación entre el calor y la atmósfera para determinar la variabilidad. De esta manera se adoptará a la temperatura media como proxy principal del SE de regulación climática, en tanto constituye una variable integradora que refleja de manera indirecta la interacción entre procesos ecosistémicos y forzamientos climáticos, permitiendo evaluar tendencias y magnitudes de cambio relevantes a escala subnacional.

El análisis de estos dos SE se realizó con base en la RCP8.5 de manera exploratoria, cuyo propósito no es establecer una proyección probabilística del futuro, sino analizar el comportamiento de los SE bajo condiciones de forzamiento climático elevado. Dicho enfoque es consistente en estudios orientados a la evaluación de impactos potenciales y a la identificación de respuestas del sistema ante escenarios de alta presión climática, particularmente en regiones con alta sensibilidad ambiental y limitaciones hídricas. Sí bien, diversos trabajos (Hausfater & Peters, 2020; Orozco et. al., 2018; Ruíz-Corral et. al., 2016) han señalado que el escenario bajo la RCP8.5 no debe interpretarse como una trayectoria de emisiones “más probable”, su uso sigue siendo metodológicamente válido como un escenario de referencia para explorar impactos extremos y respuestas no lineales de los sistemas, permitiendo evaluar umbrales de cambio y magnitudes de impacto que podrían no ser evidentes bajo escenarios de mitigación intermedia (IPCC, 2021).

De esta manera, el uso del escenario RCP8.5 en esta investigación se justifica como una herramienta analítica para la evaluación prospectiva de impactos potenciales, contribuyendo a la mejor comprensión de los riesgos climáticos asociados a los SE.

Para ello, se llevó a cabo con base en la creación de un ensamble de 10 modelos climáticos regionales (MCR) obtenidos del proyecto Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX), el cual se comparó con datos climáticos observados de la zona de estudio. El resultado se trató con base en la metodología de reducción de sesgos, que permite minimizar el efecto de incertidumbre de los MCR y obtener proyecciones que se asemejen al comportamiento de los datos observados para las variables de precipitación y temperatura locales (Amblar-Francés, Ramos-Calzado, & Pastor, 2018); este método se basa en el análisis de la distribución de los datos observados de las variables en las que realiza un ajuste de distribución de probabilidad empírica en relación a los valores proyectados, en donde el resultado es incorporado al periodo que va del 2021 al 2051 (futuro cercano), para que, de esta forma, las simulaciones sean corregidas (Coles, 2001), con lo que podremos acercarnos a un escenario climático más local. Este resultado fue añadido y proyectado al ejercicio del balance hídrico superficial y al análisis de temperatura con la finalidad de conocer su posible comportamiento para el año 2050.

CAPITULOS

Este capítulo presenta un marco conceptual sobre el funcionamiento de los principales sistemas naturales de la Tierra, desde una perspectiva sistémica, con el fin de establecer las bases teóricas necesarias para comprender las interacciones climáticas y ecosistémicas analizadas en el presente trabajo de investigación. La revisión se enfoca en aquellos procesos y relaciones que resultan relevantes para el análisis del cambio climático y sus efectos sobre los SE, evitando una descripción exhaustiva de cada sistema de manera aislada.

CAPÍTULO 1 SISTEMA COMPLEJO TIERRA

A través del tiempo, el ser humano y los ecosistemas han mantenido un estrecho vínculo derivado de relaciones complejas que se establecen entre diversos elementos independientes pero interconectados que se autoorganizan a través de la energía y materia que absorben y que, a su vez, generan nuevas estructuras que incrementan su eficiencia e independencia hacia el mismo entorno (Pérez-Ruzafa & Pérez-Marcos, 2021). Sin embargo, pareciera que estas relaciones han llegado a un punto de inflexión en el que, ese lento y aparentemente intemporal trasfondo del medio natural, se transforma a tal velocidad que pareciera que solo puede resultar en catástrofe (Chakrabarty, 2009). Debido, principalmente a las acciones del ser humano, ya que ha pasado, de ser un simple agente biológico, a fuerza de transformación (Muntadas & Torrents, 2022).

Un ejemplo de ello, se observa en el incremento de emisiones antropógenas de gases efecto invernadero (GEI), específicamente el dióxido de carbono, que tan solo en el periodo de 1750 al 2011 se contabilizaron un total de $2\,040 \pm 310$ GtCO₂ acumuladas; cerca del 40% de este total han permanecido en la atmósfera (880 ± 35 GtCO₂), y el resto han sido removidas y almacenadas en la tierra (en plantas y suelos) y en el océano (IPCC, 2014), resultando en problemáticas como la acidificación y disminución de oxígeno del mar, el agotamiento de sumideros de carbono, el aceleramiento en los procesos de desertificación; pero sobre todo, ha alterado la composición química de la atmósfera, repercutiendo en la variabilidad de la temperatura ambiental terrestre y marina (Riosmena, 2021). Lo anterior, ha impactado en los servicios ecosistémicos estratégicos de que depende el ser humano para subsistir.

En este sentido, el presente capítulo busca explicar algunos parámetros e ideologías que han influido en la percepción y perspectiva del ser humano sobre el ambiente como un recurso infinito, y el impacto que esto ha representado sobre los elementos que conforman los subsistemas naturales de hidrósfera, biósfera, atmósfera y litósfera; alterando el comportamiento de los SE de provisión hídrica y regulación climática e incrementando la vulnerabilidad socioambiental de la sociedad.

1.1 El ser humano

La continuidad en la dinámica socioeconómica del ser humano ha evolucionado a través de la degradación y desestructuración de energía y materia que la contienen, a partir de lo cual, es

imposible generar flujos de resistencia que dejen de crear trabajo para limitar la dinámica social derivada del sistema económico actual y su funcionamiento (Pérez-Ruzafa, Marcos, & Pérez-Marcos, 2021). Aunque en la actualidad se está trabajando en el diseño, implementación y gestión de acciones enfocadas en disminuir el impacto sobre la degradación ambiental y el incremento en todo tipo de contaminación resultante de nuestro actuar diario, pareciera que estamos perdiendo la batalla. Para lograr generar un cambio significativo, tendríamos que regresar el tiempo e intervenir sobre la percepción equivocada del ser humano sobre el manejo de su entorno, al considerar que los recursos naturales eran infinitos (Duval & Benedetti, 2019).

Esta perspectiva derivó del incremento poblacional y su relación con el consumo y las distintas actividades económicas que surgieron a partir de ello, lo cual comenzó a tomar fuerza durante el S. XVII con el auge del mercantilismo, en donde se mantenía la idea de que el ambiente era un recurso infinito mediante el cual se podía generar riqueza y comodidades más allá de la satisfacción de necesidades básicas (Rocha, 1999).

Ideas que influyeron en la visión sobre el desarrollo de algunos autores como Adam Smith, quien consideraba que el incremento poblacional ayudaba al desarrollo comercial, debido a que la demanda de mano de obra era la base de la productividad de la tierra (Rocha, 1999). En contraste Marx, desde una postura crítica del sistema capitalista, sostenía que este se basa en la utilización del trabajo de la clase obrera para la generación de beneficios, impulsado por la innovación y tecnología, lo que conlleva a una maximización de la explotación, tanto del trabajo como de los recursos naturales (Marx, 1867).

Frente a estas y otras corrientes que surgían sobre la relación entre ambiente y sociedad, se inició un interesante debate sobre los posibles problemas que se podrían generar a través de la sobreexplotación de los recursos naturales; tal fue el caso de la teoría de la población de Thomas Robert Malthus, en donde mencionaba que en algún momento el incremento de la población podría dificultar el acceso a ciertos alimentos (Cohen, 1992); su argumento se basaba en la lógica de que la población crece cuando existen medios de subsistencia, pero cuando estos escasean, se incrementan problemáticas como la pobreza.

Ante esta postura, surgía la idea de poner en manos de la innovación y tecnología nuestro futuro, tal y como lo mencionó John Stuart Mill, quien justificaba que en caso de que dichos problemas sociales aparecieran, se buscaría que la productividad rebasara el crecimiento de la población como una gran solución (Kerschner, 2008); pensamiento complementario con la perspectiva de Durkheim, que hacía énfasis en la especialización de cada individuo como resultado de la competencia por los recursos de que dispone la sociedad, lo que a largo plazo, representaría un beneficio para toda la población (Llanos, 2016). Dichas ideas, podrían inscribirse dentro de una corriente de pensamiento más amplia representada por Spencer (1896) y su teoría del progreso, en donde el desarrollo social y económico se concibe como

un proceso competitivo que legitima la dominación de la sociedad sobre la naturaleza, una visión ampliamente aceptada por los industriales y funcional al sistema capitalista.

En cualquiera de los casos, estos argumentos cosificaban los recursos naturales, ya que se creía que podrían ser sustituidos o manejados de una manera tal, que el progreso fuera una constante que mantendría al ser humano en condiciones adecuadas para subsistir de una manera digna (Centeno, 2018). En este sentido, se anteponía el desarrollo y el bienestar materialista sobre lo ambiental con la finalidad de seguir acumulando capital; sin embargo, a principios de la década de 1950, surge un movimiento social interesante que busca advertir del impacto negativo de la contaminación sobre los ecosistemas y la degradación de la biodiversidad, el cual se refleja en una serie de publicaciones científicas como fue en su momento “El mar a nuestro alrededor” de Carson R. en 1951, donde se hablaba de la contaminación sobre el océano (Pauly, Watson & Alder, 2005) o “la primavera silenciosa” de Rachel Louise Carson en 1962, donde se pone de manifiesto el impacto de los productos químicos agrotóxicos y su impacto sobre la naturaleza (Falla, et. al, 2021) y la publicación “Antes que la naturaleza muera” de Jean Dorst en 1972, quien narra la destrucción de la naturaleza por el hombre y los impactos que esto ocasiona (Dorst, 1987); estos escritos comienzan a dar cuenta de lo que se avecinaba en el plano ambiental, generando así, gran impacto sobre la población mundial.

Frente a este panorama, la comunidad científica ha buscado explicar la correlación entre lo ambiental y social con la finalidad de lograr acciones que resulten en un equilibrio entre estas dos esferas, a través de la suma de variables que tuvieran una visión más allá de las que se relacionan con el crecimiento económico y el incremento de capital. Una de las opciones que surgieron, fueron las ciencias de la complejidad, las cuales perciben enfoques como el del pensamiento sistémico, complejo, ecológico y algunos enfoques holistas, bajo los cuales se pueden observar semejanzas dentro de sus estructuras a partir de principios como: síntesis y potencial integrativo, la integración de visiones inter y transdisciplinarias, el no equilibrio y la complejidad creciente, el tiempo, la no linealidad de la realidad y la incertidumbre, la capacidad autoorganizativa de los sistemas y el surgimiento de lo emergente (Maldonado, 2015).

Esta corriente abre la posibilidad de vincular aproximaciones diversas para un mejor entendimiento de los fenómenos estudiados, en donde la articulación biocultural del conocimiento y el enfoque de la complejidad se opone a la visión reduccionista disciplinar del conocimiento, dando paso a una nueva visión de la realidad capaz de autoorganizarse y autoproducirse, permitiendo el tránsito entre el orden y el desorden (González, 2018).

La noción de la complejidad, remite a un sistema compuesto por elementos heterogéneos vinculados entre sí, de manera orgánica, en constante proceso de transformación, como lo explicó Bertalanffy (1950), quien consideraba que los elementos que se encuentran en el ambiente están relacionados de una manera similar, a los componentes de una célula.

Pero, para que puedan ser definidos como tal, deberán cumplir con ciertas características: primero, el evento que se estuviese analizando deberá ser clasificado como artificial, natural, social, temporal, adaptativo, estable, no estable, probabilístico y determinativo; dentro de él deberán existir subsistemas cuyos elementos sean relacionados entre sí, pero que a la vez formen parte de un sistema o sistema mayor, dentro de un ambiente que influirá sobre el comportamiento del propio sistema con elementos de entrada y salida presentes, y que sean retroalimentados (Arnold, 1998); lo anterior, haciendo alusión a que las características constitutivas de cualquiera de los elementos que lo conforman, no pueden explicarse por las características de sus mismas partes.

Bajo esta visión de complejidad, la sociedad puede ser entendida como un sistema conformado por diversas corrientes epistemológicas y de pensamiento. Desde el funcionalismo, Parsons (1999) plantea que la sociedad es un sistema abierto que se articula a partir de pautas y valores compartidos dentro de una estructura orientada a la satisfacción de necesidades socialmente internalizadas. Esta perspectiva sistémica se ve reforzada por los aportes de Luhmann, (1998), quien concibe a la sociedad como un sistema autopoietico que se diferencia de su entorno, se transforma internamente y se reproduce a partir de sus propias operaciones. No obstante, para abordar dimensiones como la percepción de los actores y sus procesos de cambio, resulta más pertinente la teoría del estructuralismo de Giddens, (2006), la cual se distancia del estructural-funcionalismo al proponer una relación recursiva entre estructura y acción social.

En conjunto, estas visiones nos muestran la complejidad derivada de la estructura de la sociedad y su constante dinamismo entre los distintos elementos y procesos que la conforman, en específico, el ser humano quien a través de su percepción sobre el medio ambiente y las distintas ideas enrutadas a un desarrollo económico basado en la sobreexplotación de los componentes que conforman los subsistemas del sistema Tierra (hidrosfera, biosfera, litosfera y atmósfera), han mermado su equilibrio, resultando en una de las principales amenazas para la sociedad actual, como lo es el cambio climático que a la par, incrementa la vulnerabilidad socioambiental dentro de su entorno.

Bajo este contexto, durante las siguientes secciones se abordarán algunos de los posibles impactos que representa el cambio climático sobre los diversos ecosistemas y su relación con las actividades que se gestionan al interior del sistema socioeconómico actual desde el enfoque de complejidad que hemos mencionado anteriormente. Pero antes, debemos conocer el origen, funcionamiento, estructura y composición de los subsistemas que conforman el gran sistema Tierra, con la finalidad de comprender la evolución de los SE que permiten la subsistencia del ser humano y su estructura social.

1.2 Subsistemas

Hace 4.5 mil millones de años¹, se formó la Tierra a partir de una nube de gases y polvo que orbitaba alrededor de un joven sol; las constantes colisiones de cuerpos estelares y planetarios más pequeños se fueron combinando hasta crear un geoide sólido y cada vez mayor afectado por la gravedad del sol y de otras variables (Frías, 2013).

Al interior, se fueron gestando diversos procesos geofísicos, químicos y biológicos que formaron entornos con características específicas, dando paso a elementos que de forma gradual se fueron interconectando de una manera tal, que una vez enfriado el planeta, los procesos emergentes resultantes convergieron entre sí (Cruz, 2019), generando distintos biotopos² en los que comenzaron a emerger los primeros microorganismos que evolucionarían y serían la base de la vasta biodiversidad de seres vivos y ecosistemas que se han observado a lo largo de la historia.

Aunque uno de los principios de las ciencias de la complejidad consiste en evitar el reduccionismo y el aislamiento del sistema a analizar (Rosano, et. al, 2022), en este caso y considerando el proceso de formación y especificidad de la Tierra, para esta investigación será visualizada como un gran sistema (Pedrinaci et. al, 2019), el cual está conformado por 4 subsistemas de acuerdo a las características de sus elementos y referencias bibliográficas, los cuales son: hidrósfera, biósfera, litósfera y atmósfera (IDEAM, 2007), dentro de cada uno de ellos se menciona, de manera general, la vinculación entre sus principales elementos, estructuras y funciones y como el desequilibrio que se ha llevado al interior de cada uno, en gran medida por el incremento de actividades antropogénicas y eventos naturales, han provocado una alteración en los SE que se derivan de las distintas interconexiones entre elementos, así como el cambio climático, que tiene en riesgo la existencia del entorno estructural de la humanidad.

1.2.1 Hidrósfera

La hidrósfera es el subsistema que representa la mayor parte del mundo y mantiene una estrecha relación con los demás subsistemas además de ser la piedra angular de cualquier ecosistema (Correa, 2022). Se conforma básicamente por el elemento agua en sus distintos estados, que incluyen el sólido (criósfera, hielo), gaseoso (vapor de agua) y líquido; además de estar distribuido en distintas áreas del planeta, como lo son mares, ríos, lagos, océanos, glaciares y lagunas superficiales, subterráneas y/o artificiales (Alcalá-Quesada, 2016).

Este subsistema es el resultado de todo un proceso que se gestó a partir de la formación de la Tierra; aunque existen diversas teorías que buscan explicar su origen, la más aceptada es la teoría volcánica, mencionada por Fontúrbel (2004) *“el agua surgió a partir de distintos procesos exógenos y endógenos que se generaron durante la fase de creación del planeta, tal*

¹ Edad calculada mediante datación radiométrica.

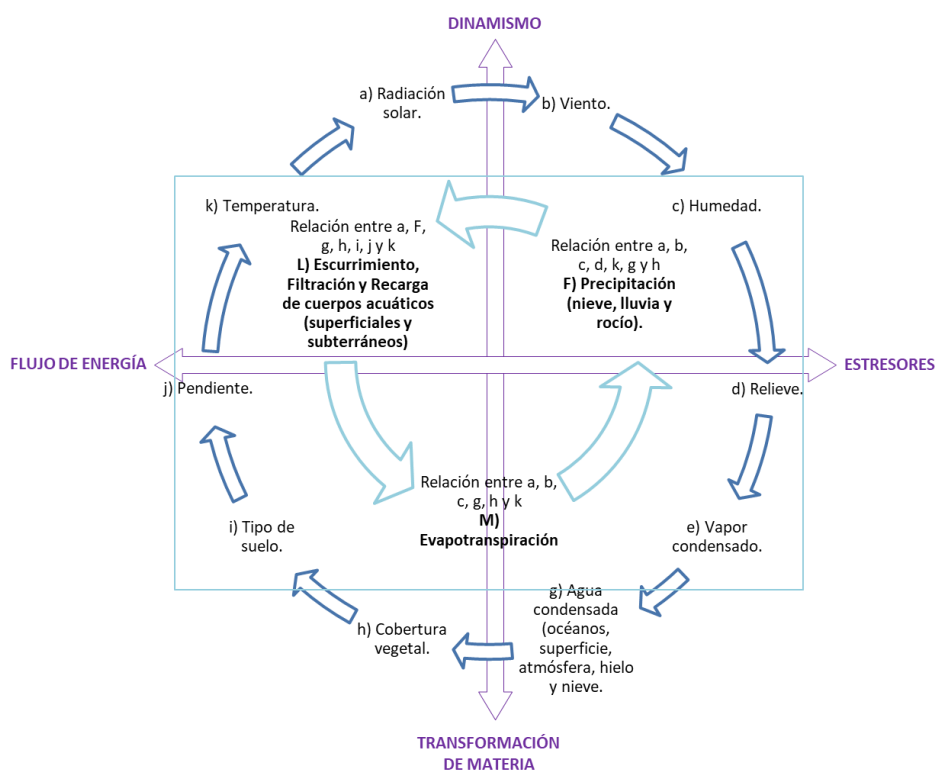
² Es un área de condiciones ambientales uniformes que provee espacio vital a un conjunto de flora y fauna.

como lo conocemos, principalmente por la erupción de volcanes, en donde las exhalaciones que se registraban por la presión que tenían, expulsaban agua en forma de vapor, además de gases como el dióxido de carbono y nitrógeno” (pág. 4).

Estos procesos moldearon el entorno atmosférico primitivo del planeta y fueron evolucionando por varios miles de millones de años, una vez que la tierra se enfrió, delimitó su relieve; la interacción del sol con el vapor de agua que estaba condensado en la atmósfera y que se había acumulado por todo este periodo de formación pasó a estado líquido, formando océanos y mares que interactuaron con variables como la temperatura, oxígeno, entre otros, y que permitió la creación de pequeños microorganismos que comenzaron a gestar (mediante el proceso de la fotosíntesis) la base de oxígeno de la atmósfera (Beraldi-Campesi, 2014).

A partir de ello, distintos elementos comenzaron a interactuar llegando a un punto de equilibrio, que permitió la consolidación del ciclo hídrico, como se muestra en la Figura 2, el cual fue evolucionando de tal manera que el flujo de materia y energía que en él encontramos, ha incorporado nuevos elementos y procesos (Custodio, 1976).

Figura 2. Ciclo del agua.



Fuente: Elaboración propia.

Dentro del ciclo hídrico existen diversos elementos que se relacionan entre sí, como la temperatura, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, la humedad, el relieve, entre otros (Elizalde-Servín, 2009) y que convergen, resultando en procesos como la evaporación del agua

superficial de océanos, lagos y ríos impulsada por la energía solar, lo cual suele sumarse a la transpiración representada por toda la humedad que las plantas extraen del suelo (Gavilán et. al, 2019), resultando en la evapotranspiración

Una vez que este vapor es acumulado, parte de él sube hasta la tropósfera en donde interactúa con las corrientes de aire y la temperatura haciendo que el vapor se condense y se formen las nubes (Garrido, 1980). Este proceso requiere de gran energía para que las partículas colisionen y caigan como precipitación en sus distintas formas (Monsalve, 1999).

De la cual, sólo un porcentaje de ella fluye sobre el terreno, y el otro se infiltra al suelo, recargando los distintos cuerpos de agua de las distintas regiones y a diversas escalas (Castillo et. al, 2009).

Esta recarga se puede presentar de distintas maneras como es la natural, artificial o inducida. Sin embargo, si la tasa de precipitación excede la capacidad que el terreno tiene de infiltración, se genera la escorrentía superficial alterando el relieve en donde ocurra dicho evento. La relación entre los componentes de la hidrosfera y atmósfera que se muestran en este ejemplo representados por la evapotranspiración, evaporación y precipitación, conllevan un importante equilibrio entre sí, por desgracia, a partir del periodo de industrialización a finales del siglo XVIII y las actividades antropogénicas que se derivan de ello, así como la implementación de sistemas económicos que han regido las normas de desarrollo mundial (Velasco, 2020), se ha incrementado y alterado este dinamismo, a tal grado que el aumento en la temperatura atmosférica ha reducido gran extensión de la criósfera, los mantos de nieve y la extensión y el espesor del hielo marino del Ártico. Se tiene registrado que entre 2006 y 2015, el manto de hielo de Groenlandia perdió masa de hielo a un ritmo medio de $278 \pm 11 \text{ Gt/año}^{-1}$ (equivalente a un aumento del nivel del mar a escala mundial de $0.77 \pm 0.03 \text{ mm/año}^{-1}$), lo que obedeció, sobre todo, al derretimiento en superficie (IPCC, 2019b).

Las consecuencias de estos cambios en la hidrosfera comienzan a cobrar factura en los centros urbanos, principalmente en dos sentidos: disponibilidad hídrica e incremento de eventos hidrometeorológicos extremos (Maldonado, 2022). Por desgracia, dicha tendencia seguirá incrementándose, se prevé que de no hacer nada (de acuerdo con la especulación sobre las tendencias de las RCP 8.5 y 4.5) las repercusiones serán principalmente sobre las naciones en desarrollo (IPCC, 2022). Ante este panorama, es necesario gestionar de manera integral políticas públicas enfocadas a una culturalización entorno al uso y manejo del agua como una medida de adaptación frente al cambio climático.

1.2.2 Biósfera

La biósfera representa la parte superficial del planeta que se funde con la litosfera, en ella se alberga y desarrolla toda la vida que existe en el planeta dentro de su área de influencia (Vernadsky, 1997).

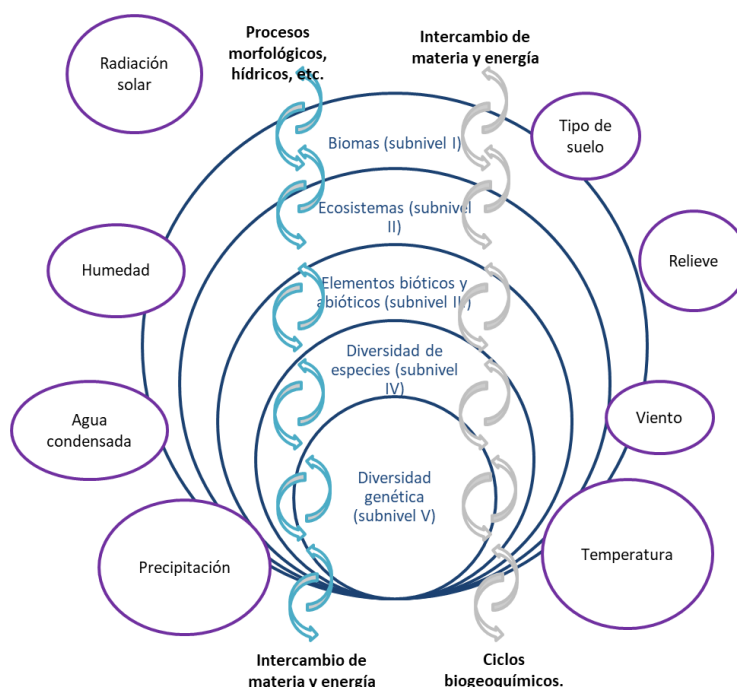
Su formación y los distintos procesos evolutivos por los que ha pasado, son el resultado de la interacción entre componentes bióticos y abióticos y del intercambio de materia y energía entre ellos; esto ha permitido el surgimiento de la vida.

Varios autores como Gutiérrez (1992), Lovelock (1983) y Aljanati (1992) concuerdan en que la vida surgió en los océanos, debido a la relación que tenían los cuerpos de agua con las radiaciones solares en donde las primeras partículas y bacterias transformaron esta energía, generando alteraciones en los campos electromagnéticos de la tierra y en composiciones moleculares que resultaron en fenómenos de ionización y de nuevos compuestos químicos.

Dicho entorno permitió el surgimiento de los primeros microorganismos, los cuales pasaron de tener un metabolismo anaerobio a ser organismos fotótrofos para que finalmente aparecieran las cianobacterias (junto con otras bacterias y microalgas) quienes fueron capaces de generar oxígeno como resultado de su metabolismo, transformando el dióxido de carbono en oxígeno y compuestos orgánicos (como azúcares), con lo que por un lado la atmósfera primitiva fue cambiando (Hernández, 2022). Por el otro, comenzaron a surgir los primeros ecosistemas a partir de la interrelación entre la energía y la materia, así como mediante asociaciones simbióticas, procesos de mutualismo, comensalismo y parasitismo, las cuales se llevaron a cabo entre los primeros organismos unicelulares que vivieron en la Tierra a partir de lo cual han sobrevivido, evolucionaron, murieron, se degradaron y restituyeron atómicamente a la biosfera de una manera cíclica en donde la vida se originó (Vernadsky, 1997).

Este dinamismo, dio paso a procesos y patrones ecológicos y evolutivos irrepetibles, como se muestra en la Figura 3, que han mantenido y alterado la vasta biodiversidad, basada en la diversificación genética y de especies, extinciones, dinámica de comunidades y ecosistemas que se han moldeado y adaptado a los diferentes entornos en las distintas eras del planeta (Núñez et. al, 2003; Lozada-Chávez, et. al, 2022; Baca, et. al, 2022; Pérez-Vásquez, 2022) siendo parte de este equilibrio biológico que conocemos actualmente.

Figura 3. Subsistema de la biósfera.



Fuente: Elaboración propia.

Esta figura representa la convergencia entre los elementos de la precipitación, temperatura, tipo de suelo, relieve, humedad, viento y su relación con los distintos procesos y ciclos que surgen entre ellos como el intercambio de energía y materia, y los ciclos biogeoquímicos han sido el origen de los diversos biomas que observamos en la actualidad y cuya existencia es diferenciada por un tipo particular de clima, cuya expresión espacio-temporal es responsable de la diversidad, la estructura, el funcionamiento y la distribución de la biocenosis³ (Rego et. al, 2005), que han dado paso a tres biomas: 1) Terrestres, 2) Acuáticos, y 3) de Interfase.

En el caso de los biomas terrestres, algunos ejemplos incluyen el desierto polar, la tundra, los bosques, y los desiertos, entre otros; en el caso de los biomas acuáticos, podemos mencionar a los pelágicos y neríticos o de alta mar y; por último, para los biomas de interfase, ubicamos aquellos en los que confluyen distintos ambientes al mismo tiempo como el terrestre y marino (Valdés, 2005).

En cada uno de estos biomas se reconoce un clima propio (bioclima) y unidades de zonación latitudinal (ecozona o ecorregión) o altitudinal (orobioma) del clima, lo que se diferencia mediante los grupos o formaciones vegetales dominantes que se presentan en estas clasificaciones, así como la existencia de condiciones abióticas particulares de carácter azonal (Rego et. al, 2005).

³ Conjunto de organismos, vegetales o animales, que viven y se reproducen en determinadas condiciones de un medio o biotopo.

Dentro de los biomas podemos encontrar diversos tipos de ecosistemas, que se entienden como *“el conjunto de especies de un área determinada que interactúan entre ellas y su ambiente abiótico”* (Villarreal et. al, 2008), algunos pueden ser los desérticos, los bosques nublados o templados, los matorrales, los pastizales, las selvas húmedas o secas, las dunas, los manglares, las islas, y los arrecifes, entre otros. La interacción que se lleva a cabo al interior de ellos se establece con base en elementos bióticos y abióticos, en donde se presenta un intercambio de energía y materia entre las especies y sus entornos, debido al rol que juegan los organismos interdependientes que forman cadenas tróficas mediante procesos como la depredación, el parasitismo, la competencia y la simbiosis que se presentan entre sus poblaciones y las diversas comunidades de este (Molina, 2016).

De esta manera, es transformada la energía por relaciones de mantenimiento y subsistencia de los ciclos, como el de nutrientes, así como procesos edáficos que transforman la materia orgánica en compuestos elementales a partir de procesos como el de la descomposición en sus distintas etapas, que incluyen la trituración, la lixiviación, el catabolismo y la humificación, que son regulados por factores climáticos, y por las características físicas y químicas del suelo como la porosidad y aireación (Álvarez-Sánchez, 2001). El resultado de esta interacción es la base alimentaria para los seres vivos que existen dentro del planeta (Vernadsky et. al, 1997), a partir de ello, es que han surgido todas las especies que conocemos (In, 2013).

Dicha variación de biodiversidad se puede clasificar con base en la diversidad genética de especies existentes dentro del biotopo, el cual se divide en cuatro grupos clasificados a partir de la función de sus consecuencias en la adecuación: 1) variación de alelos letales, deletéreos o neutros, 2) las asociadas con alelos que aumentan la adecuación de sus portadores, 3) los de rasgos cualitativos y 4) los de rasgos cuantitativos.

Estas divergencias genéticas profundas muestran grupos morfológicamente homogéneos o mostrar homogeneidad genética en grupos que a priori se han mantenido separados (García-Pérez, 2022). Lo que nos permite identificar patrones que han interferido en los procesos históricos y demográficos que les dieron lugar, mostrando los distintos niveles de heredabilidad que garantizan una respuesta a la selección natural y artificial con base en el estudio de la filogeografía (Piñero, 2008). Es por esto último, que las especies no están distribuidas homogéneamente en el planeta.

Esta diferencia se intensificará debido a cuestiones biofísicas o a nivel de hábitat de acuerdo con los elementos que ahí convergen, a los comportamientos que representan, y por supuesto, a sus funciones dentro de los subsistemas en que se encuentran (Valdés, 2005).

Por desgracia, en la actualidad el cambio climático está alterando el delicado equilibrio dentro de este subsistema y se prevé que de seguir la tendencia y alcanzar un calentamiento global de 1.5 °C sobre los niveles industriales, exista una redistribución geográfica de muchas especies marinas, generando una pérdida de recursos. Adicionalmente, se prevé una reducción

de arrecifes de coral entre un 70 % a un 90 %. Además, de las 105 000 especies estudiadas, se prevé que 6 % de los insectos, 8 % de las plantas y 4 % de los vertebrados pierdan más de la mitad de su alcance geográfico determinado climáticamente,

Con esto, se prevé que un 4 % del planeta experimente una alteración de sus ecosistemas con un calentamiento global de 1°C como ha ocurrido recientemente (IPCC, 2019a).

Este tipo de repercusiones lo están viviendo regiones del continente americano en donde se observa afectación en ecosistemas terrestres y acuáticos debido a la agricultura intensiva, especies invasoras, sobreexplotación de recursos biológicos, a la deforestación en bosques secos tropicales, matorrales, bosques templados y bosques tropicales (Reyes-Palomino, et. al, 2022). Aunque la flora y fauna busca responder a las alteraciones que esto le significa en cuestión de morfología, fenología y cambios de rango geográfico; la velocidad en que se están llevado a cabo dichos cambios no permite una respuesta adecuada de adaptabilidad o resiliencia, en cambio, se han presentado cambios generalizados en la productividad, interacción entre las especies, la vulnerabilidad a las invasiones biológicas y otras propiedades emergentes (Weiskopf et. al, 2022).

Adicional a ello el cambio climático junto con la contaminación de los elementos del planeta, pérdida de ecosistemas, el incremento en la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, algunas actividades antropógenas y las especies exóticas invasoras han incrementado la extinción y migración de especies resultando en la pérdida de biodiversidad de los ecosistemas (Alba-Tercedor, 2022). Esto ha repercutido en los servicios ecosistémicos que se requieren para tener una calidad de vida adecuada para la población, tema que se analizara más adelante.

1.2.3 Litósfera

Entendemos a la litosfera como la parte sólida de la corteza terrestre del planeta, cuyas características geológicas son el resultado de procesos que derivan en el movimiento de placas tectónicas, las cuales, al converger con el flujo térmico terrestre y la gravedad han dado origen a la composición, forma y estructura del relieve (Alfaro, 2011). Esto se logró, a partir de una serie de eventos que iniciaron desde la aparición del sol y las fuerzas gravitacionales que fungieron como imán para que las masas, el polvo y la materia estelar se unieran en el geoide que llamamos Tierra (Alfaro, 2007).

Al principio, este geoide fue una roca homogénea y fría compuesta por polvo cósmico y gases unidos por la atracción gravitacional, del sol primero, y después al interior de esta; dicha atracción permitió la comprensión de diversos materiales y elementos cuyas características radioactivas y de energía geotérmica se combinaron hasta calentar su centro, llegando al punto de fundición por la increíble temperatura que ahí se generaba (Méndez-Chazarra, 2022). De esta manera, los elementos más pesados (como el hierro y el níquel) se hundieron y formaron

el núcleo; mientras las rocas y componentes más ligeros ascendieron y formaron la corteza y el manto (Rodríguez, 2008).

Aunque existen diversas teorías que buscan describir la formación de este geoide, como la que plantea Hutton (1960), quien explica que su formación es un ciclo ininterrumpido cuyo origen y evolución se llevó a cabo en su núcleo, en donde el flujo de energía y movimiento que ahí interactuaba resultó en el relieve. Otros autores quienes estaban convencidos que su formación se generó bajo un proceso en donde la superficie emergió del océano debido a distintos procesos endógenos (Ospovat, 1980); o la teoría de la deriva continental de Alfred Wegener, que se basa en el desplazamiento de los continentes, cambiando completamente la configuración de las tierras y los mares (Pérez-Malvárez, 2006).

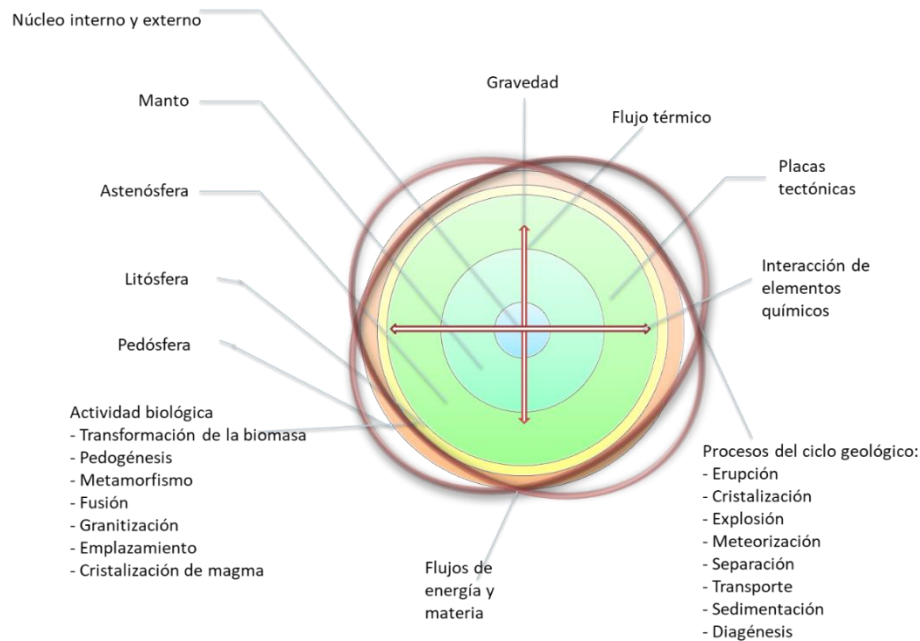
La teoría más reconocida, y en la que se basó la presente investigación, es la de las placas tectónicas, que retoma algunas ideas de las teorías antes mencionadas y concluye el argumento, mencionando que, una vez que se dio el progresivo enfriamiento del planeta, su funcionamiento se fue transformando poco a poco. Incrementando el espesor y rigidez de las placas, así como su disminución con lo que se comenzaron a formar los llamados “*supercontinentes*”, el primero de ellos Sclavia/Superia (hace 2700 Ma), Nuna/Columbia (1300 Ma), Rodinia (1000 Ma), Pannotia/Gondwana (550 Ma), y el más conocido Pangea (hace 300 Ma) (Alfaro, et. al, 2013).

La dinámica de este subsistema basado principalmente en el movimiento de las placas tectónicas⁴ como resultado de la oscilación y rotación del planeta que se sumaban a la presión y gravedad interna del mismo, originó la transformación de esta gran capa en dorsales oceánicas y grandes cordilleras entrelazadas que recorren todo el mundo (Dilek, 2011).

Una vez conformada esta gran superficie continental, comenzaron a incidir y converger una serie de componentes naturales de la biósfera, hidrósfera y atmósfera, que dieron origen a lo que se conoce como pedósfera, la cual se denomina como aquella delgada capa que se ubica por encima de la corteza a la que llamamos suelo y se entiende como “*el resultado de los procesos que se llevan a cabo dentro y fuera de las capas de la corteza terrestre, y del intercambio de material orgánico y energía que se desprenden de ellas*” (Tarbuck et. al, 2005). Dichos elementos y procesos emergentes se muestran en la Figura 4.

Figura 4. Litósfera.

⁴ Es un fragmento de la litosfera que se mueve como un bloque relativamente rígido sobre la astenósfera de la tierra.



Fuente: Elaboración propia.

En esta figura observamos, la manera en que el subsistema de la litósfera estaría conformado: por un núcleo interno y uno externo, seguido del manto, la astenósfera, y la litósfera en donde se llevan a cabo procesos que permiten la formación del relieve y la corteza terrestre debido, principalmente, al movimiento de las placas tectónicas que se desplazan lentamente sobre la astenósfera⁵, así como a los procesos que se originan como resultado de la interacción entre estas capas y flujos de materia y energía que se ven influenciados por la gravedad y el flujo térmico, que serían los procesos del ciclo geológico (Elizalde, 2009).

A ello se le suman, los procesos que se comienzan a gestar sobre el suelo y que se desarrollan sobre la pedósfera en donde se encuentran las partículas minerales, materia orgánica y espacio poroso que pueden contener al interior agua o aire dependiendo de factores temporales y estructurales del propio suelo (Haubrich, Reinfried, & Schleicher, 2007). Su funcionamiento se lleva a cabo por la interacción entre procesos físicos, químicos y biológicos, además de los distintos agentes microbiológicos que convergen en su interior y las diversas especies que viven en la Tierra (Fassbender, 2000).

El resultado de este delicado equilibrio se ve reflejado en los medios de subsistencia y naturaleza, así como en los ecosistemas asentados que nacen y se encuentran por encima de la litósfera y que utilizan algunos minerales como los aluminosilicatos (arcillas), los

⁵ Capa del interior de la Tierra que se extiende aproximadamente entre los 50 y los 100 km de profundidad, probablemente formada por materiales viscosos que pueden deformarse

carbonatos (calizas y dolomías), los hidratos de hierro y el aluminio (limonitas y bauxitas), como base para poder establecer microclimas para que subsista la vida (UNCCD, 2013). Esta compleja interacción entre la litosfera, la pedósfera y la biosfera, que es la que se asienta sobre las dos primeras, originaron ocho regiones biogeográficas en el mundo (Wegener, 2012).

Debido a esta división y a los componentes que llegan a interactuar dentro de ellas, como lo es la temperatura, la elevación, la humedad y el viento, se han presentado los distintos elementos que se han mencionado en las secciones anteriores. Esto pone en evidencia, que no se puede analizar cada uno de estos subsistemas por separado, sino que se debe tener en cuenta la relación que tienen entre sí desde una visión sistémica.

Al igual que los subsistemas anteriores, este subsistema se ha visto alterado debido en gran parte, a las actividades antropogénicas que desde 1961 se han llevado a cabo como consecuencia del crecimiento poblacional a nivel mundial y los cambios en el consumo per cápita de alimentos, (cultivos de cereales, ha aumentado en un 240 % hasta 2017), piensos, fibra, (en el caso del algodón, se registró un aumento en un 162%, hasta el 2013), madera y energía que en la actualidad, han dado lugar a tasas sin precedentes en el uso de la tierra y agua dulce (IPCC, 2020), lo que ha incrementado la emisión de GEI. Tan solo entre 2007 y 2016, 13 % de las emisiones de CO₂, 44 % de las de metano (CH₄) y 81 % de las de óxido nitroso (N₂O) procedentes de las actividades humanas a nivel mundial, representaron 23 % (12.0 +/- 2.9 GtCO₂e año⁻¹) del total de emisiones antropógenas netas de GEI en el mundo (IPCC, 2020).

Como consecuencia de ello, y de algunos procesos naturales, ha aumentado la temperatura a nivel mundial, afectando el clima global y regional, incrementado las zonas climáticas áridas del planeta, así como la intensidad y duración de los fenómenos relacionados con el calor, tales como el efecto de “isla de calor” en las ciudades y las olas de calor que han afectado las temperaturas nocturnas. Adicional a ello, se han exacerbado los procesos de degradación de la tierra, a lo que se le suma la erosión del suelo de los campos agrícolas, la cual se estima que es actualmente de 10 a 20 veces (sin labranza) y a más de 100 veces (labranza convencional) superior a la tasa de formación del suelo (IPCC, 2020).

Esto ha repercutido en rangos, abundancia y actividades estacionales de muchas especies de plantas y animales (López & Elpidio, 2022).

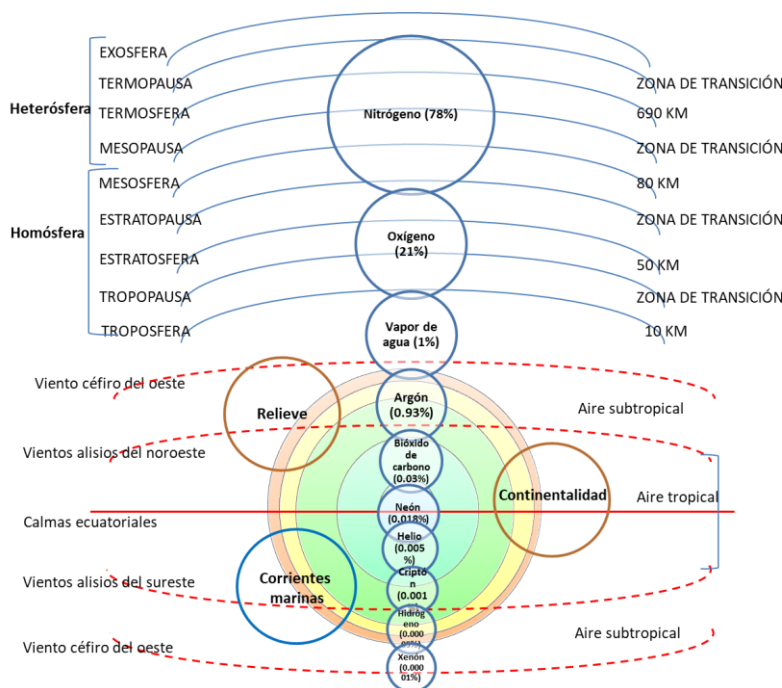
Se prevé que este panorama afecte a los ecosistemas terrestres y la biodiversidad, los cuales son cada vez más vulnerables al cambio climático en curso y a los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, en diferentes grados (IPCC, 2020). Esto representa un panorama sombrío para la dinámica social y económica del ser humano en las siguientes décadas.

1.2.4 Atmósfera

Por último, tenemos el subsistema de la atmósfera, representada por la capa gaseosa que rodea al mundo, su principal función es evitar que la radiación solar y partículas estelares ingresen de manera directa a la superficie del planeta; la cual nace a partir de la consolidación del núcleo incandescente fundido de la Tierra, rodeado de nubes espesas de polvo y gases como resultado de la erupción de volcanes, así como del bombardeo de materia estelar que impactó sobre ella, y que incrementó su temperatura (Barry et. al, 1999). Una vez que el planeta se fue enfriando, la atmósfera primitiva resultante fue conformada por metano, dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, hidrogeno y monóxido de carbono en muy pequeñas proporciones (Pla-García & Menor-Salván, 2017).

Derivado de esta relación surgieron microorganismos adaptados al entorno primitivo de la Tierra y que sobrevivirían al ácido sulfúrico, como fue el caso del *Ferroplasma acidiphilum* (Ramírez et. al, 2006); aunque también no se descarta la teoría que menciona que el arribo de los microorganismos a la Tierra fue a través de material extraterrestre (Meyer, 2009). En cualquiera de los dos casos, dichos microorganismos fueron evolucionando y se adaptaron a un entorno hostil que cambiaba paulatinamente debido a procesos naturales como el de la fotosíntesis, que permitió la vida microscópica que contribuyeron a la formación de la atmósfera de la Tierra tal y como la conocemos (Barton, 2022) y cuyos principales elementos se describen en la Figura 5.

Figura 5. Elementos y composición de la atmósfera.



Fuente: Elaboración propia.

Dentro de esta imagen observamos que el subsistema de la atmósfera está constituido por dos grandes grupos, el primero caracterizado por su composición química, el cual, a su vez, se divide en dos subgrupos: la homósfera (Rodríguez, Teodoro & Sánchez, 2019), que provee aire y brinda protección contra la radiación solar, almacenando la energía térmica que permite que el planeta sea habitable (Christopherson, 2015).

El segundo subgrupo, que es la heterósfera, y se extiende hasta cerca de los 3500 km de altura, su composición varía, presentando una mayor concentración de gases ligeros como el helio, el hidrógeno, el nitrógeno y el oxígeno; la latitud de esta etapa comienza en donde termina la de la homósfera.

Este subgrupo está clasificado en dos sub-subgrupos, divididos así, con base en la función que desempeñan en la ionosfera: la primera, es la parte ionizada de la atmósfera que permite que las ondas de radio emitidas por la superficie terrestre puedan viajar a gran distancia; mientras que la segunda función es la desintegración de meteoroides (Brenes, 1995). El segundo, se encuentra determinado por la temperatura resultante de la relación con el sol, la composición del primer grupo y la hidrósfera. Su interacción permite que la superficie se caliente por la incidencia solar, la cual absorbe parte de ésta y el resto es reflejado por el albedo⁶ (Twomey, 2007).

Esta radiación deja de reflejarse, impactando en la temperatura regional y la de la atmósfera debido a la dinámica de movimiento que se gesta dentro del Sistema Tierra y a la curvatura del planeta (García-Rodeja, 1999). Esta dinámica atmosférica depende principalmente de los cinturones de viento que se muestran en la Figura 5, así como a la presión, la circulación y la continentalidad de estos, a la altitud y la influencia de las corrientes marinas (Pourrut, 1998).

Estas son de suma importancia, ya que en ellas se gestionan procesos importantes como la acumulación de oxígeno y la regulación del clima, las cuales representan una de las principales fuentes para la supervivencia de los ecosistemas directos e indirectos, pues en ellas se genera y distribuye el plancton, además de que la convergencia de todos estos componentes forma macro y meso climas (Pourrut, 1998).

La alteración del subsistema de la atmósfera, en gran medida por el incremento de la emisión de GEI (principalmente) han alterado su estructura, impactando en la temperatura global y en la distribución y temporalidad de la precipitación, lo que ha resultado en los diferentes efectos que se han mencionado en los subsistemas anteriores y que amenazan a la biodiversidad, los ecosistemas, y, por ende, a la dinámica socioeconómica del ser humano.

Hasta aquí y de manera muy general, la descripción de cada uno de los subsistemas del sistema Tierra, se muestra compleja debido a su funcionamiento, características y vinculación con

⁶ Capacidad de reflexión de energía solar que tiene algún cuerpo o materia.

otros componentes, ya que existe una fuerte dependencia entre ellos y su entorno por lo que es imposible describirlos desde un panorama reduccionista o individual. Sin embargo, se buscó denotar precisamente esta compleja pero equilibrada relación entre ellos, así como la evolución que se ha llevado a cabo desde la formación de la tierra a partir de una visión sistémica.

Con la finalidad de vincularlo con los componentes que mencionamos al principio de este trabajo de investigación y que han conformado a la sociedad desde las corrientes funcional-estructuralista, en un inicio, hasta la teoría de sistemas complejos, así como su visión de desarrollo económico a través de los siglos para entender como todo ello ha repercutido en los servicios que se desprenden del sistema tierra y que nos han permitido llegar hasta aquí, estos servicios los entenderemos de la siguiente manera.

1.3 Servicios Ecosistémicos (SE)

El resultado de la interacción de los componentes que se vinculan al interior de cada uno de los subsistemas mencionados anteriormente, nos han brindado las herramientas, el sustento y las bases para crear la infraestructura que nos ha permitido crecer como sociedad (Emerton, 2008), debido a las características propias, las afinidades y divergencias entre los distintos servicios que surgen a partir de esta correlación, se han definido como servicios ecosistémicos (SE), los cuales son conceptualizados por Balvanera (2012), como: *“aquellos componentes de los ecosistemas que se consumen directamente, que se disfrutan, o que contribuyen, a través de interacciones entre ellos, a generar condiciones adecuadas para el bienestar humano”* (pág. 137). La problemática del cambio climático que hemos mencionado a lo largo del capítulo y que se deriva principalmente de las actividades antropogénicas que se han llevado a cabo a través de los años para explotar sus beneficios y satisfacer las necesidades humanas más allá de las básicas, ha repercutido en su estructura y función. Esto ha alterado de manera diferencial cada una de las categorías en los cuales están englobados, estas son: servicios de provisión, servicios de regulación, servicios de soporte y servicios culturales, y se espera que el riesgo aumente conforme la inacción continúe.

En el caso de los *servicios de provisión o de abastecimiento (Sab)* que responden a los beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas. Las actividades antropogénicas como la tala ilícita e indiscriminada, el pastoreo excesivo, y el crecimiento demográfico (Fonseca, 2022), así como la conversión de áreas forestales en monocultivos agrícolas para aumentar la producción de alimentos han repercutido sobre la captación de CO₂, la provisión hídrica y el control de deslaves, que incluyen tanto servicios de provisión como de regulación (Vitousek et. al, 1997). Lo anterior, ha incrementado el riesgo de la producción de sectores agrícolas, ganaderos, de silvicultura y pesca frente al cambio climático, además de presentar efectos adversos sobre la base del capital natural, por la alteración de las propiedades físicas y bioquímicas del suelo, modificando ecosistemas como los pastizales

cuya cobertura puede capturar entre 50 y 80% más agua que los suelos carentes de cubierta vegetal, incidiendo a su vez en procesos de recarga de acuíferos y en la pérdida de flora y fauna medicinal, favoreciendo eventos asociados con la aridez, inundación y salud (Latterra et. al, 2009).

Dicho escenario de riesgo prevé un incremento de temperatura de entre 1.5 °C a 5 °C (de acuerdo con los distintos escenarios del IPCC), esto es importante de mencionar ya que la temperatura media de la Tierra es de $\pm 15^{\circ}\text{C}$, de aumentar solo 2 °C sería como incrementar la temperatura de un cuerpo humano en 5°C (Bordera et. al, 2022), especialmente para este SE, dicha alteración repercutiría en la seguridad alimentaria y el agua (con los mayores impactos observados en muchos lugares y/o comunidades de África, Asia, América Central y del Sur, Islas Pequeñas y el Ártico), ya que las pérdidas repentinas de producción de alimentos y de acceso a los mismos, debido a la escasez hídrica y disminución en la calidad y producción alimenticia, disminuiría la diversidad de la dieta, aumentando la malnutrición en muchas comunidades, especialmente para los pueblos indígenas, los pequeños productores de alimentos y los hogares de bajos ingresos, siendo los niños, los ancianos y las mujeres embarazadas los más afectados (IPCC, 2022).

Adicional a ello, se observan daños sustanciales y pérdidas cada vez más irreversibles, en los ecosistemas terrestres, de agua dulce y costeros y marinos de alta mar deteriorando su estructura, función, resiliencia y capacidad de adaptación natural, así como los cambios estacionales; esto ha desplazado hacia los polos o elevaciones más altas, la mitad de las especies evaluadas, algunas pérdidas como las primeras extinciones de especies provocadas por el cambio climático ya irreversible y otros impactos se acercan a la irreversibilidad, como los impactos de los cambios hidrológicos derivados del retroceso de los glaciares, o los cambios en algunos ecosistemas de montaña y del Ártico provocados por el deshielo del permafrost. Estos impactos han hecho que la mitad de la población mundial sufra actualmente una grave escasez de agua durante al menos una parte del año (IPCC, 2022).

Esta situación ha traído consigo consecuencias socioeconómicas adversas en comunidades costeras, en donde la combinación de factores como asentamientos irregulares o con algún índice de riesgo, sistemas de tratamientos residuales o inexistentes, vertimiento de desechos sólidos hacia la zona costera y su utilización como rellenos, la baja percepción de riesgo ambiental por parte de la sociedad, el uso ilegal de especies marinas, deforestación de especies como el manglar con el cambio climático han resultado en incremento en los impactos negativos de fenómenos hidrometeorológicos extremos lo que ha dado paso a una menor diversidad marina y disminución en los volúmenes de pesca afectando su sistema cultural, productivo y económico (Rangel & García, 2022). Así mismo, se han observado afectaciones físicas, biológicas, químicas y bioquímicas en el desarrollo y producción de plantas cultivadas debido a las alteraciones estacionales de temperatura y precipitación que han sido alteradas por el cambio climático, lo que ha resultado en la degradación de la biodiversidad, prevalencia

de plagas y patógenos, intensidad y frecuencias de eventos extremos, contribuyendo a la erosión y desertificación del suelo. Todo ello, se traduce en una disminución de ingresos para los productores y un incremento potencial en los precios de productos agrícolas debido a su escasez (Lara & Travieso, 2022).

En relación con los *servicios de regulación (Sre)*, los entenderemos como aquellos que proporcionan y regulan el ambiente para una adecuada calidad del aire y suelo, así como el control de inundaciones, enfermedades y la polinización de cultivos. Debido al incremento de procesos industriales, deforestación y quema de combustibles, que se ha dado desde el siglo pasado, la temperatura del planeta se ha alterado (Allen et. al, 2014), principalmente por el incremento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), las cuales se caracterizan por absorber la radiación solar e irradiarla en todas direcciones sobre el planeta (Camacho-Valdez et. al, 2012).

Sin embargo, en algunas regiones, el nivel de energía entrante ha sobrepasado el nivel de energía saliente, debido a la retención de radiación solar de los GEI, lo que hace que esta energía se mantenga en la Tierra, y se incremente la temperatura, contribuyendo a la formación de eventos como las islas de calor o alteración de microclimas, lo cual repercute directamente en la biodiversidad del planeta y por supuesto, en el tema de salud humana por la calidad del aire.

Para constatar esto último, algunos estudios han observado variaciones en la fenología de algunas especies por la afectación que puede darse en los procesos internos de las plantas que controlan o alteran el crecimiento, la reproducción y la floración, las cuales tienden a retrasarse o adelantarse entre 7 y 10 días con un incremento en la temperatura de 2.5 °C (Carabias et. al, 2010).

Lo anterior, puede alterar los procesos de polinización, gestación y reproducción de insectos, así como el ciclo de vida de algunas especies, lo que afecta directamente a los insectos, las aves y los murciélagos; parte fundamental para el desarrollo de las frutas, hortalizas y semillas, ya que estos polinizadores inciden en 35 % de la producción agrícola mundial, elevándola en cerca de 75 % de los principales cultivos alimentarios de todo el mundo (FAO, 2017). Pero no sólo se observan efectos negativos en los Sre, sino también sobre aquellos componentes que interactúan en la generación de los Sab, ya que además del clima, su degradación se ve incrementada por el uso de plaguicidas.

Este desequilibrio repercutirá directamente en el tema de la alimentación ya que, de acuerdo con algunos escenarios bioclimáticos, la producción ganadera podría disminuir debido a la decadencia de la biomasa en los pastos, la escasez hídrica, entre otros factores que afectarán de igual manera a la agricultura y pesca (Torres, Melo & Miranda, 2022).

Se prevé que este panorama afecte los rendimientos de algunos cultivos (p. ej., maíz y trigo) en muchas regiones de latitudes bajas, adicional a ello, se ha notado una afectación

considerable en las funciones que tiene la tierra como fuente y sumidero de GEI. Adicionalmente, se ha presentado una disminución en la calidad del aire, control biológico y polinización lo que se puede traducir en el aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos y meteorológicos extremos, como las temperaturas extremas en la tierra y el océano y las fuertes precipitaciones; teniendo un impacto generalizado en los ecosistemas, las personas, los asentamientos y las infraestructuras, incluyendo la mortalidad humana relacionada con el calor, la decoloración y la mortalidad de los corales en aguas cálidas y el aumento de la mortalidad de los árboles relacionada con la sequía (IPCC, 2022), generando un efecto dominó sobre la flora, fauna y el ser humano (Díaz, et. al, 2022).

Respecto al *servicio ecosistémico de apoyo o soporte* (Sap), entendido por la FAO como aquellos servicios que proporcionan espacios vitales para las plantas o animales y ayudan a su conservación, dentro de los ejemplos más conocidos encontramos la formación de suelos, el reciclaje de nutrientes y la producción primaria. Los Sap constituyen la base de todos los ecosistemas y sus servicios, siendo indispensables para la producción de todos estos (Camacho et. al, 2012). Por lo que el riesgo latente de este SE frente al cambio climático se observa principalmente en las modificaciones del medio ambiente, los hábitats, la desertificación y la sequía, lo cual podría repercutir en temas de salud, debido a las variaciones en los patrones de comportamiento de algunas enfermedades, causando reemergencia de algunas erradicadas, mutaciones y nuevas cepas de otras (Martín-Álvarez, et. al, 2022).

En el caso de algunos hábitats, el cambio climático está motivando algunos impactos sobre numerosas especies en temas de distribución, abundancia, fenología, migración y reproducción (McLeana, et. al, 2022), dichos efectos son diferenciados entre especies ya que dependen de preferencias climáticas, hábitats, patrones de migración y distribución. Un ejemplo de ello, se observa en un estudio realizado en España en donde se relacionó el número de aves con variables climáticas (temperatura y precipitación) y su geolocalización; en dicho experimento se plantearon diversos escenarios de cambio climático en donde de acuerdo a su proyección, la abundancia de aves de cierta especie migraba a distintos espacios, lo que podría alterar la cadena trófica, polinización o fertilización para algunas prácticas agrícolas (Villén-Pérez, Carrascal, & Palomino, 2022), caso similar al que se presenta en la vegetación de cadenas montañosas la cual responde a procesos migratorios altitudinales por el aumento de temperatura, sin embargo, de cumplirse los escenarios de cambio climático desarrollados con base en las vías representativas de concentración (RCP 8.5 y 6.0) las especies de alta montaña experimentarían procesos de extinción, con lo que no solo la cadena trófica se verá afectada, sino también los procesos hídricos como el de recarga, evapotranspiración y regulación climática (Salas, et. al, 2011).

Bajo este panorama, se presentarían riesgos derivados con la falta de agua, por lo que es necesario gestionar acciones inmediatas con base en el conocimiento científico y se creen

acciones de respuesta a largo plazo en donde la adaptación y mitigación al cambio climático sean piezas fundamentales (IPCC, 2020).

Por último, los *servicios culturales* (Scul), son aquellos que se relacionan más a la percepción que tenga el individuo sobre el entorno ambiental, al relacionarlo con temas como la paz, la salud mental y física, la inspiración y la cultura, es decir, aquellos beneficios no tangibles que las personas obtienen de los ecosistemas (Petersson, et. al, 2022).

La degradación de éstos repercute directamente en temas enfocados a sentimientos de espiritualidad o pertenencia que tiene la población derivada del conocimiento tradicional y costumbres resultado de la estructura social del grupo de individuos que se encuentran en una región determinada (Wittmer et. al, 2010), llegando a incidir en las problemáticas socioambientales como la tragedia de los comunes (Hardin, 2015), en donde se menciona la afectación que tarde o temprano sufriremos a causa de la sobreexplotación del patrimonio natural. Pero, sobre todo, se explica la percepción que ha tenido el ser humano respecto a su entorno, lo que le ha llevado a implementar una dinámica en donde se desenvuelve el individuo y los distintos valores y principios con los que se va formando, tal y como lo explicaba Parsons (1999).

En este sentido, bajo los escenarios previstos del IPCC, se esperaría que el cambio climático impacte sobre los recursos forestales y la vida silvestre lo que repercute sobre los valores espirituales y culturales, así como la salud, por el incremento en vectores que pueden contagiar al ser humano (Rojas & Hernández, 2021).

Como se puede observar, existen conexiones entre la presencia y abundancia de atributos funcionales en la comunidad, las propiedades de los ecosistemas y sus capacidades para proporcionar beneficios para el ser humano (Polania et. al, 2011). Dichas relaciones han llevado a la degradación de algunos de los SE ya mencionados, modificando los espacios vitales para las plantas y animales, mermando la conservación y el mantenimiento de la biodiversidad de los elementos bióticos y abióticos, en donde se lleva a cabo un intercambio importante sobre la variedad de genes entre las poblaciones de especies y dentro de ellas generando así, cierto nivel de degradación, llegando al punto en el que para el 2005, después de analizar 24 SE, 15 de ellos (60 %) estaban degradados (Villa, 2010).

Frente a este panorama, surge la incertidumbre del impacto que se prevé que tenga el cambio climático sobre los SE estratégicos de que depende el ser humano para subsistir. Por lo que es necesario fomentar acciones de adaptación que busquen una estabilidad socio natural, en donde se tomen en cuenta los elementos de resiliencia sin mermar el desarrollo económico, pero sobre todo sin influir en los componentes de bienestar que se han mencionado (Desarrollo, 1998). Logrando un desarrollo sustentable, es decir, satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades, debe guiar las estrategias de conservación de los SE (Prieto et. al, 2019).

Para lograr este equilibrio, se ha buscado diseñar estrategias integrales de manejo para seguir disponiendo de servicios como: la regulación del clima, la fijación de carbono, la polinización, la fertilidad de suelos, la provisión de agua limpia, y el control de inundaciones (Mooney et. al, 1997).

Tarea que no es fácil, ya que inciden distintos aspectos, el más importante es el de las disyuntivas que son aquellas decisiones que deben tomar las instituciones, el sector privado y todo aquel actor involucrado en la toma de decisiones. Estas disyuntivas involucran el perder cierta calidad o cantidad de un SE a cambio de obtener cierta calidad o cantidad de otro (GIZ, 2012). En este sentido, es relevante tener en cuenta, que las decisiones que se lleguen a tomar tendrán un impacto sobre la provisión actual y futura de los SE.

Pero para lograrlo, debemos seleccionar aquellos SE estratégicos que involucren los servicios intermedios y finales, manteniendo una conexión entre el bienestar humano y los ecosistemas además de delinear un conjunto de beneficios a los cuales se les puede asignar un valor (Turner et. al, 2008).

Por lo que consideramos que los SE estratégicos para realizar el presente estudio sean el de provisión hídrica, debido a la importancia que tienen el agua sobre cualquier ser vivo, proceso biológico y actividad socioeconómica y regulación climática ya que las variables que lo conforman son fundamentales para la subsistencia de cualquier ser vivo a la vez que se complementa con la provisión hídrica.

El poder entender esta relación y generar un posible comportamiento de sus componentes frente al cambio climático podrá ayudar a tomadores de decisión en el diseño y análisis de acciones enfocadas a la mitigación y adaptación de lo que parece ser el problema más complejo que enfrenta la humanidad hoy en día.

A lo largo de este capítulo se describieron los principales sistemas naturales de la Tierra y sus interacciones desde una perspectiva sistémica. Esta visión permite comprender el comportamiento dinámico del sistema terrestre frente a perturbaciones climáticas y constituye el fundamento conceptual para el análisis de los servicios ecosistémicos de provisión hídrica y regulación climática que a continuación se tratan.

CAPÍTULO 2. PROBLEMÁTICA Y SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Como se observó, la consolidación del sistema Tierra ha sido el resultado de la vinculación entre distintos componentes químicos, procesos físicos, flujos de energía, materia, espacio y tiempo que han permitido las condiciones adecuadas para el origen y la preservación de la vida (Portilla, 2011), sus distintas formas y relaciones con elementos bióticos y abióticos han

brindado los servicios, elementos y la infraestructura necesaria para lograr un adecuado desarrollo y bienestar humano (Del Saz, 2008).

Sin embargo, las actividades sociales (corrupción, despojo y mal gestión territorial), políticas (reestructuraciones institucionales) y económicas (liberación e industrialización de actividades primarias y extractivas, cambio de uso de suelo), que se han llevado a cabo para aprovechar y maximizar el potencial de cada uno de estos elementos, derivados de un crecimiento exponencial de la población y un insostenible modelo de producción y consumo, han afectado la estructura, dinámica y funcionalidad de la biodiversidad (Godínez et. al, 2021).

Impactando en aspectos como la composición química de la atmósfera, a partir de lo cual, se ha alterado el SE de regulación climática, debido a la variabilidad de la temperatura ambiental terrestre y marina que se ha observado en las últimas décadas (Riosmena, 2021), se estima que la temperatura media global en superficie observada, tan solo en el decenio de 2006-2015, fue 0.87 °C más alta (rango probable entre 0,75 °C y 0,99 °C) que el promedio del período 1850-1900 (IPCC, 2019a), lo que ha generado un cambio climático en todo el planeta.

Frente a esta tendencia, se esperan escenarios en donde sectores como el de la energía, la alimentación y el agua podrían traslapar espacial y temporalmente, creando nuevos peligros, exposiciones y vulnerabilidades como la pérdida de masa de los glaciares y mantos de hielo en todo el mundo debido, principalmente, al incremento de temperatura sin interrupción que se ha presentado en los océanos desde 1970 a partir de lo cual se ha absorbido más del 90% del exceso de calor en el sistema climático, y entre 20% y 30% del total de emisiones antropógenas de CO₂ desde la década de 1980, lo que ha repercutido en la acidificación del océano y su pérdida de oxígeno en un rango de 0.5% al 3.3 % en los 1000 mts., superiores; así mismo, el nivel medio del mar a escala mundial ha aumentado a la par en que se observa una alteración regional considerable en las precipitaciones, los vientos y los fenómenos relacionados con el nivel del mar extremo como son algunos ciclones tropicales, la intensidad de diversos fenómenos extremos y los impactos en cascada conexos como la erosión en las costas y las inundaciones en alrededor 1.0 cm/año⁻¹ y 0.8 cm/año⁻¹ durante el período 1985-2018 (IPCC, 2019b).

La contribución de estos cambios se observa en la alteración de las actividades estacionales, la población y la distribución de especies vegetales y animales, pero, sobre todo, se ha observado un cambio considerable en el SE de provisión hídrica, que afecta a cerca de 3,600 millones de personas alrededor del mundo que sufren algún grado de escasez de agua (Cervantes & Martínez, 2021).

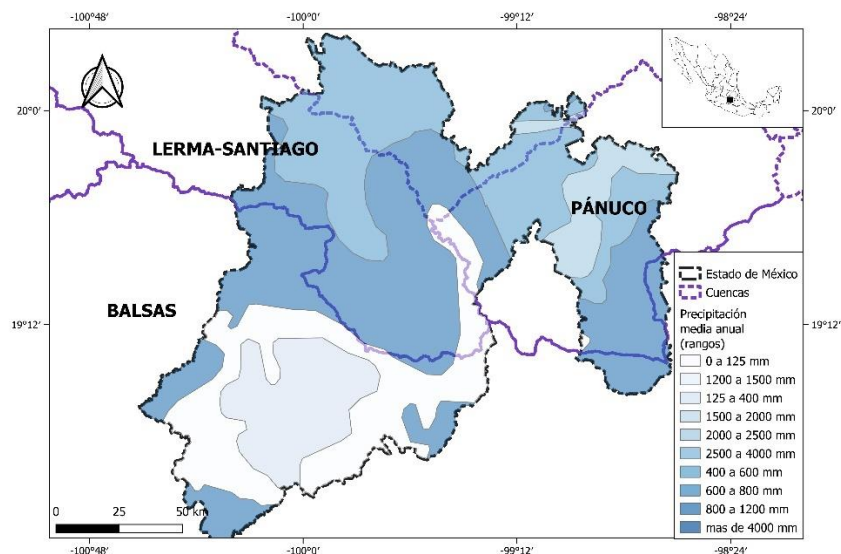
Esta problemática incrementa debido a la demanda anual de 1% como consecuencia del actual modelo de desarrollo económico y por los cambios en los patrones de consumo (UN-Water, 2019). De continuar esta tendencia, se estima que para el año 2050, 5.7 millones de personas se enfrentarán a diversos problemas derivados de la falta de agua, la mayoría de ellos, en

economías emergentes o en desarrollo (UN-Water, 2019); dichas alteraciones se observan de manera diferenciada en todo el mundo.

Para el caso de México, 77% de la población vive en zonas donde sólo existe 33% de agua renovable en todo el país, (Arreguin-Cortés et al., 2020), lo que ha generado estrés hídrico en las fuentes de abastecimiento de las zonas urbanas (Gispert et al., 2018). Un ejemplo de ello es la zona central de la República Mexicana, donde se encuentra la cuenca del Valle de México, la región con mayor población del país (Peña-Díaz, 2019); para abastecerla se requiere un volumen bruto de 2142 hm³/año, además de los 641 hm³/año que son requeridos, sólo para el uso agrícola, industrial y otros servicios. Este volumen se obtiene principalmente del acuífero del Valle de México, del Valle de Lerma y del Sistema Cutzamala (Brambila et al., 2021). Aun y con ello, al menos 10% de su población total carece de acceso al recurso; aunque los volúmenes anuales abastecidos por el sistema Cutzamala incrementaron de 177.2 hm³ en 2006 a 194.5 hm³ en 2017 (CONAGUA, 2018), el número de problemas de desabasto sigue aumentando cada año debido a un déficit de tres metros cúbicos por segundo, que se incrementará en un metro cúbico cada año.

Dentro de esta zona del país se encuentra el Estado de México (Fig. 6), localizado en la porción sur de la altiplanicie meridional de la República Mexicana, abarca una superficie de 22,357 km² y se integra por 125 municipios, esta zona es abastecida por tres grandes cuencas, Lerma (ocupa el 27.3% de la superficie estatal), Balsas (37.2%) y Pánuco (35.5%), debido a su dinámica socioeconómica y al incremento poblacional de los últimos años; actualmente es una de las regiones con considerable explotación de agua (Peña-Díaz, 2019), se estima que desde el 2005 la sobreexplotación de los acuíferos ascendía a 20.1 m³/s (Perló & González, 2005) esa cifra ha aumentado como consecuencia de una distribución desigual relacionada con una mala ordenación del territorio, altos niveles de contaminación y falta de mantenimiento en la red hídrica (Luna López et al., 2020).

Figura 6. Ubicación geográfica del Estado de México.



Fuente: Elaboración propia con información georreferenciada de CONAGUA, 2023.

De acuerdo con la Estrategia Estatal de Cambio Climático (EECC) del Estado de México (2016), dichas problemáticas relacionadas a la provisión hídrica podrían acrecentar debido a la alteración del SE de regulación climática que se ha visto alterado por el cambio climático que vivimos a partir de lo cual se esperaría un incremento de temperatura de 1.5°C a 1.9°C y cambios en los rangos de precipitación de entre 5% y 8% de la lluvia acumulada anualmente al 2030 (INECC, 2018). Esto, como resultado del incremento en la emisión de GEI que para el año 2016 fueron de 36,243.4 Gg de CO₂eq de las cuales, el sector energético aportó 24,583.5 Gg de CO₂eq (68%), el sector de procesos industriales aportó 3,482.3 Gg de CO₂eq (10%), el sector relacionado al cambio de uso de suelo fue de 1,660.3 Gg de CO₂eq (5%), y el sector de residuos 6,517.3 Gg de CO₂eq (18%) (IEECC, 2016), pero también es atribuido a cuestiones naturales como los eventos extremos climáticos asociados a los fenómenos ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) en un futuro más cercano (Alzate et. al, 2015).

Estas posibles modificaciones en las variables climáticas del Estado, debido al cambio climático, generarían problemáticas en el aumento y prevalencia de enfermedades gastrointestinales, insecto-infecciosas, disminución de la disponibilidad de agua para comunidades rurales y urbanas, y una afectación considerable en sectores económicos como el agrícola, ganadero, pesquero, de industria y algunos servicios; en la parte de capital natural, esto representaría el desplazamiento altitudinal o reducción de cobertura de comunidades vegetales como los bosques templados de oyamel, pino y encino; esto incrementaría los efectos de la variabilidad climática actual que sufre el Estado y que se traduciría en un aumento de la ocurrencia de desastres como inundaciones, sequías, heladas y enfermedades desencadenadas por la vulnerabilidad de la población (IEECC, 2016).

Agudizando así, los problemas sociales, ambientales y económicos en el Estado (Karmalkar

et. al, 2011), aumentando significativamente los niveles de pobreza, especialmente en aquellos municipios del noroeste del Estado cuyo nivel de vulnerabilidad⁷ al cambio climático es mayor que otras regiones del Estado, de acuerdo al estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) para determinar el nivel de vulnerabilidad de los municipios del País, se emplearon proyecciones de cuatro modelos de circulación general: Centre National de Recherches Météorologiques (CNRMC-M5), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-CM3), Met Office Hadley Center (HADGEM2-ES) y Max Plank Institute for Meteorology (MPI-ESM-LR), para el horizonte de tiempo 2015-2039 y para la Trayectoria Representativa de Concentración (RCP por sus siglas en inglés) 8.5. W/m² (INECC, 2021), arrojando las siguientes categorías:

Tabla 1. Municipios del noroeste del Estado de México con mayor vulnerabilidad al cambio climático.

Id.	Municipio del Estado de México	Categoría de vulnerabilidad al cambio climático	Vulnerabilidades en muy alto o alto
A	Amanalco	1	2
B	Donato Guerra	1	2
C	Ixtapan del Oro	1	3
D	Luvianos	1	2
E	Otzoloapan	1	3
F	San José del Rincón	1	3
G	San Simón de Guerrero	1	4
H	Santo Tomás	1	2
I	Tejupilco	1	2
J	Temascaltepec	1	3
K	Valle de Bravo	1	3
L	Villa de Allende	1	3
M	Villa Victoria	1	3
N	Zacazonapan	1	2
Ñ	Zinacantepec	1	1
*1= Alto			
*4= Muy Alto			

Fuente: INECC, 2021.

Bajo este panorama, el nivel de riesgo aumenta debido a las características rurales (Madrigal, L. & Rozga, E., 2014) y dependencia del agua que tiene esta zona para subsistir, ya que su población carece de poco más de 100 litros por habitante al día, para desarrollar sus actividades (Iglesias, 2017). A este déficit se suma el incremento de prácticas económicas como la agricultura de regadío, que, junto a una mala gestión administrativa, han fomentado un intenso cambio en el uso del suelo (Álvarez-Arteaga et al., 2020). Adicional a ello, temas como la actual pandemia de COVID-19, han incrementado aún más el consumo de agua, hasta

⁷ Considerada como aquella que estará dada en función del carácter, magnitud y velocidad de la variación climática a la que se encuentra expuesto un sistema, su sensibilidad y capacidad de adaptación (LGCC, 2022).

en un 40% (Martínez-Mendoza et. al, 2021).

De esta manera, la relación tan cercana entre ambos SE estratégicos se pone en riesgo, debido a las anomalías observadas de temperatura media que van de -1 a 3°C en la zona de estudio, temperaturas debajo de lo normal; mostrando un incremento y decremento en verano; como consecuencia de ello, se han presentado tres tipos de relaciones para el mismo periodo: a) disminución de temperatura y disminución de precipitación, b) incremento de temperatura y disminución de precipitación y c) incremento de temperatura y aumento de precipitación (Orozco-Hernández, et. al, 2015); esto, debido a la relación entre la temperatura media y orografía. Este panorama representa un riesgo en la zona de estudio a corto y mediano plazo, ya que podrían incrementar problemáticas como la pobreza, migración, marginación, discriminación y salud de algunos de los municipios ubicados en la zona, y que fueron en 2014 aquellos con un Índice de Desarrollo Humano (IDH) por debajo de la media de todos los municipios del país (PNUD, 2014).

Por lo que surge la necesidad de comenzar a diseñar e implementar medidas de adaptación y mitigación enfocadas a estos posibles escenarios, pero, sobre todo, a regiones en específico ya que los impactos esperados del cambio climático son de manera diferenciada y se deben tomar en cuenta diversas variables que permitan que estos SE estratégicos se vean lo menos afectados. Debido a las diferencias tan marcadas entre aspectos socioeconómicos, variables ambientales, recursos naturales y los posibles efectos que representa el cambio climático sobre la zona de estudio, es que se determinó una subcuenca; debido que la división política no coincide con los límites hidrológicos naturales, lo que da lugar a disputas entre regiones debido a los distintos marcos e instrumentos legales y normativos bajo los que se rige cada uno de los gobiernos estatales y municipales.

Para ello, se ha considerado la metodología propuesta en el proyecto *“Binacional México-Estados Unidos de América para la integración de redes hidrográficas transfronterizas”*, en donde fueron generados polígonos de subcuencas, parcialmente acotados al límite internacional de los datos topográficos, resultando en unidades de captación de aguas superficiales (INEGI, 2010)

Para lograr lo antes expuesto, se generó una red geométrica⁸ dentro del Estado de México que abarcó la mayoría de los municipios con mayor vulnerabilidad al cambio climático. Dicha red constituye un medio de recolección y almacenamiento de agua, además de ser integradora de los procesos naturales y antrópicos que ocurren dentro de la cuenca (Ley de Aguas Nacionales, 2016).

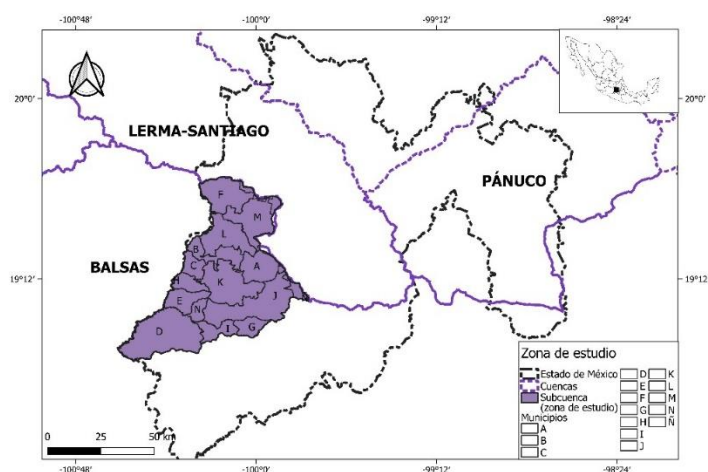
La delimitación de esta subcuenca se generó a partir de un modelo digital de elevación (MDE), obtenido del Geoportal CGIAR-CSI que proporciona datos digitales de elevación de 90 m

⁸ Conjunto de líneas y cruces conectados con reglas que se utilizan para representar y modelar el comportamiento de una infraestructura de red común en el mundo real.

representados en mosaicos de 5° x 5° por la misión topográfica radar del transbordador espacial de la NASA (SRTM). Para identificar al Estado de México, se utilizaron dos mosaicos de la zona 16 (8 y 9) y la zona 17 (8 y 9) GCS 4326/WGS 84, DATUM 6326/WGS1984, Elipsoide 7030 (Jarvis et. al., 2008), los cuales fueron fusionados con ayuda de la herramienta de “Mosaic to New Raster” ubicada dentro del Arctool box del programa de cómputo ArcGis 10.5.

El mosaico creado fue georreferenciado a las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), las cuales fueron utilizadas en todo el proyecto; se empleó la herramienta de hidrología ubicada dentro del Arctool box del software ArcGis 10.5 (Arias, 2019). En donde, se utilizó la herramienta Fill Sinks para rellenar las imperfecciones que presentaba el mosaico creado. A partir de esta corrección, se empleó la herramienta Flow direction, lo que permitió conocer la dirección del flujo de agua en la zona mediante el camino descendente de una celda a otra a partir de los datos ubicados dentro del mosaico. A continuación, se creó un nuevo mapa raster con la opción Flow Accumulation que determinó el número de píxeles aguas arriba que se vierten sobre los píxeles que representan aguas abajo. Finalmente, se empleó la herramienta Basin, con lo que se determinó la subcuenca que representará a los municipios con mayor vulnerabilidad al cambio climático y que se muestra a continuación (Fig. 7):

Figura 7. Subcuenca hidrológica.



Fuente: Elaboración propia a partir de DEM obtenido en el CGIAR.

Esta subcuenca tiene un área de 3,617 Km² y se localiza dentro de la Cuenca del Río Cutzamala en la región Balsas. La vegetación predominante de esta zona es el bosque de pino, encino y oyamel, así como vegetación secundaria arbórea y arbustiva de pino, encino y oyamel, pastizales, y una parte considerable de selva baja caducifolia en la parte norte (INEGI, 2021).

El suelo está conformado por andosoles, acrisoles, cambisoles, vertisoles, un poco de litosol y feozem, cuyas características han permitido que en gran parte de la zona se generen actividades económicas encaminadas a la agricultura de riego y temporal principalmente, así como aquellas enfocadas al ecoturismo, pero sobre todo al comercio y a los servicios (CAEM, 2023).

Dentro de esta subcuenca, se encuentran los municipios de San José del Rincón, Villa Victoria, Villa de Allende, Donato Guerra, Amanalco, Ixtapan, Valle de Bravo, Santo Tomás, Otzoloapan, Zacazonapan, Luvianos, Temascaltepec, San Simón Guerrero, algunos de los cuales coinciden con la Tabla 1, (presentada anteriormente). De esta manera, y una vez definida la subcuenca, se analizó la evolución cuantitativa de cada uno de los SE estratégicos que estudiaremos para que, en el próximo capítulo, se vincule con el posible escenario de cambio climático que se deriva de la concentración representativa (RCP) 8.5 con la finalidad de tener una idea de los impactos más severos que se podrían esperar de no lograr cumplir con los objetivos de los compromisos adquiridos por México en los diversos instrumentos internacionales de cambio climático a los que está inscrito, y de homologar la RCP que se utilizó en el diseño del estudio realizado para conocer el nivel de vulnerabilidad de los municipios.

Para cumplir con lo descrito anteriormente, el primer análisis será el del SE de provisión hídrica, para lo cual, determinamos el balance hídrico superficial de la subcuenca.

2.1 Servicio ecosistémico de provisión hídrica

A medida que la población y su demanda de bienes y servicios intensivos en agua crece, los componentes ecosistémicos que aseguran la provisión hídrica se someten a una gran presión por el uso insostenible del recurso y por aspectos relacionados con el cambio en el uso de suelo, incremento en infraestructura y urbanización, contaminación, mala gestión, entre otros. Esto ha modificado la disponibilidad y calidad del agua, perjudicando a la sociedad en temas como la alimentación, salud y calidad de vida.

Por lo que es necesario generar estrategias de gestión integral a corto, mediano y largo plazo desde una visión holística, de manera en que la sociedad y sus distintos estratos sociales y económicos puedan hacer uso de los recursos hídricos que necesiten, a la par en que se proteja la capacidad natural de adaptación y resiliencia de los ecosistemas. Para ello, es necesario contar con información puntual del estado actual del recurso en la zona de estudio, con la finalidad de proyectar su posible evolución (López, et. al, 2021), pero, sobre todo, su comportamiento ante los efectos del cambio climático en las próximas décadas.

La manera de generar esta información dependerá del objetivo y el enfoque deseado, por ejemplo, si se busca relacionar variables como el cambio de uso de suelo con la cantidad de agua que debiera abastecer una zona en específico, el método para ello puede ser a través de

software como el InVest® en su módulo WY (Gaspari et. al, 2021). Si además de la cuantificación, se busca analizar la calidad del recurso, el método a utilizar deberá considerar normas internacionales respecto a la aceptación de metales, minerales, residuos, entre otros dentro de las fuentes del recurso (Morales, 2021) y las distintas metodologías de muestreo que se pueden utilizar.

Si el objetivo está relacionado con la cuantificación de la provisión natural del agua de manera superficial en una subcuenca, la cual se ha diseñado a partir de sistemas de información geográfica, en donde se consideró un análisis de las variables que interactúan dentro del ciclo hidrológico; la metodología empleada será aquella relacionada con el cálculo del balance hídrico superficial (Cervantes et. al, 2021). Tal y como se realizó en análisis enfocados al cálculo del balance hídrico medio de una región considerando elementos climáticos y edáficos que afectan la disponibilidad del agua (Thornwaite & Mather, 1955), estudios similares en Ecuador, para la reserva hídrica del paraíso (Mediavilla, 2021); la cuenca de Guadalquivir ubicada en Tarija, Bolivia (Villena et., al, 2021); la subcuenca del río Subachoque en el municipio de Madrid, Colombia (Sánchez & Herrera, 2021) o algunos ejemplos similares dentro de la República Mexicana como el de Veracruz (De la Rosa, 2021), en donde la medición del balance hídrico medio se modela a partir de sistemas de información geográfica (QGis y ArcGis); el caso del estudio de algunas subcuencas del centro de México en donde se determinó la influencia del cambio de uso de suelo respecto a la disponibilidad hídrica (Ruíz, 2022).

Cabe destacar que, en cualquiera de estos ejemplos se destacó la complejidad que representa la simulación hidrológica de las distintas zonas de estudio y la importancia de contar con información completa de las variables climáticas de temperatura y precipitación. En algunos casos, la estimación de variables como la evapotranspiración e infiltración conllevan cierto grado de error debido a que su cálculo no es *in situ* (Dimitriadou & Nikolakopoulos, 2021; Diouf *et al.*, 2016). Considerando esto, realizamos el cálculo del balance hídrico superficial de la zona de estudio a partir de una serie de cálculos empíricos.

2.1.1 Balance Hídrico Superficial

El balance hídrico superficial (BHS) representa la valoración del agua en el suelo en un intervalo de tiempo determinado, generalmente a través de un año (Leiva, 2012); la información que se desprende de ello se engloba en dos parámetros fundamentales: la precipitación media y la evapotranspiración. Para su cálculo, se asumen una serie de simplificaciones (adecuadas a una medición anual), las cuales son: a) el único aporte del agua proviene de la precipitación, b) respecto a salidas, solo se considera la evapotranspiración, c) se asume que no hay percolación por aguas superficiales y subterráneas afluentes y efluentes o acceso capilar, d) el contenido de humedad para un determinado periodo está totalmente disponible para el periodo siguiente sin importar su cantidad, e) no existen aportes de riego,

f) la precipitación que se pierde por escorrentía superficial y que no llega a penetrar en el suelo se considera nula y g) la diferencia entre el flujo subsuperficial entrante y saliente en el balance diario se considera nulo (Botey & Moreno, 2015). Estas simplificaciones se aducen, ya que la variación de almacenamiento de los cuerpos de agua y las salidas y entradas de agua subterránea se compensan durante un año.

Con base en estas consideraciones y en preceptos como el de la UNESCO (1982), quien menciona que para este tipo de análisis se deben considerar datos históricos continuos de variables climáticas no menor a 15 años; y las de Marroquín (2016), quien destaca que se debe contar con información de mínimo 3 estaciones meteorológicas dentro de la misma, se llevó a cabo el cálculo del BHS en la zona de estudio. Para ello, se determinó la periodicidad con base en los criterios de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), quien menciona que para este tipo de estudios se debe contemplar una serie histórica de datos de 30 años (normales climáticas), deben tener un mínimo de 70% de información recabada, ya que la falta de información puede cuestionar los resultados finales (WMO, 2018).

Con este fin, se empleó la siguiente ecuación (ec. 2) en el cálculo del balance hídrico medio de la subcuenca (Ordoñez, 2011), durante el periodo de 1991-2020, el cual se dividió en temporada de estiaje comprendido del mes de noviembre a mayo y en temporada de lluvias que abarca los meses de junio a octubre (Meza-Rodríguez et. al., 2017; López-Enríquez et. al., 2013; Acosta, 2025); lo anterior, a partir de la información recabada de las estaciones climáticas que inciden en esta zona.

$$Pm - ETr = Esc + Inf \quad 2$$

Donde:

Pm = Precipitación media (mm),

Etr = Evapotranspiración (mm),

Esc = Escorrentía superficial (mm), y

Inf = Infiltración (mm).

a) Precipitación media (pm)

Bajo este esquema, y como se mencionó anteriormente en los preceptos considerados para el estudio de esta subcuenca, la precipitación representa el único aporte hídrico al suelo; una parte de ello es interceptada por la cobertura vegetal de la zona, otra percola debajo de las raíces o escurre sobre la superficie del terreno y se infiltra (Saseendran, 2015).

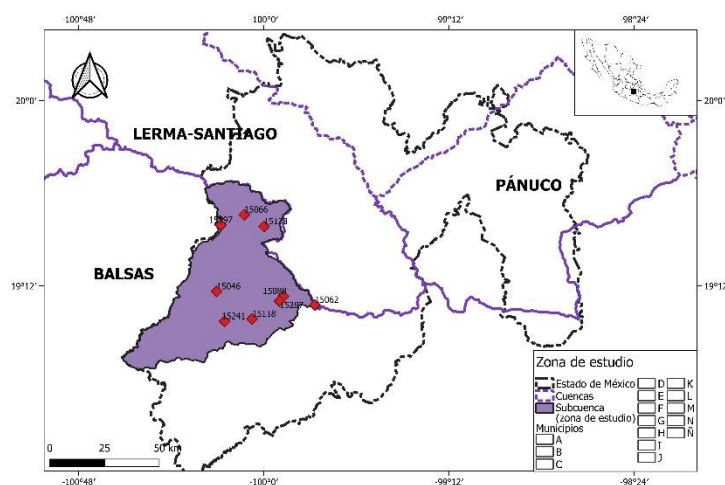
Debido a la complejidad que representa la medición de la precipitación media, su estimación se realiza a través de funciones empíricas como: a) el uso del porcentaje fijo (Smith, 1993); b) la media aritmética que representa la media de los valores de precipitación entre las estaciones pluviométricas dentro de la subcuenca (Romero et. al, 2015); c) el método de Thiessen determinado a partir del área de influencia dentro del perímetro en donde se ubican

los pluviómetros y es representado por polígonos irregulares (Calabrese, et. al, 2022); y d) el cálculo a partir de isoyetas que se realiza a partir de curvas que representan la distribución areal de las precipitaciones (Nieves-Vilchez, et. al, 2022).

En este caso, se optó por utilizar la metodología de isoyetas, debido a que su elaboración requiere, además de las mediciones puntuales de precipitación, ubicación exacta de las estaciones, variables de tipo de suelo y de elevación, con lo que se reduce el error que pudiera existir al utilizar alguna de los métodos ya mencionados (Pizarro & Flores, 2003; Vigil, et. al, 2022). Para este trabajo de investigación se realizaron 60 mapas de isoyetas de manera anual y por cada una de las temporadas, con la finalidad de calcular los 30 años de las normales climáticas requeridas para realizar una proyección del escenario de cambio climático que se mostrará en el siguiente capítulo.

Bajo este contexto, se analizó la calidad de la información de cada una de las estaciones que se ubicaban dentro del territorio de la subcuenca (Fig. 8) para el periodo de 1991-2020.

Figura 8. Ubicación estaciones climáticas.



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

Estas 9 estaciones contaban con cerca del 80% de información climática para el periodo considerado en este estudio, como se muestra a continuación (tabla 2):

Tabla 2: Estaciones climatológicas analizadas.

Período de análisis (1991-2020)						
Estaciones	Precipitación		Tmáx.		Tmín.	
	Datos	%	Datos	%	Datos	%
15062	9883	90.20	8815	80.45	8798	80.30
15046	8856	80.83	8764	79.99	8761	79.96
15066	10018	91.43	9802	89.46	9850	89.90
15088	9708	88.60	9624	87.83	9697	88.50
15118	8946	81.65	8892	81.15	8929	81.49
15133	8769	80.03	8771	80.05	8769	80.03
15241	9458	86.32	9411	85.89	9447	86.22
15197	8541	77.95	8767	80.01	8691	79.32
15287	10468	95.54	10401	94.93	10436	95.25

Fuente: Elaboración propia.

Por lo que se revisaron metodologías para complementar la información restante, y cumplir con las condicionantes del WMO respecto a control de calidad y pruebas de homogeneidad (WMO, 2011).

Dentro de las cuales encontramos el coeficiente de correlación (ec. 3), en donde debe existir un grado significativo de relación para poder considerar los valores normales de las estaciones próximas a la estación que se desea calcular, y así rellenar dichos periodos faltantes (Carrera-Villacrés, 2016).

$$P_x = \frac{1}{n} \cdot \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right] \quad (\text{ec. 3})$$

En donde,

n: Es el número de estaciones pluviométricas con datos de registro continuos,

P_x: Precipitación de la estación con datos faltantes (x) durante el periodo de tiempo a completa,

P₁ a P_n: Precipitación de las estaciones auxiliares durante el periodo de tiempo a completar.

N_x: Precipitación media de la estación (x), y

N₁ a N_n: Precipitación media anual de las estaciones auxiliares (Monsalve, 1999).

Sin embargo, en este caso la proximidad de las estaciones no era la adecuada para hacer uso de esta metodología, por lo que se revisaron algunos programas de cómputo que cumplieran con los parámetros de la WMO (Tabla 3).

Tabla 3: Programas de cómputo para complementar series climáticas.

Programas de cómputo	VENTAJAS	DESVENTAJAS
----------------------	----------	-------------

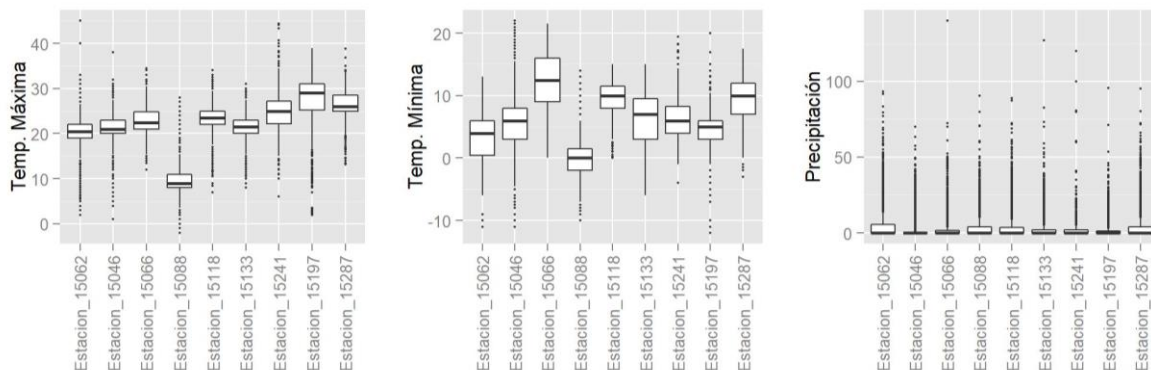
ACMANT	• Analiza datos diarios y mensuales • Sólo utiliza un método de corrección ANOVA. • Sólo tolera 100 series • Está escrito en Windows	Se desarrolló específicamente para la variable de temperatura
CLIMATOL	• Analiza datos diarios y mensuales • Su correlación se lleva a cabo mediante el relleno de datos faltantes • El límite de series que calcula es imposible de conocer • Está escrito en R	No precisa la compilación de data generada
Anclim	• Analiza datos diarios, mensuales y anuales • El límite de series que calcula es imposible de conocer • Está escrito en R	Dificultad de automatización
MASH	• Analiza datos diarios y mensuales • Su método de corrección es con base en comparación múltiple • Solo tolera 100 series • Está escrito en Windows	Dificultad de automatización
RHTestV3	• Analiza datos diarios y mensuales • Su método de corrección es mediante regresiones múltiples • Solo tolera 1 serie de tiempo a la vez • Está escrito en R	No construye las series de referencia automáticamente
USHCN	• Analiza datos mensuales • Su método de corrección es con base en comparación múltiple • El límite de series que calcula es imposible de conocer • Sólo funciona con versión Linux	
HOMER	• Analiza datos mensuales • Sólo utiliza un método de corrección ANOVA • El límite de series que calcula es imposible de conocer • Está escrito en R	No precisa la compilación de data generada
RCLIMTOOL	• Analiza datos diarios • Su método de corrección incluye: Test de normalidad (shapiro - wilk, Kolmogorov – Smirnoof, Jarque Bero); Test para tendencia (rango de correlación de Spearman y Mann – Kendall); Test para estabilidad de varianza (Test- F y Test – Siegel - Turkey); Test para la estabilidad media (Test – T y Test U Mann – Whitney) • El límite de series que calcula es imposible de conocer • Está escrito en R	Sólo admite datos diarios

Fuente: Organización Meteorológica Internacional (WMO, por sus siglas en ingles).

Aunque algunos de estos programas de cómputo cuentan con un alto grado de certidumbre las variables requeridas para implementarlos son imposibles de conseguir para la zona de estudio, por lo que se consideró utilizar la opción de RCLimTool (Llanos-Herrera, 2014), cuyas características y requerimientos eran los más adecuados para completar las series de tiempo en las que estamos trabajando. El método que utiliza este programa de cómputo se basa en modelos vectoriales autorregresivos, mediante el cual se implementan series de tiempo multivariadas VAR basadas en el registro de información diaria de precipitación y temperatura

(RMAWGEN, 2013), el método fue el siguiente: se cargó la información de las normales climáticas incompletas al programa por estación, como se muestra a continuación (Fig. 9):

Figura 9: Normales climáticas incompletas

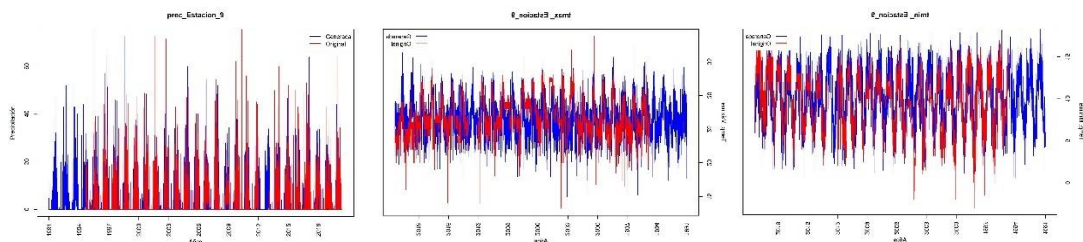


. Fuente: Elaboración propia a partir de informa de RCLimTool.

A partir de algoritmos de verificación, el programa detectó y eliminó valores atípicos en función de reglas climatológicas definidas con base en los requerimientos de calidad por parte de la WMO (2017). Se identificaron y eliminaron registros con ciertas anomalías como: temperaturas mínimas superiores a las máximas, cambios abruptos no justificados o precipitaciones excesivas aisladas, estos valores fueron clasificados como inconsistentes por el programa debido a que su comportamiento y retención habría distorsionado el análisis de tendencias climáticas, extremos y cálculos climáticos significantes (CIIFEN, 2020).

Una vez realizada la depuración, se procedió al relleno de datos faltantes a través de métodos estadísticos en donde el programa consideró la estructura temporal y estacional de cada variable, así como su relación con los datos validos adyacentes. De esta manera se obtuvieron resultados como los siguientes (Figura 10):

Figura 10: Información generada a través del programa de cómputo RCLIMTOOL

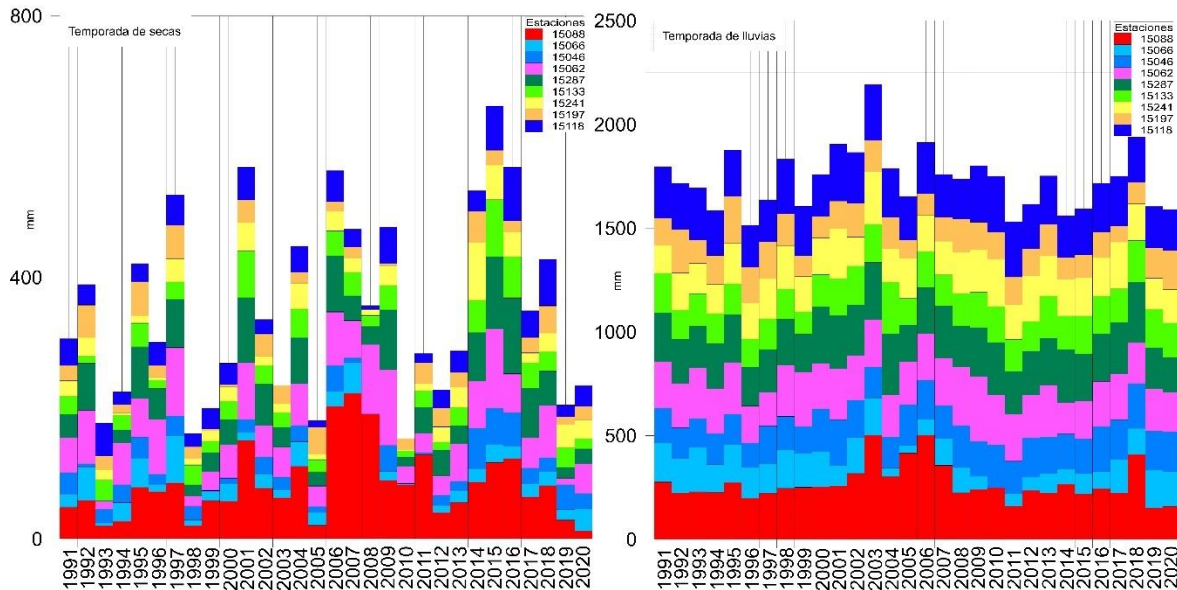


Fuente: Elaboración propia a través de reporte de RCLimTool.

El resultado de las normales climáticas completas (datos originales en rojo, datos generados en azul), fue analizado a través de pruebas de homogeneidad (normalidad, tendencia, estabilidad en la varianza y estabilidad en la media) para cada variable, en el caso de la temperatura mínima; los valores variaron de entre -10°C y 22.67°C, los datos no presentaron

una distribución normal, lo cual es común en datos climáticos diarios por las asimetrías que representa la temperatura mínima; la tendencia fue estadísticamente significativa (aumento o disminución en la variable). En el caso de la temperatura máxima, se presentó una distribución normal, la mayoría de las estaciones evidenciaron tendencias estadísticamente significativas en las temperaturas máximas según las pruebas de Spearman y Mann-Kendall sugiriendo un cambio consistente y probable asociado a variaciones climáticas regionales. Por último, para el caso de la precipitación se observó que la mayoría de las estaciones no mostraron cambios estadísticamente significativos con relación a la prueba de Mann-Kendall y el rango de correlación de Spearman, para la media, la mayoría de las estaciones mostraron estabilidad según la prueba de U de Mann-Whitney. Obteniendo así, los siguientes resultados de promedio anual para cada una de las temporadas (Fig. 11).

Figura 11. Datos completos de precipitación anual por temporada dentro de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia a partir de información resultante del software RCLimTool.

Una vez que se obtuvieron las normales climáticas completas, se interpoló la variable de precipitación a partir de la unión de puntos con igual valor proporcionando un plano con la distribución aproximada de la precipitación media de la subcuenca únicamente para los periodos de estiaje y lluvias, siendo este uno de los métodos más exactos para la obtención de isoyetas (Iñiguez, M., 2011).

Para lo cual se empleó la siguiente expresión (ec. 4):

$$P_m = \sum_{i=1}^n \left(\frac{((P_i + 1 + P_i)/2) * S_{i+1}, i)}{St} \right)$$

Donde: (4)

P_m = Precipitación media (mm/ temporada),
 P_{i+1} = Precipitación de la isoyeta $i+1$ (mm),
 P_i = Precipitación de la isoyeta,
 S_{i+1} , i = Superficie entre dos isoyetas consecutivas, y
 S_t = Superficie total (km²).

El cálculo de esta fórmula se llevó a cabo con ayuda de la herramienta de interpolación del software ArcGis 10.5 (Fallas, 2007), resultando en mapas de isoyetas a partir de la función de la distancia inversa ponderada (IDW). En donde se utilizaron los promedios anuales de precipitación resultantes del proceso anterior (RCLIMTOOL) para cada una de las temporadas; se calculó el área del polígono que resultaba de las isoyetas calculadas de manera anual y por temporada, se calculó el espacio entre al área de cada isoyeta; el total se dividió por el promedio de la precipitación obtenida de las isoyetas para cada año y temporada. El tratamiento en este proceso incluyó las condiciones de frontera, utilizando la opción de “processing extent” y “raster análisis”, resultado fue el siguiente (tabla 4):

Tabla 4: Resultado de la variable de precipitación de RCLIMTOOL.

Estiaje					
Año	mm	Año	mm	Año	mm
1991	100.2	2001	185.3	2011	112.7
1992	265	2002	142.9	2012	172.3
1993	101.4	2003	119.6	2013	100
1994	160.8	2004	166.4	2014	188
1995	128.7	2005	100	2015	148.5
1996	173.9	2006	177.6	2016	210.2
1997	173.9	2007	258.7	2017	141.7
1998	103.2	2008	156.5	2018	169.4
1999	101.5	2009	161.5	2019	193.6
2000	103.4	2010	157.7	2020	114
Lluvias					
Año	mm	Año	mm	Año	mm
1991	763.5	2001	769.2	2011	677.6
1992	878.7	2002	804.2	2012	678.9
1993	832.6	2003	1016.5	2013	744.6
1994	740.7	2004	727.3	2014	674
1995	780.6	2005	694.7	2015	715.7
1996	772.5	2006	824.2	2016	680.8
1997	721.4	2007	820.5	2017	747.1
1998	893.3	2008	781.3	2018	840.7
1999	789.4	2009	739.4	2019	715
2000	759.2	2010	600.7	2020	528.4

Fuente: Elaboración propia.

La interpolación por este método (IDW), fue considerada debido a que estima los valores de las celdas calculando promedios de la información de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más se acerca a un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio (Peterson E., 2017).

Dicha metodología sobresalió de otras como el kriging, ya que representa mejor el comportamiento espacial de la precipitación, obteniendo menores errores absolutos en la comparación de los valores interpolados contra los observados, además de que para utilizar kriging se requiere un número considerable de puntos de muestreo (Vargas et. al, 2011).

Este proceso nos permitió cuantificar la precipitación media de la zona siendo en promedio de 757.1 mm para la temporada de lluvias y de 153 mm para la temporada de estiaje, representando de esta manera, la entrada principal del recurso a la subcuenca; dicha información sirvió de base para analizar las variables de evapotranspiración, escurrimientos e infiltración.

b) Evapotranspiración

La evapotranspiración es el proceso mediante el cual, el total del agua que precipita en una zona en específico es transformada en vapor por una cobertura vegetal que incluye la evaporación desde el suelo, la evaporación del agua interceptada y la transpiración por las estomas de las hojas (Sociedad Geográfica de Lima, 2011), su cálculo es importante para el ciclo hídrico ya que constituye un factor clave en la relación entre la litosfera y atmósfera (Cárdenas, et. al, 2021).

Sin embargo, su cálculo es complicado debido a la lentitud y continuidad de pérdida de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera; para ello, se utilizan métodos directos e indirectos basados en la clasificación de cada uno de los componentes que interactúan. Por ejemplo, existe el caso de la evapotranspiración potencial (ETp) o de referencia (ETo), la cual es representada por la cantidad máxima de agua que podría perderse hacia la atmósfera si no existieran límites en su suministro, es decir, que la superficie fuera abastecida de agua constantemente, como es el caso de algunas prácticas agrícolas y gramíneas o pastos (Instituto Geográfico Nacional, 2018a).

Su cálculo puede ser de manera empírica basada en formulas como la de Penman-Monteith (FAO, 1998); la de Thorthwaite; la de Christiansen; la de Blanney-Criddle; la de Hargreaves y la de Turc (López Urrea, 2004) o *in situ* a través de instrumentos como el tanque evaporímetro, y lisímetros; la elección de cada uno de ellos dependerá de los recursos, la disponibilidad de la información con que se cuenta, así como la exactitud y precisión en que el modelo se comporte dentro de una zona en específico, debido a las variables que interactúan para su cálculo (Carvalho, et. al, 2013) como se muestra en la siguiente tabla (5):

Tabla 5: Variables necesarias para el cálculo de la evapotranspiración

Métodos para cálculo de evapotranspiración	Variables requeridas
Penman-Monteith	radiación extraterrestre y de superficie de cultivo, el flujo del calor de suelo, velocidad del viento, temperatura, presión de vapor de saturación, constante psicométrica
Método de Thorthwaite	índice de calor mensual y anual, temperatura, horas máximas del sol, y latitud. Para el método de Hargreaves, se requiere la radiación solar entrante de onda corta, temperatura media, máxima y mínima, y un determinado coeficiente para zonas costeras o internas
Método Christiansen	la radiación tomada en el tope de la atmósfera calculada de acuerdo con la constante solar cuyo valor medio es de 1367.7 W/m ² , temperatura, velocidad del viento, humedad relativa, porcentaje de brillo solar medio, del mes y teórico, y la elevación
Método de Turc	coeficiente específico para cada mes (dependiendo del total de días), temperatura y radiación solar (Bertel & Burgos, 2020)

.Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de las distintas formas de cálculo de evapotranspiración.

De acuerdo con la literatura (Song, et. al, 2019; Celestin, et. al, 2020; McColl, 2020; Moratíel, et. al, 2020) el método más idóneo para estimar la ETp es el de Penman-Monteith. Sin embargo, dicho método es comúnmente utilizado en zonas pequeñas y con características específicas y cuya funcionalidad es básicamente la agricultura, su cálculo se lleva a cabo bajo el supuesto de no existir límites en su suministro. Algo que no pasa en la zona de estudio, en donde además de existir zonas agrícolas, también existen urbanas, bosques, y praderas, en donde cada tipo de planta evapotranspira una cantidad de agua diferente; adicional a ello, la extensión es mayor y no homogénea como se requiere para este tipo de análisis, por lo que para nuestro fin no representaría una opción.

Por otro lado, tenemos la evapotranspiración real (Etr), que es la que se produce realmente bajo las condiciones meteorológicas de humedad de suelo y vegetación existentes en un lugar y durante un tiempo determinado, su análisis puede llevarse a cabo de forma directa, a través de la covarianza de torbellinos (Aguilar et. al, 2021), ecuaciones de correlación precipitación-humedad con base en muestras del suelo (Belmonte & Romero, 2006). Los evaporímetros de papel poroso, o de manera semiempírica utilizando información de estaciones meteorológicas extrapolándola a escalas mayores, lo cual representa un monitoreo de un área mayor y no implica gran costo, debido a que para su estimación no se requiere instrumentación específica (Rivas et. al, 2011). Un ejemplo de ello es el método de Turc, utilizado cuando solo se dispone de información de precipitación y temperatura a partir de la cual se obtiene la radiación global incidente o la fórmula de Coutagne la cual es creada a partir del supuesto del déficit de escorrentía, es decir, el agua que no ha generado escorrentía debe haberse perdido por evapotranspiración (Román et. al, 2017).

Otro ejemplo de cálculo para esta variable es a través de la evapotranspiración de cultivo de referencia (Etc), que representa una forma de evaluar las necesidades potenciales del agua en los cultivos y es aquella que se produce cuando no existe restricción en el agua del suelo, en donde se encuentra el cultivo e interactúan características propias del mismo, como el periodo vegetativo y variables como la temperatura, viento y humedad relativa. Su análisis está regulado por la demanda atmosférica dada por las condiciones meteorológicas y por factores que determinan el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Della Maggiora et al., 2000). La Etc se obtiene a través de un coeficiente de cultivo de referencia y uno en particular, la altura, el albedo, la resistencia de transferencia de vapor de agua, y la evaporación del suelo (Giménez & García, 2011), pero para nuestro caso en especial, no aplicaría su cálculo.

Tomando como referencia la complejidad de cada uno de los métodos descritos anteriormente, la información y los recursos requeridos para su análisis; identificamos que, para el área de estudio, se cuenta con las variables necesarias para llevar a cabo el cálculo de la evapotranspiración a través del método empírico de la fórmula de Coutagne (ec. 5) ya que los datos obtenidos en la zona de estudio cumplen con los requeridos, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Etr = Pm - X * Pm^2 \quad X = \frac{1}{0,8+0,14*T} \quad (5)$$

Donde:

Etr: Evapotranspiración real (mm/temporada),

Pm: Precipitación media (mm/temporada), y

T: Temperatura media anual (°C/temporada).

Una vez que se aplicó esta ecuación, se obtuvieron los siguientes resultados para evapotranspiración (estiaje y lluvias) en la zona de estudio (Fig. 12).

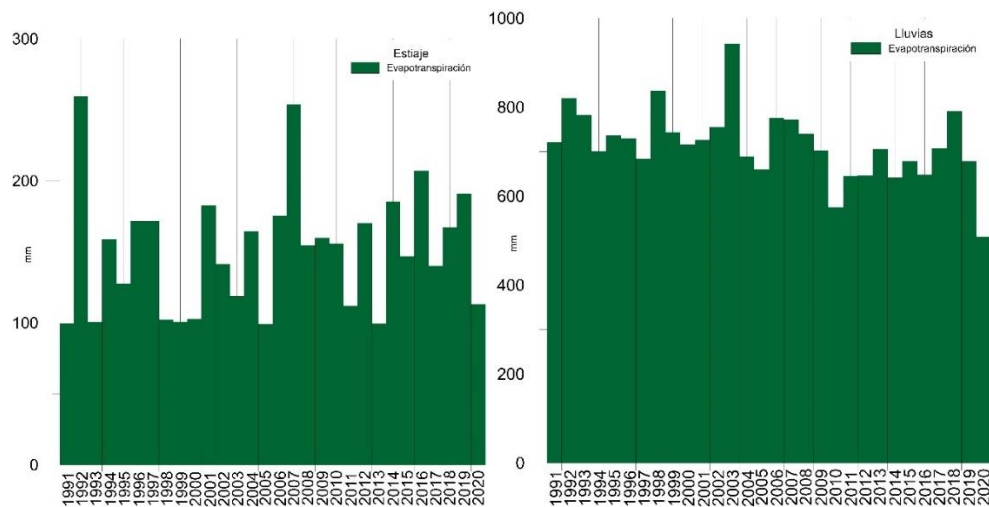


Figura 12. Resultado de la evapotranspiración real por temporada. **Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados representados en esta gráfica nos muestran el comportamiento de la evapotranspiración para cada una de las temporadas, calculada a partir de la fórmula de Coutagne, en donde, para la temporada de estiaje se observa cierta estacionalidad, mientras que para la temporada de lluvias se muestra una ligera disminución en los últimos años respecto al inicio del periodo de análisis.

c) Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial corresponde al agua proveniente de la precipitación promedio y que circula sobre la superficie terrestre llegando a una corriente (en la mayoría de los casos) para ser drenada hasta la salida de la subcuenca (Hierrezuelo, 2016), a través de su cálculo se determinan las potencialidades hídricas superficiales, por lo que se convierte en un factor fundamental al momento de diseñar acciones de gestión hídrica integral en una zona en específico (Rodríguez-Moreno, et. al, 2021).

Al igual que la evapotranspiración, el cálculo del escurrimiento superficial se puede realizar a partir de algunos métodos indirectos, como son; a) el método de curvas de intensidad-duración-periodo de retorno, que se puede modelar a través de sistemas de información geográfica para obtener un aproximado del proceso de escurrimiento en una zona en específico (Agreda, Parra & Flores, 2021), b) el método Ven Te Chow basado en hidrogramas unitarios (Valenzuela, 2022), o c) el método de la curva (SCS-CN) el cual considera la intensidad y duración de la lluvia en 24 hrs. (Montiel et. al, 2019), entre otros.

Para su cálculo, se requieren algunas variables como: a) área de la cuenca, b) precipitación media, c) forma de la subcuenca, d) pendiente, e) vegetación (en este caso, fue calculada a partir de las 7 series de mapas de conjuntos de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación del INEGI), f) distribución de la lluvia en tiempo y espacio, entre otros. Debido a temas como tiempo e intensidad (hrs.) de la lluvia y considerando la información con que contamos en el

área de estudio, el cálculo del escurrimiento superficial se realizó con base en la metodología indirecta que plantea la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), publicada en la NOM-11-2015 (ec. 7):

$$V_m = C_e * P_m * A \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

V_m : Volumen medio que puede escurrir (m^3 /temporada estiaje o lluvias),

A : Área de la cuenca (km^2),

P_m : Precipitación media de cada una de las temporadas, y

C_e : Coeficiente de escurrimiento (adimensional), el cual se explica a continuación.

Para calcular el coeficiente de escurrimiento (CE), se consideró información de las variables del tipo de suelo, sus características y la cobertura vegetal de la zona de estudio; en el caso de las primeras dos, se estimaron las funciones de permeabilidad, y en el caso del último, se le asignó un coeficiente al uso de suelo establecido en la NOM-011-2015 (DOF, 2015) y que se muestra a continuación (tabla 6):

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:	0,24	0,27	0,30
En Hilería	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,14	0,20	0,28
Pastizal:	0,20	0,24	0,30
% del suelo cubierto o pastoreo	0,24	0,28	0,30
Más del 75% - Poco -	0,07	0,16	0,24
Del 50 al 75% - Regular -	0,12	0,22	0,26
Menos del 50% - Excesivo -	0,17	0,26	0,28
Bosque:	0,22	0,28	0,30
Cubierto más del 75%	0,26	0,29	0,32
Cubierto del 50 al 75%	0,27	0,30	0,33
Cubierto del 25 al 50%	0,18	0,24	0,30
Vegetación secundaria menos del 25%	0,10	0,15	0,20
Zonas urbanas menos del 25%	0	0	0
Caminos			

Tabla 6: Variables para calcular el factor K. Fuente NOM-011-2015, CONAGUA.

Esta clasificación se llevó a cabo considerando el conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000 de las 7 series del INEGI (1984, 1997, 2003, 2010, 2013, 2016 y 2021); con base en ello, se calculó el área de cada una de las clasificaciones, se agruparon en 5 bloques (bosques, agricultura, pastizal, vegetación secundaria y zona urbana), para conocer el porcentaje de cada una y se realizó una interpolación lineal para conocer los valores de manera anual, se realizó de esta manera debido a la poca información de cobertura de suelo con que se contaba, la discreción entre los datos y la ausencia de eventos disruptivos, con lo que los cambios en la cobertura vegetal suelen ser graduales; en tales casos la interpolación lineal proporciona una estimación razonable del comportamiento interanual (Chabot, 2012; Running et. al., 2004; Mackay et. al., 2003), a diferencia de una interpolación polinómica de alto orden o splines que pueden introducir oscilaciones irreales cuando los datos son escasos o irregulares (Press et. al., 2002). Con la información anual obtenida de la interpolación, (Anexo 1). Se sobrepuso un mapa de tipo de suelo, obtenido de los datos vectoriales del INIFAP y CONABIO (2021), con base en ello, se determinó el valor dependiente de la variable (K), obtenido a partir de la subdivisión de la subcuenca en zonas homogéneas, y se calculó el promedio ponderado de todas ellas. Dicha variable osciló en 0.14 ya que, los cambios identificados con la interpolación no superaron el 50% de la cobertura de cada una de las clasificaciones del suelo. Con esta información se calculó el coeficiente de escurrimiento anual, considerando la siguiente fórmula establecida en la NOM-011:

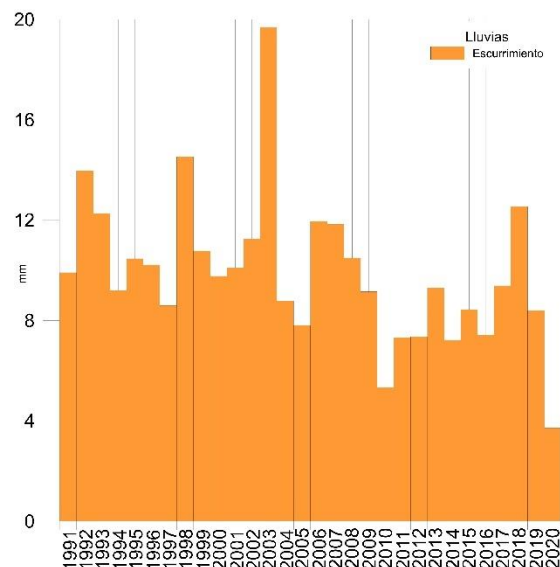
Tabla 7: Ecuaciones para el cálculo del coeficiente de escurrimiento anual

K: Parámetro que depende del tipo y uso de suelo	Coeficiente de escurrimiento anual (Ce)
Si K es mayor que 0,15	$Ce = K (P-250) / 2000 + (K-0.15) / 1.5$

Fuente: Nom-011-CONAGUA

Una vez obtenido el Ce, se añadió el valor de la precipitación media y el área de estudio, obteniendo el siguiente comportamiento (Fig. 13):

Figura 13. Resultado del cálculo de escurrimiento superficial en temporadas de lluvias.



Fuente: Elaboración propia.

En este caso, la información mostrada para la temporada de lluvias muestra una ligera disminución en los últimos años del periodo estudiado, mientras que para el caso de la temporada de estiaje el resultado del cálculo fue cero debido que la mayor parte de la precipitación media se evapotranspira, el resto que cae a la superficie se infiltra.

d) Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual, el agua de lluvia ingresa al suelo a través de la superficie, hacia sus capas inferiores en forma vertical u horizontal; su cálculo dependerá de las características y comportamiento de algunas variables como: la precipitación, el tipo de suelo y su textura, humedad, la retención pluvial, la capacidad de infiltración de los suelos, la cobertura vegetal, el uso de suelo, y la pendiente del terreno (Villavicencio et. al, 2014). Este proceso es de suma importancia ya que fomenta la recarga de los acuíferos y la regulación de aportes hídricos a ríos (Villalba-Murrieta et. al, 2022).

Al igual que las demás variables, el cálculo de la infiltración se realiza a través de métodos directos o indirectos. Dentro de los métodos directos uno de los más utilizados es el de anillos concéntricos o infiltrometro de doble anillo de Muntz a partir del cual se satura con agua el espacio a evaluar entre dos anillos, midiendo así el tiempo de infiltración en el terreno (Mathieu et. al, 1998), otro método es el del permeámetro de disco, el cual ayuda a conocer la conductividad hidráulica saturada y densidad aparente del horizonte superficial del suelo sobre una zona en específico (Soracco, et. al, 2005), entre otros. Lo interesante de estos métodos, son su aproximación al proceso de infiltración; sin embargo, lo recomendable es llevarlo a cabo en zonas específicas de estudio.

De manera empírica, algunos métodos se basan en hietogramas, en donde se consideran las variables de intensidad, duración y recurrencia (Weber, 2013), el método de Green -Ampt en

donde se consideran las propiedades físicas del suelo, así como el movimiento del agua a través de un frente humedecido (Muñoz-Carpena, 2005), el método de Horton o Philip, los cuales se basan en ecuaciones en donde se relaciona la infiltración con el tiempo y las características del suelo, succión capilar y gravedad (Weber, 2015). Sin embargo, una vez que revisamos las variables con que contamos, específicamente a las relacionadas con el tiempo de lluvia, se observó que el método para calcular este proceso de manera empírica se llevaría a cabo con base en la ecuación de Monterroso-Rivas (2016).

$$\text{Inf} = \text{Pm} - \text{Etr} - \text{Vm}$$

(Ecuación 7)

Donde:

Inf = Infiltración (mm/temporada de estiaje y de lluvias)

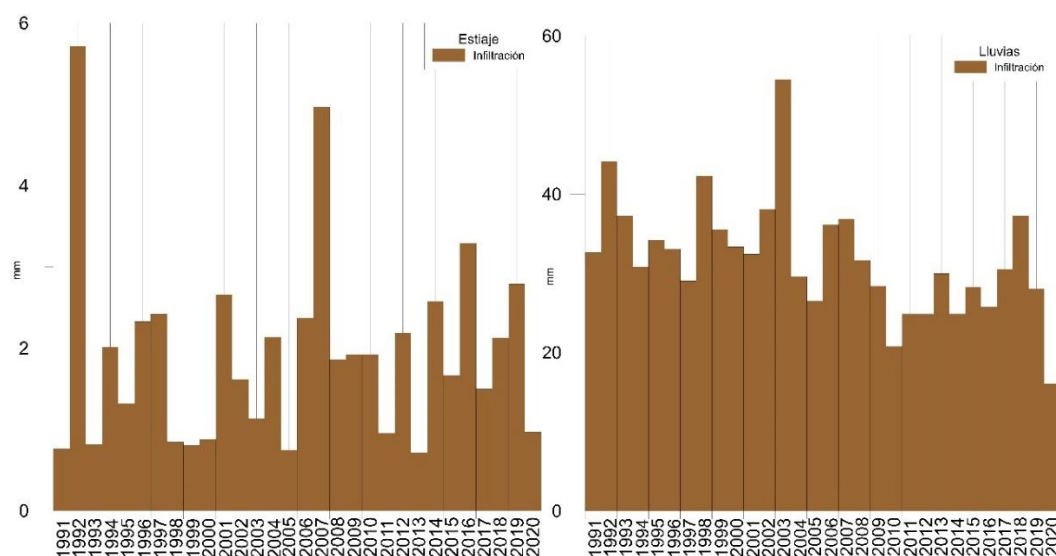
Pm = Precipitación media (mm/temporada de estiaje y de lluvias),

Etr = Evapotranspiración real (mm/temporada de estiaje y de lluvias),

Vm: Volumen medio que puede escurrir (m^3 /temporada de estiaje y de lluvias)

A partir de esta información, se obtuvieron los resultados de la Figura 14:

Figura 14. Resultado del cálculo de la infiltración por temporada.

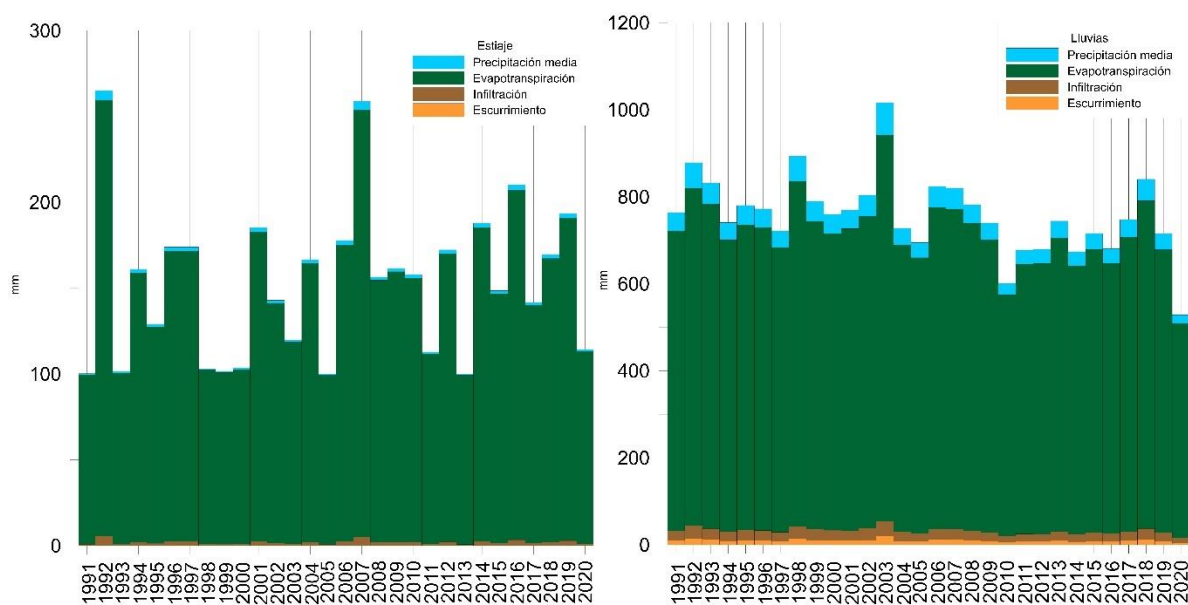


Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, en la época de estiaje la infiltración es muy poca; sin embargo, mantiene cierta estabilidad con algunos repuntes en años como el de 1992 y 2007, para el caso de la temporada de lluvias, se observa una disminución al final del periodo.

Con base en el análisis y cálculo de los procesos antes descritos, obtuvimos las siguientes gráficas para cada una de las temporadas (Fig. 15).

Figura 15. Resultado del balance hídrico superficial por temporada.



Fuente: Elaboración propia.

Con base en estos datos, observamos la importancia que tiene la precipitación media en cada uno de los cálculos realizados, por lo que, el más mínimo desequilibrio sobre esta variable alteraría las demás; que, aunado a aspectos antropogénicos, han incrementado la vulnerabilidad frente al cambio climático en la zona (EDOMEX, 2018). Ya que, si consideramos los posibles escenarios de cambio climático establecidos para el Estado de México, en donde se esperaría un incremento de 1.5 a 1.9°C, y cambios en la precipitación entre 5% y 8% de la lluvia acumulada anualmente al 2030 (INECC, 2018). El cálculo de estos procesos podría presentar una disminución, afectando los distintos sectores que dependen del vital líquido.

Para ello, en el siguiente capítulo se establecieron escenarios de cambio climático con base en la RCP8.5, con la idea de conocer los impactos más severos que se podrían esperar de seguir con la inacción que ha caracterizado algunas regiones del planeta.

2.2 SE de Regulación Climática

El servicio ecosistémico de Regulación Climática (SRec) contribuye a que las condiciones climáticas bajo las cuales vivimos, cultivamos, desempeñamos nuestras actividades económicas o regulamos los impactos a eventos extremos, no cambien (Balvanera, 2012). De acuerdo con Fisher et al. (2008), dicho servicio podría ser clasificado como final, ya que representa el beneficio último intangible que ayuda al ser humano y a cualquier ser vivo a subsistir.

De acuerdo con su naturaleza, el SRec dependerá de la diversidad funcional que se observe en la zona de estudio y estará relacionado con los componentes ecológicos o simbólicos que interactúan entre sí, en cuyo caso, podría analizarse en dos sentidos: el primero, relacionado con el secuestro biológico del carbono, y el segundo, a través del análisis de la relación entre el calor y la atmósfera para determinar la variabilidad que pudiera presentarse (Polania et al., 2011). Para el caso del presente trabajo de investigación, se analizó a partir de la segunda opción.

Para ello, consideramos a la radiación solar y los diferentes momentos que se generan a través de su ingreso y salida de la atmósfera terrestre, los cuales representan la fuente principal del clima, siendo el factor fundamental para la consolidación del SRec. En algunas ocasiones, los patrones climáticos se alteran temporalmente, debido a fases extremas de la variabilidad climática o pueden modificarse por largos períodos como resultado de los cambios climáticos (IDEAM-UNAL, 2018), por lo que es necesario conocer dichas anomalías con la finalidad de generar medidas de contingencia que permitan a la población una reacción preventiva.

En este sentido, se entiende a la variabilidad climática como el resultado de aquellos cambios sobre el clima que dependen de condiciones atmosféricas extremas y que exceden en mucho, a los promedios estándares durante un periodo de tiempo determinado; los fenómenos que producen estas variaciones pueden ser frentes fríos muy organizados, sequías prolongadas, huracanes, perturbaciones tropicales, y periodos con una humedad desproporcionada, entre otros (Sheila et. al, 2012).

Para conocer la variabilidad climática en la zona de estudio, se trabajó con la información de la temperatura registrada en las estaciones climatológicas que se encuentran en la subcuenca, como fue en el caso de la precipitación. Con base en ello, se crearon isotermas cuyo proceso radica en la interpolación de temperatura mínima, máxima y promedio (Casillas-Higuera, 2014).

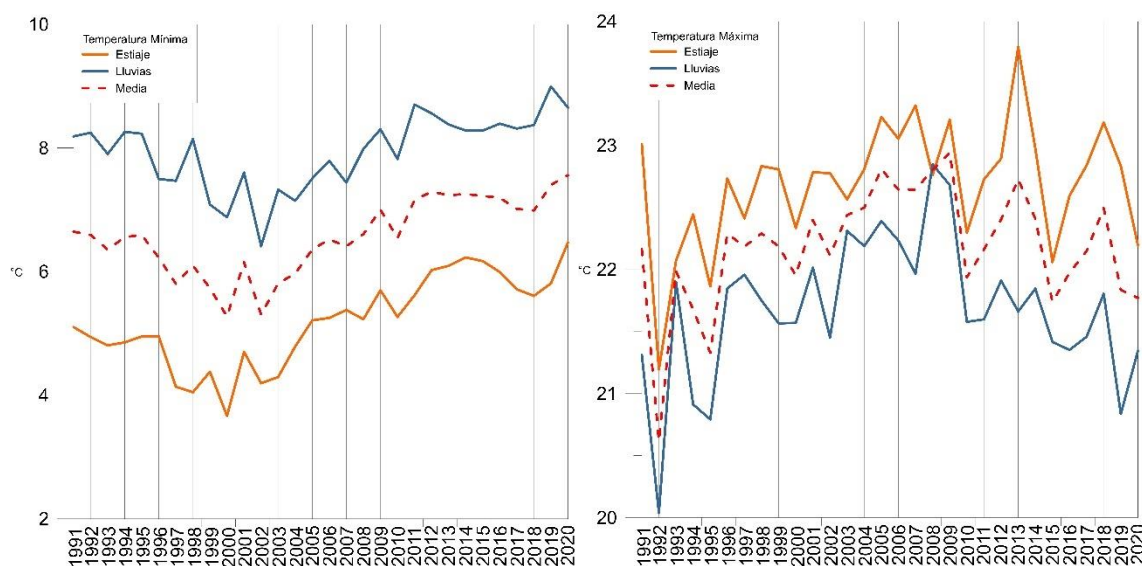
Con lo que se observó, que, para el caso de la temperatura mínima; los valores variaron de entre -10°C y 22.67°C , los datos no presentaron una distribución normal, lo cual es común en datos climáticos diarios por las asimetrías que representa la temperatura mínima; la tendencia fue estadísticamente significativa (aumento o disminución en la variable). En el caso de la temperatura máxima, se presentó una distribución normal, la mayoría de las estaciones evidenciaron tendencias estadísticamente significativas en las temperaturas máximas según las pruebas de Spearman y Mann-Kendall sugiriendo un cambio consistente y probable asociado a variaciones climáticas regionales (Llanos-Herrera, 2014).

De esta manera, se promedió la información de la t_{max} y t_{min} anual por cada una de las estaciones en el periodo comprendido, para la temporada de estiaje y lluvias (Jiménez & Takahashi, 2019), se determinó si existe algún tipo de variabilidad. Cabe mencionar que, una de las principales problemáticas de realizar este cálculo se deriva de la estandarización de la

información, por lo que las perturbaciones a detalle que llegaran a existir no son perceptibles (IDEAM-UNAL, 2018), debido a que al homogenizar toda la información de la subcuenca se pierde la variación de aquellas zonas más cálidas o frías.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados (Fig. 16).

Figura 16. Comportamiento de temperatura mínima (izq.) y máxima (der.) de manera anual.



Fuente: Elaboración propia.

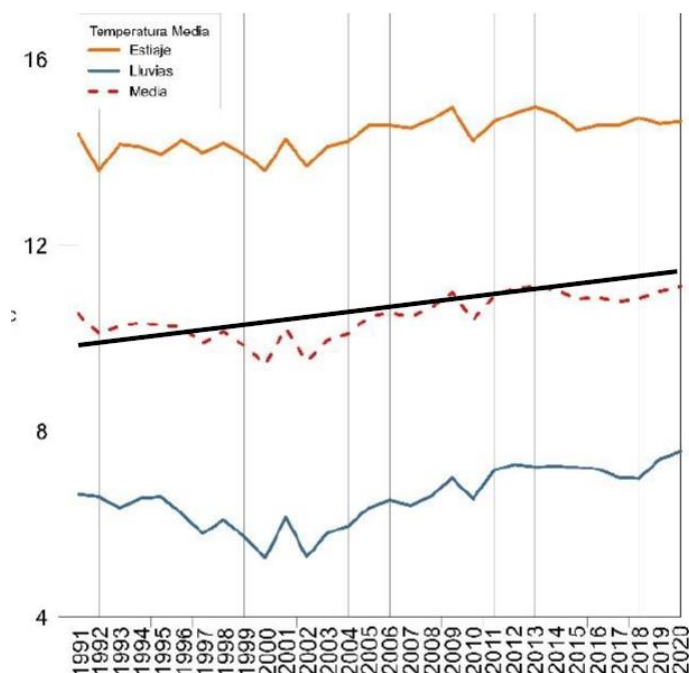
Para el caso de la temperatura mínima durante la temporada de estiaje, se observó un promedio general de 5.18°C con una desviación estándar de 0.71 °C y un coeficiente de variación de 13.72% con una mayor variabilidad interanual, siendo la temperatura mínima promedio más significativa y una tendencia marcada al calentamiento. Para la temporada de lluvias, se observó un promedio de 7.93 °C con una desviación estándar de 0.58 °C y un coeficiente de variación de 7.37% con una menor variabilidad interanual que en el caso del estiaje, su calentamiento es de manera modera. En este caso, la variabilidad climática es más acentuada en la temporada de estiaje, lo que podría significar riesgos por heladas o temperaturas extremas.

Para la temperatura máxima durante la temporada de estiaje, se observó un promedio general de 22.68 °C, con una desviación estándar de 0.49 °C con un coeficiente de variación de 2.17% mostrando una ligera tendencia al aumento (+0.2 a +0.3 °C por década), con una variabilidad interanual moderada; en la gráfica se muestran picos de temperatura en años relacionados, posiblemente con eventos climáticos como El Niño, el calentamiento es progresivo, aunque no drástico. En el caso de la temporada de lluvias, se observó un promedio general de 21.68 °C, con una desviación estándar de 0.56 °C, con un coeficiente de variación de 2.6%, con una menor variabilidad que el estiaje; sin embargo, se refleja un aumento térmico sostenido,

aunque estos cambios son sutiles, pueden llegar a tener repercusiones significativas en actividades económicas como la agricultura.

Con base en esta información se determinó la temperatura media, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Temperatura media anual



Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de la temperatura media se obtuvo un promedio de 10.46 °C, con una desviación estándar de 0.46 y un coeficiente de variación de 4.43, la variabilidad interanual oscila entre 9.44 °C – 11.10 °C lo cual representa un incremento gradual anual (línea negra). En la gráfica se observa una tendencia creciente, con mayor pendiente en el caso de la temperatura mínima, lo que sugiere un calentamiento nocturno más intenso.

Esta representación gráfica de la temperatura media muestra la problemática que se deriva de estandarizar en promedios mensuales y anuales de temperatura mínima. y temperatura máxima. A pesar de ello, se realizó el ejercicio con la finalidad de detectar una variabilidad estacional considerable como se observó para la temporada de estiaje.

Con base en este análisis, se crearon isotermas para cada una de las temporadas a partir de la adición y división de los meses en cada una de ellas (Araiza-Olivares, 2022). En donde se observó una pequeña diferencia entre cada una de las temporadas; esto se deriva de su interacción con variables como la altitud, la vegetación, el relieve, y la cobertura vegetal, lo que permite que existan distintos tipos de climas en el Estado de México.

Sobre todo, la diferencia se observa más durante la temporada de estiaje, la cual afecta a la zona de estudio en donde predomina el clima cálido, semiárido y templado, con una variación térmica anual de 2.29°C, debido a que la temperatura media del mes más cálido y la del más frío es pequeña (Rodríguez, 2004).

Debido a las diversas características de estos componentes, podemos observar distintos climas en algunas regiones dentro de la zona de estudio; la parte del norte de la subcuenca se caracteriza por tener un clima templado subhúmedo, al centro cálido subhúmedo, y al sur, seco y semiseco (INEGI, 2018b).

La importancia de esta diversidad en climas se deriva de la influencia sobre el comportamiento estacional que tienen algunos elementos como la flora y fauna, lo que permite una distribución y funcionalidad de los componentes bióticos de la zona de estudio (IDEAM-UNAL, 2018). Sin embargo, el de mayor relevancia tiende a ser la temperatura (Jáuregui, 1981). Podemos destacar así, que la variabilidad que se presenta en la zona de estudio respondería más al ciclo natural de los sistemas climáticos derivados de las oscilaciones multidecadales como la del Atlántico, la oscilación decadal del Pacífico o como es El Niño Oscilación del Sur (ENOS).

Sin embargo, como consecuencia de este equilibrio tan marcado que existe entre las variables climáticas y los SE que aquí se han analizado, no podemos dejar de preguntarnos qué pasaría en el escenario más extremo que presenta la ciencia sobre el cambio climático. ¿Cuál sería el comportamiento de las variables analizadas en este capítulo frente a un escenario climático cuya vía representativa de concentración (RCP) sea la mayor? En este sentido, el siguiente capítulo nos ayuda a presentar la respuesta.

CAPÍTULO 3. CAMBIO CLIMÁTICO

A lo largo de la presente investigación se ha manejado al cambio climático como un catalizador de impactos negativos sobre el equilibrio de sistemas y estructuras sociales y ambientales, al cual se le atribuye el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos climáticos en tierra y océanos, así como la alteración de eventos meteorológicos como precipitaciones intensas, sequías e incendios; esto se ha relacionado con el aumento de la mortalidad humana, debido al calor registrado en diversas regiones del planeta (IPCC, 2022), entre otros efectos que se han comentado en los capítulos anteriores.

Estos efectos son causados por actividades antropogénicas (ligadas al estilo de vida irracional del ser humano que ocasiona contaminación), la explotación desmedida del capital natural, el incremento en la emisión de GEI a la atmósfera como resultado del uso de combustibles fósiles en diversas actividades como la producción (industrial y agrícola), transporte, incremento en el consumo de energía (derivado del incremento poblacional principalmente), cambio de uso de suelo y cobertura vegetal (Aburto, 2022; Gómez & Freire, 2022; Pinell-Tórrez et. al, 2022; Hernández, 2020). A lo que se suman eventos naturales como erupciones de volcanes,

transiciones glaciares-interglaciares que ocurren a una escala de tiempo similar a variaciones como la excentricidad, que es representada por el periodo que gasta la Tierra en ir de una órbita elíptica a una casi circular y viceversa, lo que altera la cantidad de radiación que recibe el planeta (Orantes, 2022); cambios en la oblicuidad, en donde el eje de rotación de la Tierra varía, generando cambios en la estacionalidad de las variables climatológicas en distintas partes del planeta (Ruíz, 2014); alteración en los movimientos de precesión, donde el polo norte no siempre está en la misma región debido al movimiento cónico que tiene la Tierra respecto a su eje de rotación (Martínez et. al, 2017); la osculación joviana de la órbita (Cabañas, 2012); declinación lunar, entre otros eventos que se derivan de la influencia gravitatoria del resto de astros del sistema solar (Nunes, 2019).

La suma de estas causas (natural y artificial) han repercutido en el comportamiento climático actual (1970-2020) sobre la dinámica y física atmosférica, la dinámica oceánica, el balance o intercambio de energía, el ciclo hidrológico, así como los ciclos bio-geoquímicos del sistema Tierra; sometiendo los sistemas naturales a importantes cambios, los cuales repercuten sobre los SE que aquí se han mencionado y al final, sobre la sociedad humana (Hernández, 2008). Si bien es cierto, que durante la historia de formación y evolución del planeta tierra se han presentado diversos cambios climáticos en el pasado; tales como el evento del calentamiento medieval que ocurrió entre el año 900 al 1300 d.C. (Carrillo-Bastos et al., 2019) considerado como un periodo cálido por causas naturales en donde se estima que la temperatura se incrementó en la zona norte de Europa entre 1°C a 2°C comparada con la experimentada de 1900 a 1939 con cierta variabilidad en otras regiones del planeta, en donde el comportamiento de la temperatura era anómalo e incluso se caracterizaba por episodios de sequía o incremento en la precipitación (Stine, 1994; Soon & Baliunas 2003); o el periodo de la pequeña edad del hielo entre 1300 y 1850 (de Menocal et. al, 2000), caracterizada por ser una oscilación climática compleja en donde se presentaban anomalías climáticas frías alternadas con fases cálidas (Bradley & Jonest, 1993) regionalmente variable, debido a los mínimos en las manchas solares (Weiss & Tobias, 2000).

A diferencia de los eventos anteriores, (en donde se observa la evolución del clima conforme pasa el tiempo, debido a forzamientos y mecanismos de retroalimentación resultando en eventos climáticos de diversas escalas temporales y espaciales) (Cubasch et. al, 2013). La alteración climática actual que experimentamos, por primera vez en la historia de la tierra, se deriva del incremento de CO₂ a la atmósfera de manera “artificial” (Compagnucci, 2011), lo que ha acelerado este proceso natural que se mencionaba en los dos ejemplos anteriores (calentamiento medieval y pequeña edad de hielo), en donde tan solo, la temperatura de 2011 a 2020 ha incrementado en 1.09 °C con respecto a la temperatura registrada en 1850 a 1900 (IPCC, 2020). De continuar con esta tendencia, es probable que el calentamiento global llegue a 1.5 °C entre 2030 y 2052 (IPCC, 2019a).

Ante esta situación y frente a los diversos escenarios que la comunidad científica ha presentado desde 1970, se han creado una serie de instrumentos, tratados, conferencias, fondos e instituciones internacionales con la finalidad de contribuir a la adaptación y mitigación de este fenómeno, los cuales van desde la creación del Programa Mundial sobre el Clima (1980); la creación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) en 1988; la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático en 1992); la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo en Río de Janeiro (1992); el Protocolo de Kioto (1997); y hasta el Acuerdo de París (2015), en donde se invita a todos los países (sin distinción alguna) a establecer metas de reducción de emisiones con la finalidad de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C (idealmente de 1.5°C) respecto a los niveles preindustriales (Aguayo, 2022).

Uno de los principales requisitos para lograr el objetivo de este acuerdo es que los Países firmantes se comprometan a la reducción de sus emisiones de GEI ejecutando planes de acción climática (Contribuciones Determinadas a nivel Nacional, NDC, por sus siglas en inglés) que comunicaran cada 5 años y a partir del 2024, informar de manera transparente sobre sus actuaciones (Dormido et al., 2022).

En el caso de México, la NDC vigente es la del 2015 (debido a que su actualización para la versión del 2022 no cumplía con las metas establecidas de reducción de CO₂ por el Acuerdo de París), la cual contiene dos componentes: el de mitigación de CO₂, que contempla dos medidas, los compromisos no condicionados que se refiere a aquellas acciones que el país puede solventar con sus propios recursos y bajo los cuales se busca reducir el 22% de las emisiones de GEI y 51% de las emisiones de carbono negro al 2030 respecto al escenario tendencial (business-as-usual, BAU) y los compromisos condicionados en donde el país podría obtener recursos adicionales y lograr mecanismos efectivos de transferencia de tecnología a través del entorno internacional que lucha contra el cambio climático, bajo este esquema se esperaría reducir hasta un 36% las emisiones de GEI y el 70% de las emisiones de carbono negro al 2030 respecto al escenario BAU (Negrete, 2017). El segundo componente se relaciona con las acciones de adaptación que estarán determinadas bajo las mismas medidas de mitigación, compromisos no condicionados cuya meta busca fortalecer la resiliencia en un 50% de los municipios más vulnerables del territorio nacional al 2030 y los compromisos condicionados que estarán enfocados en el desarrollo de capacidades, transferencia de tecnología y financiamiento para la adaptación (Gobierno de la República, 2015).

Adicional a ello, y como parte del principio de transparencia que se menciona en el Acuerdo de París (Fernández-Reyes, 2016), el Gobierno Mexicano ha presentado una serie de informes/reportes sobre la situación actual de las emisiones de GEI, las principales acciones de mitigación y adaptación al cambio climático y algunas lecciones aprendidas; tal es el caso del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de GEI (INEGYCEI) de 1990-2019 en donde se muestra que durante 2019, en México se emitieron 736.63 millones de

toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq), correspondiente a la suma de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs), trifluoruro de nitrógeno (NF₃) y hexafluoruro de azufre (SF₆), multiplicados por su potencial de calentamiento global (Gobierno de México, 2022), lo que denota el incremento de GEI en donde el sector que más contamina sigue siendo el energético con el 64% de las emisiones totales (*Ibidem*). Otros ejemplos de reportes los encontramos en el tercer informe bienal de actualización ante la CMNUCC (2022), la primera comunicación sobre adaptación de México ante la CMNUCC (2022), la sexta comunicación nacional y segundo informe bienal de actualización ante la CMNUCC (2018), el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático en México (2019), y la Evaluación Estratégica del Avance Subnacional de la Política Nacional de Cambio Climático (2019).

Este tipo de informes/reportes a nivel nacional se han realizado bajo el mandato de los compromisos adquiridos por México al ratificar su participación en tratados o convenios enfocados a la lucha contra el cambio climático y a su estructura climática nacional que es encabezada por la Ley General de Cambio Climático de donde emanan el Consejo de Cambio Climático, la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, el Sistema Nacional de Cambio Climático, el Programa Especial de Cambio Climático, la Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40, que constituye el mecanismo rector de la política nacional en el mediano y largo plazo para enfrentar los efectos del cambio climático y los Programas Estatales y Municipales de Cambio Climático.

Para el caso del Estado de México, dentro de su Estrategia de lucha contra el cambio climático, se menciona que las acciones de mitigación estarán enfocadas a reducir sus emisiones de GEI e incrementar los reservorios de carbono en ecosistemas forestales y suelos agrícolas y en la parte de adaptación, las acciones estarán enfocadas a la reducción de la vulnerabilidad e incremento de la resiliencia de la población, ecosistemas e infraestructura estratégica frente a los posibles efectos del cambio climático (EDOMEX, 2016).

Para lograr lo antes expuesto, es necesario alinear dichos esfuerzos a las estrategias municipales, las cuales tienen el mandato de formular instrumentos de diagnóstico, planificación, medición, monitoreo, verificación y evaluación; tal y como lo mandata la Ley General de Cambio Climático en sus artículos 8 al 12 (LGCC, 2022). En este sentido, el INECC ha establecido que los instrumentos normativos básicos de planeación en materia climática a nivel municipal deberán ser:

Tabla 8. Instrumentos de cambio climático subnacionales.

INSTRUMENTOS DE POLÍTICA CLIMÁTICA MUNICIPAL
Programa de Desarrollo Municipal (PDM)
Programa Municipal de Cambio Climático (PCC)

Procedimientos de Evaluación de Programas Municipales (EMCC)
Fondo de Cambio Climático y gestión de otros recursos (FCC)
Formatos o instrumentos utilizados para elaborar e integrar la información proveniente de categorías de fuentes emisoras que se originan en el municipio (IGEI)
Programa o Plan de Desarrollo Urbano Municipal (PDU)
Programa de Ordenamiento Ecológico Local y Desarrollo Urbano (POEL)
Políticas y acciones para enfrentar al cambio climático en materia manejo de residuos sólidos (RS)
Programa de Protección Civil (PPC)
Atlas Local de Riesgo (AR)
Reglamento de Construcción (RC)
Programa o Plan Municipal de Movilidad (transporte eficiente y sustentable, público y privado) (PMM)

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), consultado el 29/08/2022 <https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Instrumentos.html>

Sin embargo, dentro de los municipios que se localizan en la zona de estudio, observamos que, aunque la mayoría de ellos cuentan con un plan de desarrollo municipal actualizado, son pocos los que han avanzado en la generación de instrumentos enfocados a la lucha contra el cambio climático como es el caso del municipio de Villa de Allende, el cual cuenta con tres instrumentos (PDM, PDU y POEL). Por lo que una forma de coadyuvar a la acción frente al cambio climático es la generación de posibles escenarios sobre estos municipios en particular, para lo cual, la propuesta de la presente investigación se basa en la creación de ellos basados en la RCP 8.5, aunque es un escenario poco probable y de alto riesgo, permite detectar vulnerabilidades en municipios en específico, las cuales no serían visibles bajo escenarios más moderados, lo cual nos permitirá, con lo que los gobiernos subnacionales podrían gestionar acciones de manera transversal para el fortalecimiento de las capacidades locales de estos grupos .

3.1 Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático se construyen con ayuda de modelación climática basadas en ecuaciones matemáticas que tienen como objetivo representar los procesos del sistema climático. Debido a la complejidad de dicho sistema, un modelo no es capaz de calcular todos sus procesos por lo que geoespacialmente se divide al planeta en píxeles con resoluciones espaciales distintas, sobre ellos se realizan cálculos de variables como temperatura, presión del aire, humedad, precipitación y velocidad del viento, con la finalidad de diferenciar los distintos escenarios entre regiones (McWeeney & Hausfather, 2018).

Sin embargo, y debido a la complejidad de variables entre regiones, se han diseñado diversos modelos climáticos, dentro de los que encontramos: Modelos de Balance de Energía (EBM's por sus siglas en inglés), los cuales solo consideran la energía solar que ingresa a la atmósfera

terrestre y el calor liberado al espacio (Casado, 2020). Los Modelos Radiativos Convectivos (RCMs, por sus siglas en inglés) pueden calcular la humedad y temperatura de diferentes capas de la atmósfera a partir de la transferencia de energía entre ellas (Flores-Velázquez & Vega-García, 2019); mientras que los Modelos de Circulación General (GCMs, por sus siglas en inglés), cubren todo el planeta y están divididos en 3 rubros: a) los que solo incluyen a la atmósfera y su interacción con la superficie terrestre continental (Atmospheric General Circulation Models, AGCMs), b) aquellos que se basan en la interacción de la atmósfera y superficie terrestre con modelos físicos del océano (Atmosphere-Ocean General Circulation Models, AOGCMs), y c) aquellos que incluyen ciclos e interacciones con cambios de suelo y vegetación, que se relacionan con las emisiones antropogénicas de GEI (Earth System Models, ESMs) (Toro et. al, 2019). Existen los Modelos climáticos Regionales (RCM, por sus siglas en inglés) en donde se aterriza información climática global a una escala local georreferenciada con una resolución espacial que va de 1 hasta 50 km (Suárez-Almiñana et al., 2020). Los Modelos Integrados de Evaluación (IAM's, por sus siglas en inglés), en ellos se toma como base un modelo climático simple el cual interactúa con aspectos de la sociedad como población, crecimiento económico, y el uso de energía con la finalidad de determinar futuras emisiones de GEI (Keen, 2021).

Debido a los distintos factores que intervienen en la emisión de GEI (crecimiento en la población, usos de combustibles fósiles, políticas públicas, desarrollo económico, y flujo migratorio), la generación de escenarios de posibles emisiones futuras se basa en un conjunto de supuestos sobre fuerzas impulsoras como es el cambio tecnológico, desarrollo demográfico, económico, y social. Dichos escenarios son utilizados para generar múltiples posibilidades de simulaciones de clima futuro, creando así escenarios de cambio climático (INECC, 2022). Para ello, se cuantifica el forzamiento radiativo de los GEI y de esta manera, conocer la posible influencia que tuvieran sobre el clima.

En este sentido, el IPCC en su quinto informe estableció cuatro escenarios climáticos basados en el posible comportamiento de las emisiones de GEI, conocidas como las cuatro vías representativas de concentración (RCP, por sus siglas en inglés) (Pachauri, 2014). Estas se clasifican en RCP 2.6 en donde se esperará que el forzamiento radiativo (FR, por sus siglas en inglés) mantendrá una tendencia decreciente hacia el 2100, esperando alcanzar 421 ppm⁹, es decir, se alcanza un máximo y después disminuye. Para el RCP 4.5, se esperaría que el FR mantuviera una tendencia estable hacia el 2100, alcanzando 538 ppm. Para el RCP 6.0 y RCP 8.5, el FR mantendría una tendencia creciente hacia el 2100, alcanzando las 936 ppm (Ruiz et. al, 2018). Es decir, el RCP 2.6 representa niveles de forzamiento muy bajos, el RCP 4.5 y RCP 6.0, escenarios de estabilización y el RCP 8.5 mostraría un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (López et. al, 2022).

⁹ Es la relación del número de moléculas de Gases Efecto Invernadero (GEI) con el número total de moléculas de aire seco. Tales cambios originan un forzamiento radiativo en el balance energético y por ende en la respuesta del clima.

Con base en esta información, distintos centros de investigación de todo el mundo han desarrollado sus propias simulaciones de modelos climáticos, los cuales han sido base para la elaboración del quinto y sexto informe de evaluación del IPCC. Dichas simulaciones pueden consultarse en distintas plataformas como es el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) en sus cinco fases (CMIP1, CMIP2, CMIP3, CMIP5, CMIP6), la cual recopila la información de modelos globales de circulación general acoplados del océano y atmósfera en diversos grupos de modelación (Ouarda et al., 2021). A nivel regional existen algunas opciones como ENSAMBLE o Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX), cuya reducción de escala dinámica se lleva a cabo con base en valores simulados de variables climáticas derivados de Modelos Globales Acoplados como el CMIP5 (Espitia, 2021).

Bajo este contexto, y con la finalidad de generar los posibles escenarios de cambio climático bajo la RCP 8.5 para la zona de estudio, se utilizaron los Modelos Climáticos Regionales derivados de la plataforma CORDEX, estos son:

Tabla 9. Modelos climáticos regionales (CORDEX).

Modelo Regional	Modelo Climático Global	Institución ID	Experimento	Frecuencia	Variable
RCA4	CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	CanESM2	CCCma	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	GFDL-ESM2M	NOAA-GFDL	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	IPSL-CM5A-MR	IPSL	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	NorESM1-M	NCC	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	MIROC5	MIROC	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	MPI-ESM-LR	MPI-M	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	HadGEM2-ES	MOHC	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)
RCA4	EC-EARTH	ICHEC	Historical, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5	Mensual	Precipitación (pr), temperatura del aire cercana a la superficie (tas)

Fuente: Elaboración propia.

1. CSIRO-Mk3-6-0: El objetivo de este modelo es investigar los procesos físicos y dinámicos que controlan el sistema climático para realizar predicciones multiestacionales y para investigar la variabilidad natural del clima y el cambio climático. Fue desarrollado por la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO, Australia) y el Centro de Excelencia del Cambio Climático de Queensland (QCCCE) (Gordon, et. al, 2002).

2. CNRM-CM5: Este modelo ha sido desarrollado en conjunto por el CNRM-GAME (Centre National de Recherches Météorologiques-Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique) y el CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée), dentro de sus atributos se encuentra un esquema de radiación y una mejoría en el tratamiento de los aerosoles troposféricos y estratosféricos con especial énfasis a la conservación de la masa/agua en la componente atmosférica (Voldoire et. al, 2013).

3. CanESM2: Es un modelo clima-carbono completo, el cual considera variables como la atmósfera, el océano, y la superficie terrestre mediante el intercambio de energía, agua y GEI. Ha sido desarrollado por Centro Canadiense de Modelización y Análisis del Clima (CCCma, por sus siglas en inglés) (Hua, et. al, 2015).

4. GFDL-ESM2M: Es un modelo desarrollado por el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos vinculado a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA-GFDL), con la finalidad de obtener parámetros climáticos de alta resolución a partir de los datos del modelo global de baja resolución, el método de anidamiento (Gürkan et. al, 2016).
5. IPSL-CM5A-MR: Es un modelo desarrollado por el Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) en Francia, cuyo objetivo se basa en el estudio de la respuesta a largo plazo del sistema climático a los forzamientos naturales y antropogénicos. Este modelo incluye un ciclo de carbono interactivo, una representación de la química troposférica y estratosférica y una representación integral de los aerosoles, su aplicación se asocia con diferentes condiciones de contorno y con una variedad de complejidades en términos de procesos e interacciones (Dufresne et. al, 2013).
6. NorESM1-M: Se desarrolló con base en un modelo comunitario del sistema climático operado en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica en nombre del Community Climate System Model (CCSM)/Modelo Comunitario del Sistema Terrestre (CESM) de la Corporación Universitaria para la Investigación Atmosférica, en Oslo, Noruega, dentro de sus principales atributos se encuentra la incorporación de coordenadas isopícnicas del océano, modelos atmosféricos, de hielo marino y de la tierra (Bentsen et. al, 2013).
7. MIROC5: Es un modelo de circulación general atmósfera-océano producido cooperativamente por la comunidad de investigación japonesa, conocido como Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima (MIROC), dentro de sus variables considera la precipitación, los campos atmosféricos medios zonales, los campos del subsuelo oceánico ecuatorial y la simulación de El Niño-Oscilación del Sur.
8. MPI-ESM-LR: Es un modelo desarrollado por el Instituto Max Planck a resolución base (MPI-ESM- LR), el cual asocia la retroalimentación radiativa con la temperatura, el vapor de agua, las nubes y el cambio de albedo superficial a partir de la técnica del núcleo radiativo linealizado en combinación con un análisis de los forzamientos de CO₂ directos y ajustados. El modelo presenta una regresión no lineal del desequilibrio de la radiación al cambio de la temperatura media global de la superficie, lo que da como resultado una sensibilidad climática efectiva significativamente mayor después de unos 20 años, aproximadamente a temperaturas de 4 a 5 °K por encima de la preindustrial (Block & Mauritsen, 2013).
9. HadGEM2-ES: Este modelo es desarrollado por el Centro Hadley e incluye componentes del sistema terrestre como la química interactiva y ocho especies de aerosoles troposféricos. Se ha ejecutado durante el período 1860-2100, y dentro de sus resultados menciona que las emisiones antropogénicas de aerosoles a nivel mundial alcanzan su punto máximo entre 1980 y 2020, lo que da como resultado un forzamiento actual de aerosoles en todo el cielo de la atmósfera de -1.6 y -1.4 W m² con y sin aerosoles de nitrato de amonio, respectivamente (Bellouin et. al, 2011).
10. EC-EARTH: Es un Modelo del Sistema Terrestre (ESM) basado en el sistema operativo de pronóstico estacional del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo

(ECMWF), que ha funcionado bien en la simulación de campos troposféricos y variables dinámicas, pero se han encontrado áreas de oportunidad en variables como la temperatura superficial y los flujos simulados (Hazeleger & Bintanja, 2012).

Como se mencionó anteriormente, este tipo de escenarios regionales se desprenden de los modelos de circulación global a través de una adecuación, que en caso del proyecto CORDEX se realiza con base en una reducción de escala dinámica dividida en 12 regiones a lo largo del planeta, para el caso específico del continente americano, se utiliza la región 4 (RCA4). Tanto en los modelos climáticos globales como los regionales, aún existen algunas inconsistencias entre zonas, debido a diversos factores como a la distribución parcialmente inconsistente con la evidencia de las observaciones, la teoría o la comprensión del proceso, y la parametrización de procesos físicos no resueltos en la dinámica (Gutiérrez & Pons, 2006; Olcina, 2019; Florian-Vergara et al., 2021).

Por lo tanto, es esencial recalibrar la dispersión bruta de tales conjuntos de modelos con base en información de tenencia pasadas, climatología o estimaciones probabilísticas de conjuntos de física perturbada, para producir proyecciones del clima futuro que sean consistentes con la comprensión y con las observaciones del clima actual (Tokarska et al., 2020).

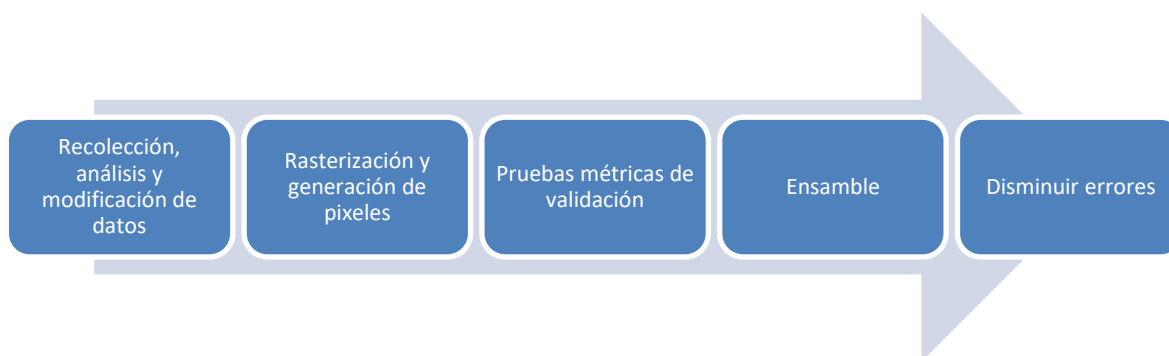
Para ello, existen diversos métodos para validar los distintos Modelos Climáticos Regionales (MCR) que se generan a nivel mundial, tales como la técnica multivariada de Componentes Principales y sus Funciones Ortogonales Empíricas Asociadas (Azarte et al., 2019), el cual busca reducir un conjunto de datos originales de diversas variables a un segundo conjunto de datos con menor número de variables, que deberán contener la máxima fracción posible de la información contenida en el primer conjunto de datos. Este segundo conjunto de datos se obtiene luego de determinar los autovalores y autovectores de la matriz covarianza, aunque su aplicación se relaciona más con la temperatura de la superficie del mar (Wilks, 1995). La reducción del error se realiza sobre un porcentaje de información explicada (Yeste et al., 2019); dicha reducción de sesgos tiene objetivo obtener proyecciones de cambio climático más realistas a partir de la información climatológica local (Francés et al., 2018). Este método ha sido utilizado para corregir la salida de información en los proyectos de EURO-CORDEX (Rodríguez & Gutiérrez, 2018; Suárez-Almiñana, 2020; Pérez et al., 2021) y algunos programas de cómputo como ROM (REMO-OASIS-MPIOM) (Parras-Berrocal et al., 2018), ClimaNevada (Pérez-Luque et al., 2021), entre otros.

Con base en la información climática y los recursos en esta investigación, se optó por el método de reducción de sesgos, ya que implica el análisis de las dos principales variables climáticas para realizar la proyección de los escenarios de cambio climático, para lo cual se analizaron las proyecciones de las variables de temperatura media y precipitación de los 10 modelos mencionados anteriormente, con la finalidad de determinar su grado de error, su representatividad y disminuir estas diferencias (Amblar-Francés, 2015).

3.2 Método Corrección de Sesgos

Como se mencionó anteriormente, la generación de modelos climáticos (globales, regionales, de balance de energía, convectivos, generales y de evaluación) siempre contará con cierto grado de incertidumbre, debido a que su objetivo es modelar escenarios futuros de un sistema naturalmente complejo con patrones, procesos y vínculos históricos entre diversas variables correlacionadas, con balances de masa y energía en un nivel termodinámico, lo cual se gestiona en sistemas computacionales que implica una optimización de los recursos en gran escala (Guzmán, 2020). Por ello, es necesario adecuar dicha información a la zona de estudio, una forma para lograr lo antes expuesto es a través del método de corrección de sesgos, dado que su principio es reproducir y representar patrones temporales de climas pasados y futuros con los modelos climáticos regionales, y compararlos con series historias observadas de cada variable climática que deberán ser ajustados (Méndez et al., 2019). Para lograr este ejercicio en la zona de estudio se utilizará como base la información de los 10 modelos climáticos regionales de la sección pasada y los datos climáticos del capítulo dos (temperatura y precipitación), a través de los siguientes pasos:

Figura 18. Proceso de reducción de sesgos.



Fuente: Elaboración propia.

a) Recolección, análisis y modificación de datos

Se descarga la información de las variables climáticas (precipitación y temperatura media) de la plataforma del proyecto CORDEX en 3 paquetes de información (históricos, actuales y futuros). Sus unidades de medida fueron transformadas para hacerlas compatibles con los datos que hemos manejado a lo largo de la investigación ($^{\circ}\text{C}$ y mm). En el caso de la pr, pasó de ser $\text{kg/m}^2/\text{s}$ a mm y para la temperatura media (tmean) se convirtieron los $^{\circ}\text{K}$ a $^{\circ}\text{C}$; esto se logró utilizando el programa de cómputo de MatLab, cuyo script se muestra en la Figura 19.

Figura 19. Script elaborado en MatLab para descarga de información de modelos climáticos regionales.

```

1 setwd("Ubicación de archivo")
2 dir()
3 library(ncdf4)
4 cordex1<- nc_open("abrir archivo entrante")
5 fulldate1 <- ncvar_get(cordex1,"tas")
6 lat<-ncvar_get(cordex1,"lat")
7 lon <-ncvar_get(cordex1,"lon")
8 t <- ncvar_get(cordex1,"time")
9 nlon <- dim(lon)
10 nlat <- dim(lat) ("localización georreferenciada de la zona de estudio")
11 nt <- dim(t)
12 fulldatav <- as.vector(fulldate1)
13 fulldatam <- matrix(fulldatav, nrow=nlon*nlat, ncol=nt)
14 lonlat <- expand.grid(lon,lat)
15 df_cordex1<- data.frame(lonlat, fulldatam)
16 write.csv(df_cordex1, file= "descargar periodo de analisis")
17 #-----

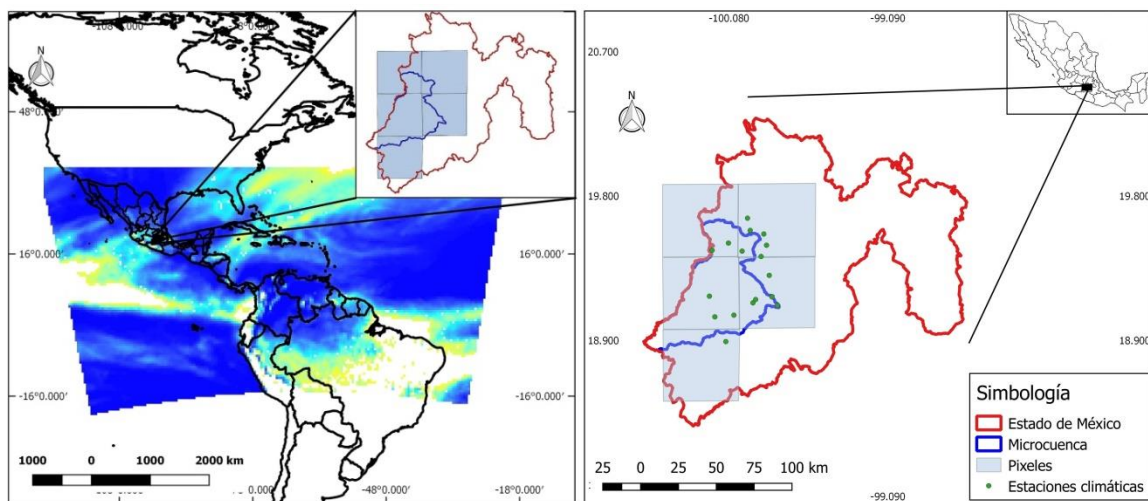
```

Fuente: Elaboración propia.

b) Rasterización y generación de píxeles.

Una vez que se descargó la información de los tres paquetes de modelos regionales de la plataforma de CORDEX, se efectuó un proceso de rasterización para la zona de Norteamérica (Fig. 20 izq.), se ubicó geoespacialmente la subcuenca dentro de 5 píxeles de 50 km² (cuya resolución puede no describir adecuadamente la subcuenta) para cada uno de los 10 modelos ya mencionados con base en la RCP 8.5 (Fig. 20).

Figura 20. Ubicación de píxeles (izq.) y ubicación de estaciones climáticas (der.).



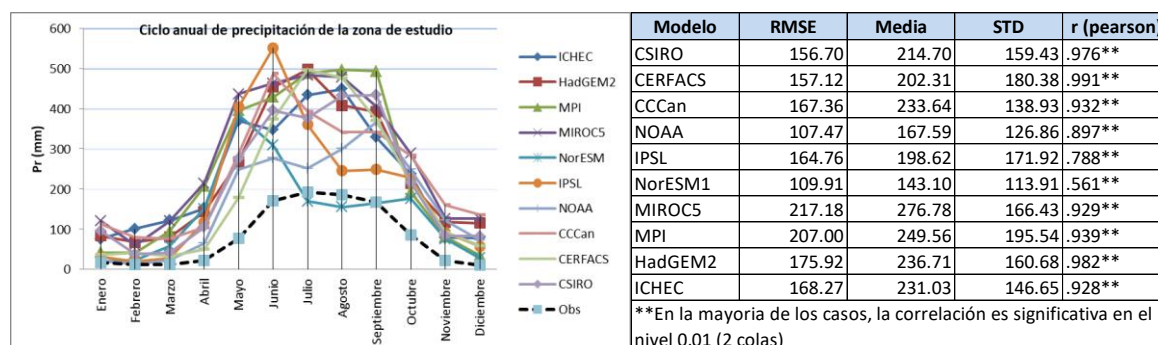
Fuente: Plataforma CORDEX <https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/esgf-liu/>

c) Pruebas métricas de validación

A partir de la información obtenida de la plataforma de CORDEX y de los datos de precipitación y temperatura media observados de las estaciones climatológicas, se realizaron distintas pruebas métricas de validación como la del error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar (STD) y correlación de Pearson (r) (Marcos-García et. al, 2020; Ciscar, 2020), en el caso de la precipitación se sobreestima, principalmente en la curva que

representan los meses de lluvia. En el caso del error cuadrático, los valores obtenidos sobreestiman considerablemente la precipitación media mensual calculada, con respecto a los datos observados, así como la desviación estándar y la prueba de significación del coeficiente de correlación de Pearson que es representada como bilateral y positiva. Sin embargo, se observa que la estacionalidad está bien representada por los modelos cuya media respecto a la de los datos observados, que es de 81.55 mm (Fig. 21).

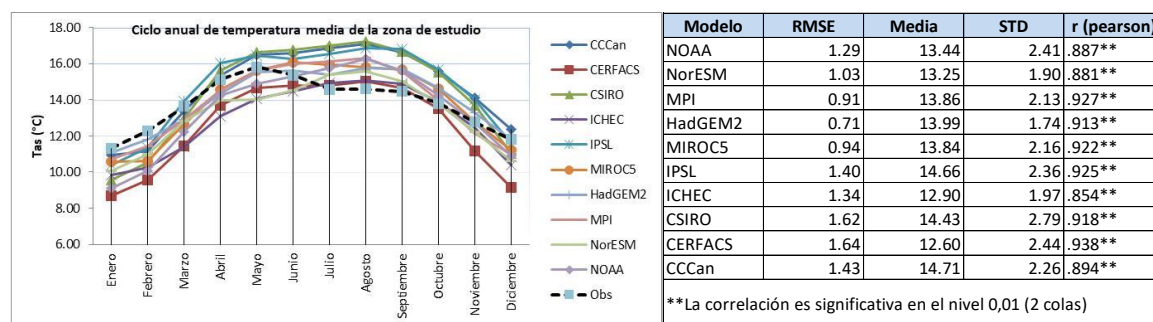
Figura 21. Ciclo anual de precipitación (izq.) y métricas de validación (der.).



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la temperatura media, las pruebas de validación muestran una subestimación de la variable por cerca de 2°C respecto a los datos observados en el caso del error cuadrático y la desviación estándar no existe información sobresaliente, en la prueba de significación del coeficiente de correlación de Pearson resulta bilateral y positiva con respecto a la media de los datos observados es de 13.79 °C, su estacionalidad está bien representada, aunque algunos modelos la subestiman durante el primer semestre del ciclo; mientras que para el segundo semestre la sobreestiman, como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Ciclo anual de temperatura (izq.) y métricas de validación (der.).

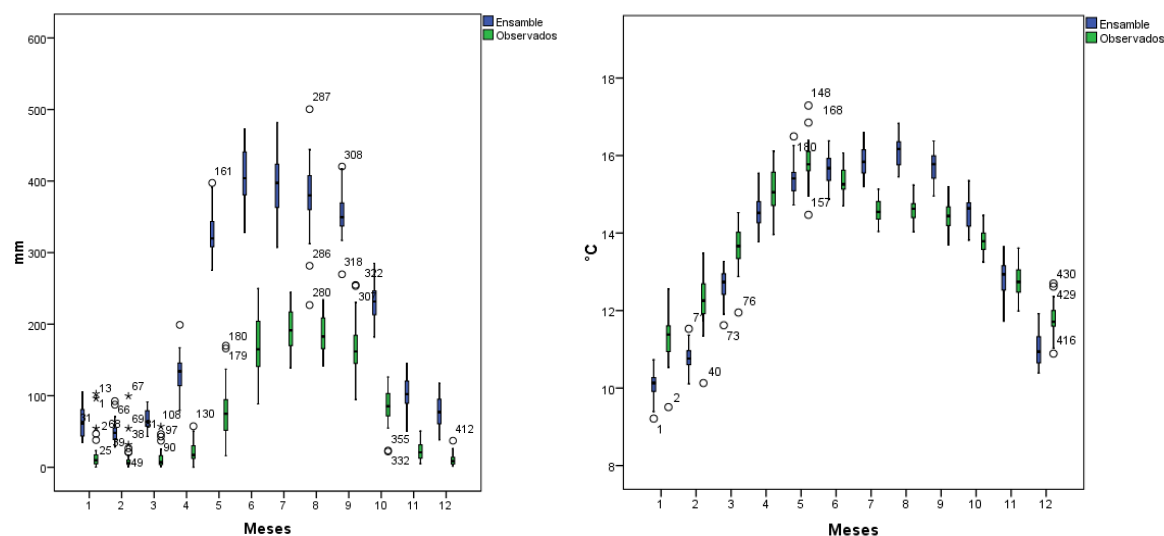


Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, observamos las diferencias de cada uno de los MCR para cada una de las variables, por lo que no es recomendable utilizar sólo uno de ellos para determinar los posibles escenarios climáticos de la zona de estudio (Cavazos et. al, 2013). Por lo que se generó un

ensamble multimodelos (con base en los 10 modelos analizados), con la finalidad de mejorar el desempeño debido a la cancelación o minimización de los errores individuales por compensación que esto significa, (Penalba & Pántano, 2020; Small et. al, 2001; Nagy et. al, 2018; Medina, 2021; García-Bandala et. al, 2021; Medina-García et. al, 2019). Una vez que se creó el ensamble, se graficó su dispersión estacional con respecto a la información de las variables observadas para determinar el nivel de corrección que tendría (Fig. 23).

Figura 23. Ciclo anual de pr del ensamble y datos observados (izq.) ciclo anual de tas y datos observados (der.).



Fuente: Elaboración propia.

Si bien es cierto, existen algunos datos atípicos, se observa que aún y con la generación del ensamble existen diferencias importantes sobre todo para el caso de la precipitación en donde se siguen sobreestimando los valores respecto a los datos observados con una desviación estándar de 144 y una media de 215.40. En el caso de la temperatura media, el ensamble corrige la diferencia entre los datos con una desviación estándar de 2.14 y una media de 13.76 °C.

El objetivo del método de corrección de sesgos es precisamente disminuir estas inconsistencias observadas en los ensambles a partir de percentiles (Luo et. al, 2018), los cuales son comparados entre la información histórica, el ensamble de la RCP8.5 (2021-2050) y los datos observados (1991-2020), empleando una función para ajustar el modelo a lo observado y posteriormente, esta función se aplica a la serie futura para corregir el sesgo (con base en el programa de cómputo de MatLab), con lo que se obtiene el escenario climático proyectado al 2050 (Tong et. al, 2021; Hernández-Díaz et. al, 2019).

d) Disminuir errores.

Considerando el ensamble creado y la información climática observada sobre los años mencionados anteriormente; la corrección de sesgos se realizó a partir de las medias de posición de datos agrupados entre la información climática observada y los 5 píxeles en donde se ubicó la zona de estudio, en el caso de la precipitación a cada percentil asignado se le multiplicó el valor de la precipitación observada entre la diferencia de los datos futuros e históricos. Para el caso de la temperatura media, el valor se corrigió añadiendo la diferencia de los percentiles de datos históricos y observados al cambio proyectado en el escenario que asimila el comportamiento de la RCP8.5, todo ello con ayuda de MatLab (Saurral et. al, 2013) como se observa en la Figura 24.

Fig. 24. Scrip en MatLab,

```

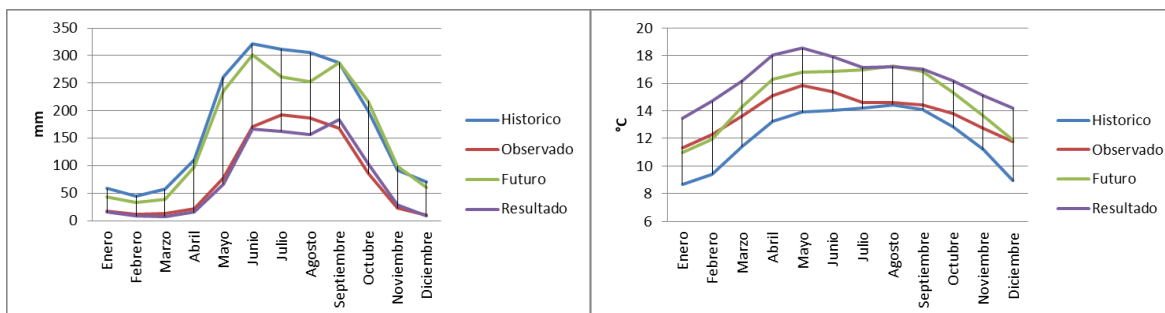
1 %Construyo el ensemble para el punto de retícula que voy a analizar
2 ubicacion=input('nro de fila de la reticula correspondiente a la estación analizada: ');
3 estacion=input('nro de estación analizada: ');
4 PP_ensemble_hist(:,:,)=mean(PP_hist(ubicacion,:,:),4);
5 PP_ensemble_fut(:,:,)=mean(PP_fut(ubicacion,:,:),4);
6 observaciones(:,:,)=PP_obs(estacion,:);
7 %Aplico el cambio proyectado por los modelos a las observaciones, separando
8 %por rango de percentiles
9 for imes= 1:12
10     P20_obs(imes,1) = prctile(observaciones(imes,:), 20);
11     P40_obs(imes,1) = prctile(observaciones(imes,:), 40);
12     P60_obs(imes,1) = prctile(observaciones(imes,:), 60);
13     P80_obs(imes,1) = prctile(observaciones(imes,:), 80);
14     P10_hist(imes,1) = prctile(PP_ensemble_hist(imes,:), 10);
15     P30_hist(imes,1) = prctile(PP_ensemble_hist(imes,:), 30);
16     P50_hist(imes,1) = prctile(PP_ensemble_hist(imes,:), 50);
17     P70_hist(imes,1) = prctile(PP_ensemble_hist(imes,:), 70);
18     P90_hist(imes,1) = prctile(PP_ensemble_hist(imes,:), 90);
19     P10_RCP85(imes,1) = prctile(PP_ensemble_fut(imes,:),10);
20     P30_RCP85(imes,1) = prctile(PP_ensemble_fut(imes,:),30);
21     P50_RCP85(imes,1) = prctile(PP_ensemble_fut(imes,:),50);
22     P70_RCP85(imes,1) = prctile(PP_ensemble_fut(imes,:),70);
23     P90_RCP85(imes,1) = prctile(PP_ensemble_fut(imes,:),90);
24     for ianio=1:36
25         if observaciones(imes,ianio)<=P20_obs(imes,1)
26             PP_ajuste85(imes,ianio)=observaciones(imes,ianio)*(P10_RCP85(imes,1)/P10_hist(imes,1));
27         elseif observaciones(imes,ianio)<=P40_obs(imes,1) & observaciones(imes,ianio)>P20_obs(imes,1)
28             PP_ajuste85(imes,ianio)=observaciones(imes,ianio)*(P30_RCP85(imes,1)/P30_hist(imes,1));
29         elseif observaciones(imes,ianio)<=P60_obs(imes,1) & observaciones(imes,ianio)>P40_obs(imes,1)
30             PP_ajuste85(imes,ianio)=observaciones(imes,ianio)*(P50_RCP85(imes,1)/P50_hist(imes,1));
31         elseif observaciones(imes,ianio)<=P80_obs(imes,1) & observaciones(imes,ianio)>P60_obs(imes,1)
32             PP_ajuste85(imes,ianio)=observaciones(imes,ianio)*(P70_RCP85(imes,1)/P70_hist(imes,1));
33         elseif observaciones(imes,ianio)>P80_obs(imes,1)
34             PP_ajuste85(imes,ianio)=observaciones(imes,ianio)*(P90_RCP85(imes,1)/P90_hist(imes,1));
35         end
36     end
37 end
38 xlswrite('reti1.xls',PP_ajuste85,'Hoja1','A1');

```

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se garantizó que los datos mensuales reducidos en cada estación coincidieran con los datos históricos y futuros del ciclo anual, ubicados en cada uno de los pixeles que abarcan el área de estudio (Wang et. al, 2020), con base en ello se trabajó en los percentiles más altos de cada una de las variables (Casanueva et. al, 2012), resultando en un comportamiento similar a los datos observados, como se observa en la Figura 25.

Figura 25. Resultado de la corrección de sesgos en el ciclo anual para la variable de pr (izq.) y la variable de tas (der.)



Fuente: Elaboración propia.

Para la precipitación, el ciclo anual mostró una estacionalidad similar a la de los datos observados; sin embargo, se proyectaría una posible reducción de la variable en los meses correspondientes a la temporada de estiaje y lluvias. Después de ello, se esperaría un pequeño incremento para los meses restantes al año 2050.

Para la variable de temperatura media, también se mantiene la estacionalidad, pero su proyección estaría representada por un incremento de 2.5°C en promedio al 2050 en la mayor parte del ciclo anual, lo que definitivamente alteraría la estructura de los componentes biofísicos y ciclos biogeoquímicos que han permitido construir la estructura social que conocemos y más importante aún, la forma y calidad de vida de cualquier ser vivo del planeta, bajo esta proyección al 2050 que aquí se ha presentado. Sin embargo, no debemos dejar de mencionar que esta proyección solo es una suposición derivada de posibles escenarios en donde la RCP8.5 se mantenga y las acciones de mitigación y adaptación fracasen o no se lleven a cabo, por lo que la incertidumbre es una pieza fundamental en este tipo de estudios.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, con el incremento de los 2.5°C que arrojó la proyección, algunas problemáticas como la reducción del espacio adecuado para las especies que dependen directamente del clima y su distribución se daría en dos posibles sentidos, desplazamiento hacia gradientes latitudinales cercanos a los polos o movimientos multidireccionales hacia áreas con espacios bioclimáticos adecuados (Salazar-Borunda et. al, 2022), se podría presentar una variabilidad temporal en los recursos costeros (flora y fauna) (May-Tec & Mendoza-Franco, 2022), una posible alteración en la actividad pesquera, distribución de especies en el océano y alteración en las corrientes marinas (Orduña, et. al, 2012), un incremento en la temporalidad e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos (SEMARNAT-INECC, 2018), un aumento de las pérdidas en la agricultura y ganadería (UNAM, 2015), y una extinción masiva de especies endémicas (Silva, 2016), se estarían cumpliendo

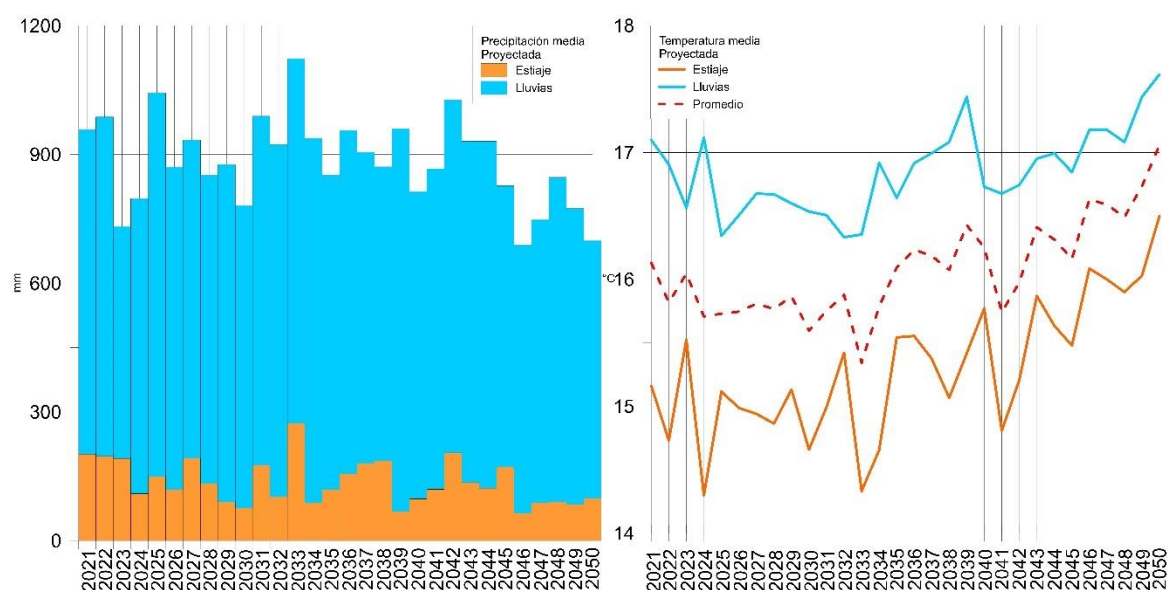
Para el caso específico de los servicios ecosistémicos de regulación climática y de provisión hídrica, su comportamiento bajo esta proyección se podría dar de la siguiente manera.

3.2 Proyección RCP8.5 y servicios SE (provisión hídrica, regulación climática).

La corrección de sesgos utiliza la reducción de escala estadística cuyos parámetros (momentos de distribución y percentiles) se calculan y utilizan (considerando el periodo de 1991-2020 de datos observados) para corregir las salidas del ensamble de los 10 MCR (Saurral, 2013) con la finalidad de proyectar los valores más extremos que arroja el cálculo basado en la RCP8.5 para la precipitación y temperatura media en cada uno de los 5 píxeles que abarcan la zona de estudio; con el objetivo de acercarnos a los posibles impactos con mayor severidad que podrían esperarse de no cumplir con los objetivos propuestos por el acuerdo de Paris y de los distintos mecanismos enfocados a la adaptación y mitigación del cambio climático a nivel nacional, estatal y municipal que se han comentado anteriormente.

En este sentido y derivado de lo antes expuesto, el comportamiento de las variables climáticas de temperatura media y precipitación del ensamble de los MCR con el ajuste que nos brindó la reducción de sesgos tendría un comportamiento al 2050, de la siguiente manera (Fig. 26):

Figura 26. Resultado de la proyección de la precipitación y temperatura media al 2050.



Fuente: Elaboración propia.

A diferencia del periodo analizado en el capítulo 2 (1991-2020), donde el registro de información observada para la precipitación de la zona de estudio alcanzaba en promedio 153 mm para la temporada de estiaje y 757.1 mm para la temporada de lluvias. En esta proyección de las variables climáticas, el promedio de precipitación sería de 747 para la temporada de lluvias y de 136.3 mm en estiaje al 2050, mientras que la temperatura media anual registrada en el periodo de 1991-2020 era de 10.46 °C llegaría a un promedio anual de 16 °C incrementando en 5°C.

En el caso de la precipitación media, hacia el 2050 se observa una disminución en la temporada de estiaje del 13% con respecto al periodo base, ya que muestra una mayor desviación estándar (50.39) y un coeficiente de variación de 36.96 sugiriendo años más extremos y con mayor incertidumbre, así mismo se observa un descenso severo hacia finales del periodo (2046-2050), con una pérdida de casi el 50% respecto al primer quinquenio (2012-2025). Para la temporada de lluvias, se muestra una leve disminución de 1.5% con respecto al periodo base, con una desviación estándar de 81.97 y un coeficiente de variación de 10.97 con valores más estables en las proyecciones, con un descenso moderado-constante, lo cual, podría repercutir en procesos como el de recarga hídrica anual.

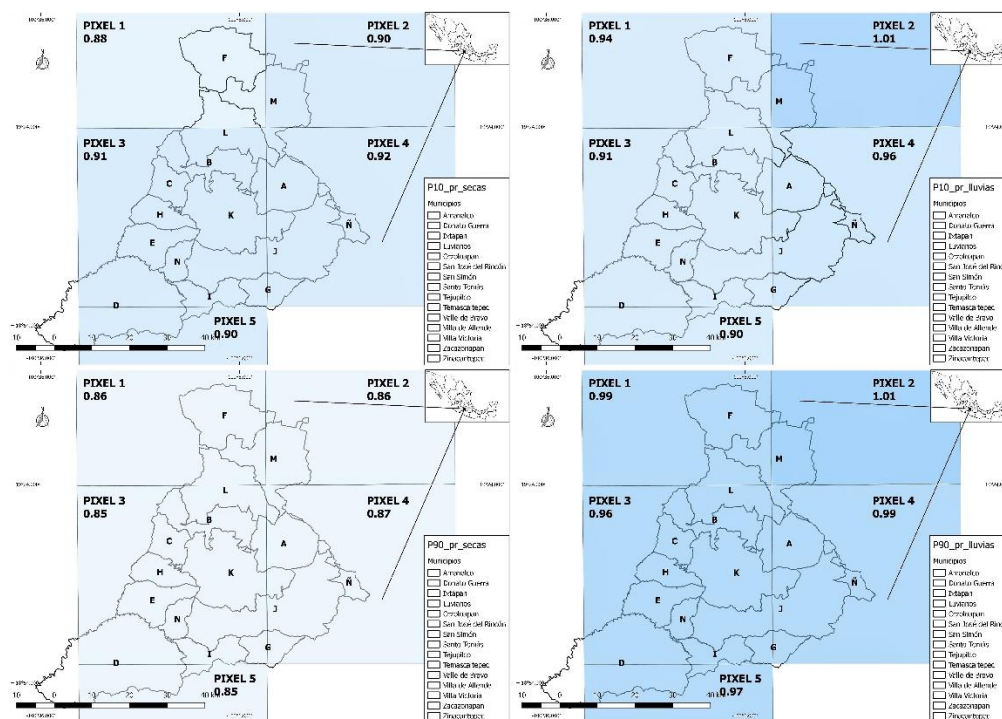
Para el caso de la temperatura media en donde se obtuvo un promedio de 10.46 °C con una desviación estándar de 0.46 y un coeficiente de variación de 4.43 en el periodo base, para la proyección hacia el 2050, se observa una temperatura media de 16 °C, con una desviación estándar de 0.37 y un coeficiente de variación de 2.34. Lo cual representaría un incremento anual de 0.188 °C.

Dichas proyecciones extremas derivadas del supuesto que representa la RCP8.5 tienen una tendencia similar a las investigaciones desarrolladas en países como Colombia, en la cuenca de Rio Sumapaz, en donde se proyectaría un escenario en donde el incremento en la temperatura fuera de 2.33 °C (Patiño & Rodríguez, 2019); en el altiplano chileno en donde se esperaría un incremento de 1°C y del 16% en magnitud de precipitación para el 2060 (Sota, 2022); en la ciudad de la Paz en Bolivia, donde bajo este escenario pesimista se esperaría un incremento general de temperatura, incremento de precipitación en época seca y reducción de precipitación en época húmeda, lo cual puede generar situaciones de sequía (Medina, 2021); en el caso de la zona de Arly en Burkina Faso habría un incremento en las precipitaciones actuales en cuanto a las temperaturas medias anuales se daría un decremento de 2°C, esto significaría una evapotranspiración potencial menor a la actual y una alteración en su régimen bioclimático, pasando de ser xerófilo semiárido a seco subhúmedo (Artigas & Namono, 2020).

En donde se presentan proyecciones diferenciadas (en algunos casos con afectaciones negativas y en otros favorecerían ciertas actividades), que, de volverse realidad, estaríamos frente a escenarios que afectarían bioclimas, procesos biogeoquímicos y ciclos naturales que modificarían el modo de vida de todos los seres vivos del planeta.

En nuestro caso, también existe cierto porcentaje de diferenciación entre escenarios para cada uno de los pixeles en los que se dividió la proyección del ensamble, para mostrarlo, consideraremos percentiles de 10% (P10) y 90% (P90), en donde 10% superior representará la tendencia hacia los años más húmedos o calientes y 10% inferior representará los límites en la tendencia de los años más secos o fríos, con la finalidad de observar aquellos municipios que se podrían encontrar en mayor riesgo (Fig. 27).

Figura 27. Proyección en percentiles de la precipitación al 2050.



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la precipitación dentro de su P10, se observa un límite porcentual de 0.88 para época de estiaje y de 0.90 para la época de lluvias por debajo de los cuales ocurren los eventos secos y fríos, lo que significaría una tendencia a la baja en el periodo proyectado. Sin embargo, existe una zona que sobrepasa el límite porcentual, lo que significa que posiblemente existiría un incremento ligero de precipitación en el mismo periodo, sobre el municipio de Santo Tomás (H), es decir, podrían presentarse años con mayor humedad.

En el caso del P90, el comportamiento es similar, teniendo un límite de 0.85 para temporada de estiaje y de 0.96 para época de lluvias dando la misma proyección respecto a la disminución de precipitación que se pudiera presentar en el periodo estudiado. Pero, surge la misma excepción con el municipio de Santo Tomás con un ligero incremento de lluvia.

Como resultado de ello, podemos concluir que este ejercicio de proyección nos muestra una disminución de la precipitación al 2050 respecto a la información observada base (1991-2020). Debemos considerar que la variable de la precipitación tiende a ser sobreestimada en el continente americano (Pántano, 2017), situación que se observó anteriormente en la zona de estudio al momento de mostrar la información de precipitación observada contra la proyectada por los modelos regionales.

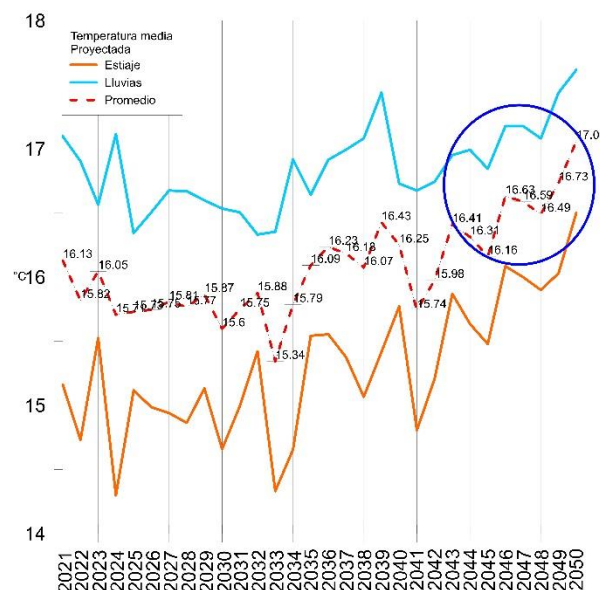
Para el caso de la temperatura media (Fig. 28), se observan resultados moderados en el P10 con un límite porcentual de 1.42 °C en temporada de estiaje siendo los municipios de Amanalco, Zinacantepec y parte de los municipios de Temascaltepec y San Simón de

distintos errores de los MCR utilizados para generar proyecciones a corto, mediano o largo plazo y por supuesto, al futuro comportamiento de las emisiones de GEI o a los esfuerzos de mitigación y adaptación que se llevan a cabo alrededor del planeta; sin embargo y como lo hemos planteado a lo largo de la tesis, uno de los objetivos era resaltar la necesidad de diseñar e implementar instrumentos que contribuyan a la adaptación y mitigación del cambio climático en aquellas zonas que no cuentan con ello (a través de la RCP8.5), en donde se busque preservar los distintos servicios ambientales de que dependemos para subsistir, como es el caso de la regulación climática y provisión hídrica, cuyo posible comportamiento se presenta a continuación.

a) Regulación climática.

El servicio ecosistémico de regulación climática depende de diversos factores y su análisis puede ser abordado desde distintas aristas, para la presente investigación lo hemos realizado a través de la relación entre el calor y la atmósfera para determinar la variabilidad que pudiera presentarse, con base en ello, consideramos la siguiente grafica para detectar aquellas anomalías temporales que se pudieran presentar en la proyección de temperatura media al 2050 (Fig. 29).

Figura 29. Proyección temperatura media al 2050.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, podría presentarse una temperatura promedio para el periodo del 2021-2050 de 15.30 °C en temporada de estiaje y de 16.85 °C para lluvias, con temperaturas más altas y estables a partir del 2039-2050 con una tendencia exponencial, lo cual podría representar un riesgo en temas de sequía en todos los municipios, modificando el estatus actual de sequía severa o extrema en época de estiaje y de moderada o anormalmente seca en temporada de lluvias (tabla 10) (SMN-CONAGUA, 2022) a sequia excepcional en las dos temporadas.

Tabla 10. Sequía en el Estado de México.

Municipio	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Amanalco	D2	D2	D2	D2	D2	D1	D1
Donato Guerra	D2	D2	D3	D2	D2	D1	D1
Ixtapan de la Sal	D1	D0	D0	D0			
Ixtapan del Oro	D2	D2	D3	D2	D1	D0	D0
Otzoloapan	D2	D2	D2	D2	D0	D0	D0
San Simón de Guerrero	D2	D2	D2	D2	D1	D1	D1
Santo Tomás	D2	D2	D2	D2	D0	D0	D0
Tejupilco	D2	D2	D2	D2	D0	D0	D1
Temascaltepec	D2	D2	D2	D2	D2	D1	D1
Valle de Bravo	D2	D2	D2	D2	D2	D1	D1
Villa de Allende	D2	D2	D3	D2	D2	D1	D0
Villa Victoria	D2	D2	D2	D2	D2	D1	D0
Zacazonapan	D2	D2	D2	D1	D0	D0	D0
Zinacantepec	D2	D2	D2	D2	D2	D1	D1
Luvianos	D2	D2	D2	D1	D0	D0	D0
San José del Rincón	D2	D2	D3	D2	D2	D2	
	D0	Anormalmente seco					
	D1	Sequía moderada					
	D2	Sequía severa					
	D3	Sequía extrema					
	D4	Sequía excepcional					

Fuente: SMN-CONAGUA, 2022

Esta situación podría repercutir en la calidad del aire, aumentando el riesgo de enfermedades e infecciones respiratorias y la escasez del agua, resultando en una afectación importante en las actividades económicas de la zona, creando un descontrol en todos aquellos elementos que se vinculan para ofrecer una calidad de vida adecuada.

Por lo que surge, no solo la necesidad de contar con instrumentos enfocados a la lucha del cambio climático, sino de diseñarlos e implementarlos con una visión holística que entienda la relación de variables como la temperatura con aspectos diversos como salud, migración, pobreza, agricultura, marginación, inequidad.

Para el caso de la provisión hídrica, estos posibles escenarios podrían impactar de la siguiente manera.

b) Provisión hídrica

Durante las últimas décadas se ha incrementado la presión sobre este SE debido a distintos factores, como el incremento poblacional y de sus actividades, (económicas, culturales, comerciales, sociales), la decadencia y falta de mantenimiento de su red de abastecimiento, a temas de cambio y uso de suelo, contaminación, entre otros; lo que ha repercutido en la calidad y disponibilidad de agua en diversas partes del mundo. Para conocer la evolución de ello sobre la zona de estudio, se propuso analizar dicho SE a partir de un balance hídrico superficial.

Como se observó al realizar este ejercicio, dos de los principales insumos fueron las variables de precipitación y temperatura media a partir de lo cual determinamos de manera empírica la precipitación media, evapotranspiración, escurrimiento superficial y la infiltración. En este caso nos basaremos en algunos supuestos para determinar de qué manera los escenarios de cambio climático que obtuvimos, podrían afectar el balance hídrico al 2050.

Para el caso de la precipitación media, se consideró la información promedio del resultado que arrojó la metodología de corrección de sesgos, en donde fueron consideradas la información observada de las estaciones climatológicas y los píxeles de los MCR que abarcaron la zona de estudio Arrojando la siguiente información.

Tabla 11. Comportamiento de la precipitación media proyectada al 2050.

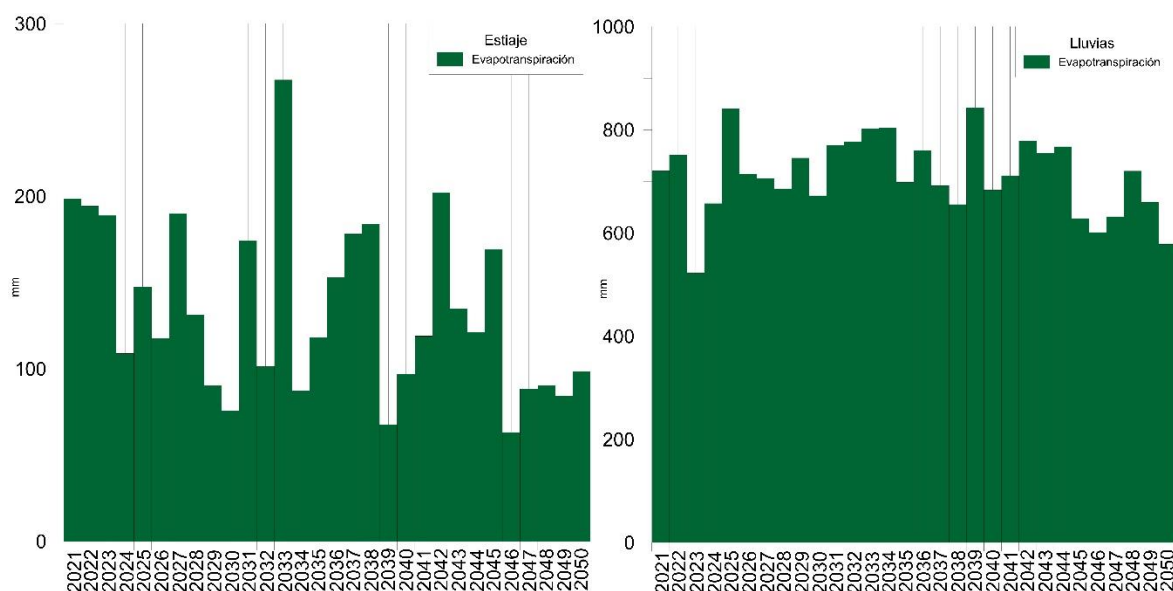
Estiaje					
Año	mm	Año	mm	Año	mm
2021	201.5	2031	176.6	2041	120
2022	197.1	2032	102	2042	205.2
2023	191.4	2033	273	2043	135.9
2024	109.7	2034	87.8	2044	122.2
2025	149.3	2035	119.2	2045	171.3
2026	118.5	2036	154.9	2046	63.5
2027	192.6	2037	180.4	2047	89.8
2028	132.2	2038	186.4	2048	91
2029	90.8	2039	68.2	2049	85.6
2030	76.2	2040	97.6	2050	99
Lluvias					
Año	mm	Año	mm	Año	mm
2021	756	2031	812.9	2041	747.1
2022	790.5	2032	820.5	2042	821.8
2023	541.3	2033	849.9	2043	794.7
2024	687	2034	849.8	2044	808.5
2025	893.9	2035	732.9	2045	655.4
2026	751.5	2036	800.9	2046	625.3
2027	740.6	2037	724.7	2047	659.3
2028	718.6	2038	685	2048	756
2029	785.2	2039	891.8	2049	689.9
2030	704.4	2040	715.8	2050	600.2

Fuente: Elaboración propia

En donde se observa una precipitación promedio anual de 441.6 mm para el periodo de 2021-2050, lo que podría repercutir en una disminución del rendimiento de cultivos (debido a la productividad condicionada por el ciclo de lluvias), aumento en la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos y discrepancia entre el tiempo de ocurrencia y el tiempo de retorno (Rodríguez-Moreno, et al, 2021).

Con base en esta información, y considerando el supuesto en donde la temperatura alcanzaría un posible incremento de 5°C en su fase más extrema (RCP 8.5), se calculó de manera empírica la evapotranspiración utilizando el algoritmo de Coutagne, de la manera en que se realizó para el periodo de 1991-2020 (Fig. 30).

Fig. 30. Proyección de la variable de evapotranspiración al 2050.

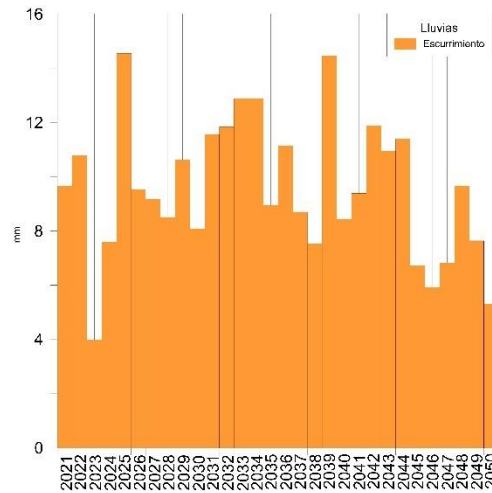


Fuente: Elaboración propia

En este caso, la evapotranspiración promedio para el periodo del 2021-2050, en la temporada de lluvias sería de 711.3 mm mientras que en la temporada de estiaje sería de 134.8 mm. Aunque pareciera una proyección moderada, el incremento tan drástico de la temperatura y su relación con la evapotranspiración, podría modificar las condiciones micro y mesoclimáticas de la región estudiada, alterando indirectamente los procesos de floración, reproducción, o incluso de manera extrema, las cadenas tróficas.

Para el cálculo del escurrimiento, además de tomar en cuenta la proyección de la precipitación y temperatura media de los MCR, se partió de la idea de considerar un cambio mínimo proyectado en la cobertura vegetal de la zona, con base en ello, se estimó que no se llegaría a un incremento en la cobertura de bosque, vegetación secundaria y pastizal tan significativo que rebasará el 50% de la cobertura con respecto al periodo base, por lo que el coeficiente de escurrimiento no rebasaría el valor de 0.14 (determinado a través de la ecuación 6 en donde se considera tipo de suelo, permeabilidad y cobertura del suelo), con base en este supuesto se calculó el escurrimiento para la temporada de lluvias de la siguiente manera (Figura 31):

Figura 31. Proyección del escurrimiento superficial al 2050



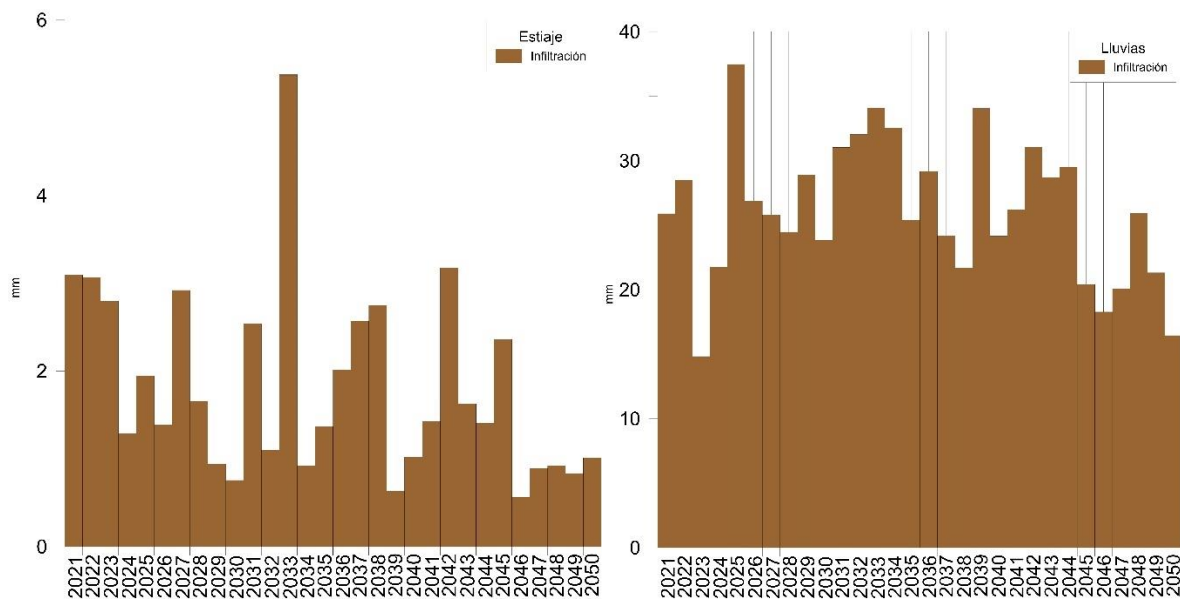
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el periodo base, el escurrimiento superficial para la temporada de estiaje es nulo, mientras que para la temporada de lluvias fue de 9.5 mm.

Cabe señalar que este cálculo solo es un supuesto, existen diversas variables que intervienen en ello y que pueden cambiar dicho estimado como es el cambio y uso de suelo y cobertura vegetal que pudiera presentarse en los próximos años. El resultado nos proporciona un panorama en donde la recarga de cuerpos de agua se vería afectada de forma moderada.

Mientras que en el cálculo de la infiltración (Fig. 32) se observó un comportamiento similar al del periodo base:

Figura 32. Proyección del proceso de infiltración al 2050.

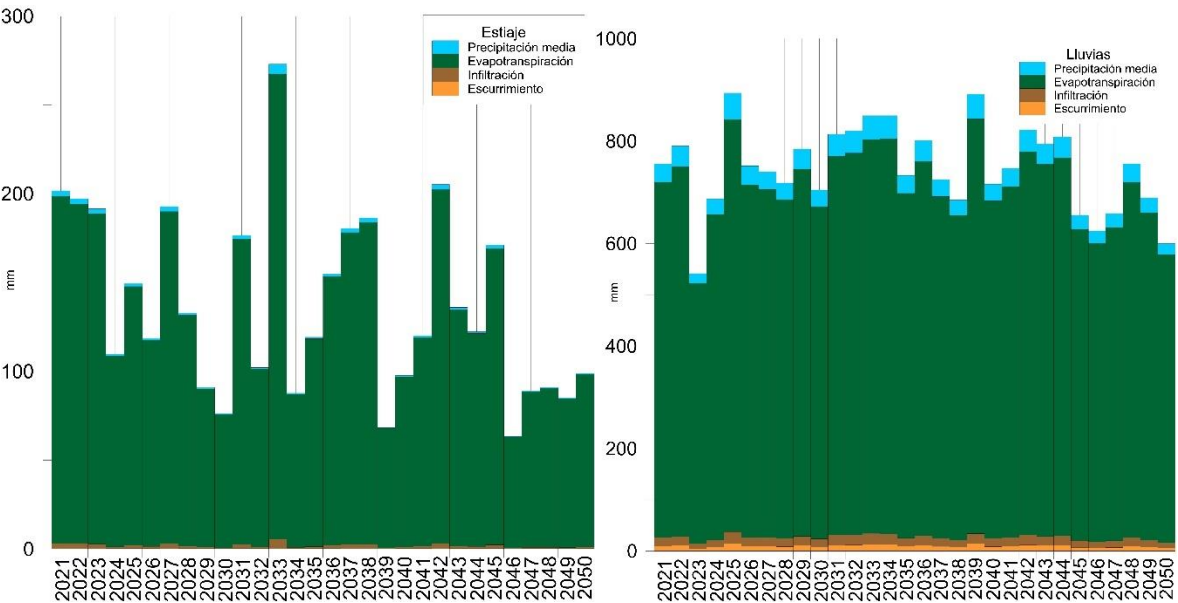


Fuente: Elaboración propia

En este caso, la infiltración para la proyección del periodo 2021-2050, se calculó 26.1 mm para la temporada de lluvias, mientras que para la temporada de estiaje fue de 1.8 mm.

La integración de estos resultados se observa de la siguiente manera (fig. 33):

Figura 33: Balance hídrico proyectado al 2050 por temporadas.



Fuente: Elaboración propia

Al comparar estos resultados con los del periodo base, obtendríamos una diferencia como la siguiente:

Tabla 12: Resultados del BHS base y proyectado.

BHS	1991-2020		2021-2050		Diferencia absoluta		Diferencia relativa	
	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
Precipitación media (mm)	153	757.1	136.3	747	16.6	10	10.9	1.3
Evapotranspiración (mm)	151	715.3	134.8	711.3	16.2	3.9	10.7	0.5
Escurrimiento (mm)	0	9.9	0.3	9.5	0.3	0.3	N/A (Bajo)	3.5
Infiltración (mm)	1.9	31.9	1.8	26.1	0.1	5.7	6.2	18

Fuente: Elaboración propia

Para la temporada de estiaje, se observa una disminución considerable en la variable de la precipitación media, que, bajo el escenario RCP8.5 significaría una prolongación de la temporada con lluvias tardías o menos frecuentes, registrándose precipitaciones mínimas en los años de 2046, 2049 y 2050, evidenciando eventos secos severos. En cuanto a la evapotranspiración también existe una disminución moderada, lo cual reflejaría una limitación por escasez de agua disponible, no menos demanda climática lo que incrementaría el riesgo en una menor transpiración, impacto en cultivos y evapotranspiración de suelos expuestos, en

el caso del escurrimiento, para el periodo base era nulo, sin embargo, en el periodo proyecto aparece un pequeño promedio de incremento con años puntuales, lo que sugeriría lluvias aisladas de alta intensidad, incluso en estiaje, probablemente por tormentas convectivas, aunque podrían generarse eventos de escurrimiento repentino (flash floods) de corta duración, no se traduce en mayor disponibilidad hídrica útil. Por último, la infiltración presenta un aumento significativo en términos relativos lo que podría deberse a una mayor ocurrencia de lluvias intensas aisladas. Estos resultados podrían ser indicativos de una tendencia a temporadas de estiaje más secas y prolongadas, debido a la dispersión de sus datos, se vuelve más impredecible. En este escenario, los principales impactos se reflejarían en una mayor presión sobre pozos y manantiales, riesgo en la pérdida de especies dependientes de humedad residual y un posible incremento en la severidad y duración de los incendios por los suelos secos y la escasa humedad residual.

Para el caso de la temporada de lluvias, en el caso del cálculo de la precipitación media, se observa una ligera disminución con mayores oscilaciones interanuales en el periodo futuro con años muy secos (2023, 2046 y 2050) y años muy húmedos (2025 y 2039) señal de una mayor variabilidad climática, si bien es cierto que el RCP8.5 no necesariamente reduce la precipitación total, sí alteraría su distribución temporal (menos días de lluvia, más eventos intensos); en este caso, la evapotranspiración también disminuye, probablemente por la limitación hídrica lo que se traduciría en estrés hídrico para cultivos. En el caso del escurrimiento hay una ligera disminución lo que implicaría una menor recarga superficial y reducción de caudales base. Por último, en el caso de la infiltración, se observa una disminución considerable, lo que estaría vinculado a reducción de lluvias útiles o de baja intensidad, suelos compactados y una menor humedad base para permitir la infiltración profunda.

De esta manera, se observa como el cambio climático podría afectar dos de los SE fundamentales para la vida de cualquier ser vivo; sin embargo, el ejercicio realizado en esta investigación se basa en el supuesto de la RCP8.5, elegido para ilustrar que la inacción nos llevaría a un futuro catastrófico, en el que la estructura y el dinamismo social actual, se vería profundamente afectado y el sistema descrito al inicio de esta investigación, podría alterarse significativamente. No obstante, conviene reconocer que el modelo interpretativo basado en el estructural-funcionalismo de las ciencias sociales, tiene límites para explicar cómo las acciones de los sujetos pueden modificar sistemas y estructuras, lo que refuerza la urgencia de establecer medidas de adaptación y mitigación en esta zona de estudio.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El cambio climático es un fenómeno natural que se ha presentado en el pasado; sin embargo, el actual cambio climático destaca por su origen antropogénico predominante. Este fenómeno ha sido impulsado principalmente por el incremento de CO₂ a la atmósfera. Prueba de ello es

que, tan solo durante el periodo de 1750 al 2011 se contabilizaron un total de $2\,040 \pm 310$ GtCO₂ acumuladas; alterando la temperatura del planeta, la cual durante el 2011 al 2020 incrementó en 1.09 °C con respecto a la temperatura registrada en 1850 a 1900. De continuar con esta tendencia, es muy probable que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2052.

Los resultados obtenidos muestran que, bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, la zona de estudio experimentaría un incremento consistente para el servicio de regulación climática (representado por la relación entre el calor y la atmósfera para determinar la variabilidad que pudiera presentarse), con una temperatura mínima de 3°C y una máxima de 25.53 °C con una variabilidad estable y una fluctuación media, en donde se obtuvo un promedio de 10.46 °C con una desviación estándar de 0.46 y un coeficiente de variación de 4.43 en el periodo base, mientras que para la proyección hacia el 2050, se observó una temperatura media de 16 °C, con una desviación estándar de 0.37 y un coeficiente de variación de 2.34. Lo cual representaría un incremento anual de 0.188 °C, aumentando paulatinamente hasta llegar a 5°C hacia el 2050.

Para el caso del servicio de provisión hídrica, la variable de precipitación media registro un promedio 153 mm para la temporada de estiaje y 757.1 mm para la temporada de lluvias en el periodo base, mientras que la precipitación media hacia el 2050, mostró una disminución en la temporada de estiaje del 13% con respecto al periodo base, ya que muestra una mayor desviación estándar (50.39) y un coeficiente de variación de 36.96 sugiriendo años más extremos y con mayor incertidumbre, así mismo se observa un descenso severo hacia finales del periodo (2046-2050), con una pérdida de casi el 50% respecto al primer quinquenio (2012-2025). Para la temporada de lluvias, se muestra una leve disminución de 1.5% con respecto al periodo base, con una desviación estándar de 81.97 y un coeficiente de variación de 10.97 con valores más estables en las proyecciones, con un descenso moderado-constante, lo cual, podría repercutir en procesos como el de recarga hídrica anual (especialmente en la evapotranspiración y escurrimiento superficial). De esta manera se refleja una alta sensibilidad de los SE analizados, frente a los cambios de las variables climáticas proyectadas, lo cual refuerza la pertinencia de evaluaciones prospectivas a escala subnacional.

Dichas proyecciones extremas derivadas del supuesto que representa la RCP8.5 tienen una tendencia similar a las investigaciones desarrolladas en países como Colombia, en la cuenca de Rio Sumapaz, en donde se proyectaría un escenario en donde el incremento en la temperatura fuera de 2.33 °C (Patiño & Rodríguez, 2019); en el altiplano chileno en donde se esperaría un incremento de 1°C y del 16% en magnitud de precipitación para el 2060 (Sota, 2022); en la ciudad de la Paz en Bolivia, donde bajo este escenario pesimista se esperaría un incremento general de temperatura, incremento de precipitación en época seca y reducción de precipitación en época húmeda, lo cual puede generar situaciones de sequía (Medina, 2021); en el caso de la zona de Arly en Burkina Faso habría un incremento en las precipitaciones actuales en cuanto a las temperaturas medias anuales se daría un decremento de 2°C, esto significaría una evapotranspiración potencial menor a la actual y una alteración en su régimen

bioclimático, pasando de ser xerófilo semiárido a seco subhúmedo (Artigas & Namono, 2020). En donde se presentan proyecciones diferenciadas (en algunos casos con afectaciones negativas y en otros favorecerían ciertas actividades), que, de volverse realidad, estaríamos frente a escenarios que afectarían bioclimas, procesos biogeoquímicos y ciclos naturales que modificarían el modo de vida de todos los seres vivos del planeta.

Con base en ello, se muestra que los resultados obtenidos en este estudio son consistentes en términos generales, con evaluaciones regionales previas que documentan una tendencia al incremento de la temperatura media y a modificaciones en los patrones de precipitación en el centro de México bajo escenarios de cambio climático de alta intensidad. Estudios realizados en regiones climáticamente comparables han reportado aumentos térmicos y una mayor variabilidad en la precipitación, lo que coincide con las tendencias identificadas para la zona de estudio (IPCC, 2021; Conde et. al., 2011; magaña et. al., 2012).

No obstante, las magnitudes específicas de los cambios proyectados difieren entre estudios, lo cual puede atribuirse a diferencias en la selección de modelos climáticos regionales, métodos de corrección de sesgos, escalas espaciales de análisis y periodos de referencia. Estas diferencias ponen de manifiesto la importancia de interpretar los resultados, no como valores deterministas, sino como rangos plausibles de cambio climático futuro, en concordancia con la literatura especializada (Knutti et. al., 2010). En relación con las fuentes de incertidumbre, es importante señalar que estas derivan principalmente de tres niveles: a) la incertidumbre asociada a los escenarios de emisiones, b) la incertidumbre estructural de los modelos climáticos y c) la incertidumbre introducida por los métodos de regionalización y corrección de sesgos. Si bien, el uso de modelos climáticos regionales y técnicas de corrección de sesgos contribuye a mejorar la representación de variables climáticas a escala subnacional, dichas herramientas no eliminan por completo la incertidumbre inherente a la modelación climática, particularmente, en lo relativo a la precipitación y temperatura media (IPCC, 2021).

Respecto a los valores extremos proyectados, estos deben interpretarse con cautela, en tanto representan respuestas del sistema bajo un escenario de forzamiento climático elevado y no proyecciones probabilísticas del futuro. No obstante, su análisis resulta relevante desde una perspectiva exploratoria, ya que permite identificar posibles umbrales de cambio y magnitudes de impacto que podrían tener implicaciones significativas para los SE analizados. En este sentido, los valores extremos no se interpretan como predicciones, sino como indicadores de sensibilidad del sistema ante perturbaciones climáticas intensificadas

De igual manera, los resultados presentados evidencian la evolución de los SE y su relación con la vulnerabilidad socioambiental, especialmente en municipios con baja resiliencia. Desde la perspectiva de sistemas complejos, se identificó, como el cambio climático afecta no solo componentes biofísicos, sino también la dinámica social. No obstante, conviene señalar que el marco del estructural-funcionalismo utilizado, tiene limitaciones para explicar la acción de los sujetos y la formulación de estrategias locales frente a escenarios de incertidumbre, dado su énfasis en estructuras macro y orden social. Por lo que, los hallazgos deben interpretarse considerando que la capacidad de adaptación y las decisiones de los actores locales pueden

modificar los efectos previstos. Esta reflexión destaca la necesidad de complementar la visión macro-social con análisis que incluyan la dinámica de los actores y la contingencia local, específicamente al proponer medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático dentro de la zona de estudio.

De esta manera la problemática del cambio climático, sus posibles impactos y la necesidad de actuar con base en mecanismos de adaptación y mitigación resultan evidentes. Ya que, de no implementarse estrategias adecuadas basadas en los instrumentos locales e internacionales a los que se encuentra inscrito el País para hacer frente al cambio climático; la zona de estudio podría enfrentar eventos extremos con mayor frecuencia e intensidad, como sequías prolongadas, lluvias torrenciales y olas de calor. Por ello, se justifica la necesidad de desarrollar políticas locales orientadas a la adaptación hídrica, la gestión sostenible del suelo y la vinculación entre temperatura y actividades humanas.

Así mismo, esta investigación resalta la importancia de articular los resultados con base en los principales instrumentos subnacionales de la zona de estudio, ya que algunos, aún no logran integrar estrategias concretas y efectivas de mitigación y adaptación al cambio climático con un enfoque sistémico. Se recomienda, además, vincular esta línea de análisis con iniciativas y plataformas internacionales como Copernicus, CORDEX, CMIP6, WorldClim o Climate Explorer, a fin de enriquecer las proyecciones mediante modelos y bases de datos comparables con otras RCP's.

Finalmente, la presente investigación proporciona una base científica que puede servir como insumo para futuras investigaciones, especialmente aquellas orientadas a la formulación de políticas públicas integrales de adaptación y mitigación. Las cuales deberán realizar esfuerzos por anticipar los escenarios climáticos proyectados y promover una transformación estructural desde lo cultural, institucional y operativo, con la participación de los gobiernos subnacionales y actores multidisciplinarios que coadyuven en la atención de esta problemática global.

ANEXOS

Anexo 1: Tabla de cálculo de vegetación (km²) en zona de estudio para el periodo de 1991-2020

DESCRIPCIÓN	AGRICULTURA DE HUMEDAD	AGRICULTURA DE RIEGO	AGRICULTURA DE TEMPORAL	BOSQUE DE ENCINO	BOSQUE DE ENCINO-PINO	BOSQUE DE OYAMEL
1980	1.20	59.03	911.39	110.10	81.13	185.78
1981	1.27	64.43	939.03	99.94	83.10	184.35
1982	1.34	69.84	966.66	89.78	85.08	182.92
1983	1.40	75.24	994.30	79.62	87.05	181.48
1984	1.47	80.65	1021.93	69.46	89.03	180.05
1985	1.54	86.05	1049.57	59.30	91.00	178.62

1986	1.55	86.65	1052.64	58.17	91.22	178.46	
1987	1.56	87.25	1055.71	57.04	91.44	178.30	
1988	1.56	87.85	1058.78	55.91	91.65	178.15	
1989	1.57	88.45	1061.85	54.78	91.87	177.99	
1990	1.58	89.05	1064.92	53.65	92.09	177.83	
1991	1.59	89.72	1068.33	52.40	92.33	177.65	
1992	1.60	90.39	1071.74	51.14	92.58	177.47	
1993	1.60	91.05	1075.16	49.89	92.82	177.30	
1994	1.61	91.72	1078.57	48.63	93.07	177.12	
1995	1.62	92.39	1081.98	47.38	93.31	176.94	
1996	1.57	92.61	1083.20	45.17	91.90	174.26	
1997	1.51	92.84	1084.43	42.96	90.49	171.58	
1998	1.46	93.06	1085.65	40.76	89.08	168.90	
1999	1.40	93.29	1086.88	38.55	87.67	166.22	
2000	1.35	93.51	1088.10	36.34	86.26	163.54	
2001	1.34	93.57	1088.41	35.79	85.91	162.87	
2002	1.33	93.62	1088.71	35.24	85.56	162.20	
2003	1.31	93.68	1089.02	34.68	85.20	161.52	
2004	1.30	93.73	1089.32	34.13	84.85	160.85	
2005	1.29	93.79	1089.63	33.58	84.50	160.18	
2006	1.29	94.27	1104.99	33.22	82.72	159.02	
2007	1.29	94.75	1120.35	32.85	80.94	157.86	
2008	1.29	95.23	1135.70	32.49	79.16	156.70	
2009	1.29	95.71	1151.06	32.12	77.38	155.54	
2010	1.29	96.19	1166.42	31.76	75.60	154.38	
2011	1.35	96.81	1159.52	32.46	75.65	154.87	
2012	1.41	97.42	1152.61	33.17	75.71	155.36	
2013	1.47	98.04	1145.71	33.87	75.76	155.85	
2014	1.53	98.65	1138.81	34.58	75.82	156.35	
2015	1.59	99.27	1131.90	35.28	75.87	156.84	
2016	1.65	99.88	1125.00	35.98	75.92	157.33	
2017	1.71	100.50	1118.09	36.69	75.98	157.82	
2018	1.77	101.11	1111.19	37.39	76.03	158.31	
2019	1.77	101.11	1111.19	37.39	76.03	158.31	
2020	1.77	101.11	1111.19	37.39	76.03	158.31	
DESCRIPCIÓN	BOSQUE DE PINO	BOSQUE DE PINO-ENCINO	BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	CUERPO DE AGUA	PASTIZAL INDUCIDO	DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	PRADERA DE ALTA MONTAÑA
1980	186.44	789.01	40.47	36.94	536.41	1.87	0.89
1981	181.72	772.41	39.11	39.10	524.87	1.83	0.97

1982	177.00	755.82	37.75	41.26	513.33	1.79	1.05
1983	172.29	739.22	36.39	43.42	501.80	1.76	1.13
1984	167.57	722.63	35.03	45.58	490.26	1.72	1.21
1985	162.85	706.03	33.67	47.74	478.72	1.68	1.29
1986	162.33	704.19	33.52	47.98	477.44	1.68	1.30
1987	161.80	702.34	33.37	48.22	476.16	1.67	1.31
1988	161.28	700.50	33.22	48.47	474.87	1.67	1.31
1989	160.75	698.65	33.07	48.71	473.59	1.66	1.32
1990	160.23	696.81	32.92	48.95	472.31	1.66	1.33
1991	159.65	694.76	32.75	49.22	470.89	1.65	1.34
1992	159.06	692.71	32.58	49.48	469.46	1.65	1.35
1993	158.48	690.67	32.42	49.75	468.04	1.64	1.36
1994	157.89	688.62	32.25	50.01	466.61	1.64	1.37
1995	157.31	686.57	32.08	50.28	465.19	1.63	1.38
1996	153.08	694.50	32.16	50.28	465.17	1.63	1.38
1997	148.84	702.42	32.25	50.28	465.16	1.63	1.38
1998	144.61	710.35	32.33	50.28	465.14	1.64	1.38
1999	140.37	718.27	32.42	50.28	465.13	1.64	1.38
2000	136.14	726.20	32.50	50.28	465.11	1.64	1.38
2001	135.08	728.18	32.52	50.28	465.11	1.64	1.38
2002	134.02	730.16	32.54	50.28	465.10	1.64	1.38
2003	132.96	732.15	32.57	50.28	465.10	1.64	1.38
2004	131.90	734.13	32.59	50.28	465.09	1.64	1.38
2005	130.84	736.11	32.61	50.28	465.09	1.64	1.38
2006	160.64	690.55	32.98	50.37	451.49	1.61	1.38
2007	190.44	644.99	33.35	50.46	437.89	1.58	1.38
2008	220.24	599.42	33.73	50.55	424.28	1.56	1.38
2009	250.04	553.86	34.10	50.64	410.68	1.53	1.38
2010	279.84	508.30	34.47	50.73	397.08	1.50	1.38
2011	280.15	508.03	34.46	50.73	397.44	1.50	1.34
2012	280.46	507.77	34.45	50.72	397.79	1.50	1.30
2013	280.76	507.50	34.44	50.72	398.15	1.50	1.26
2014	281.07	507.23	34.44	50.71	398.50	1.50	1.22
2015	281.38	506.96	34.43	50.71	398.86	1.50	1.17
2016	281.69	506.70	34.42	50.70	399.21	1.50	1.13
2017	281.99	506.43	34.41	50.70	399.57	1.50	1.09
2018	282.30	506.16	34.40	50.69	399.92	1.50	1.05
2019	282.30	506.16	34.40	50.69	399.92	1.50	1.05
2020	282.30	506.16	34.40	50.69	399.92	1.50	1.05

DESCRIPCIÓN	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA CADUCIFOLIA	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL
1980	48.40	2.02	58.90	119.00	122.96	2.43
1981	45.71	4.17	54.84	129.28	119.94	2.56
1982	43.02	6.31	50.78	139.55	116.92	2.70
1983	40.33	8.46	46.71	149.83	113.89	2.83
1984	37.64	10.60	42.65	160.10	110.87	2.97
1985	34.95	12.75	38.59	170.38	107.85	3.10
1986	34.65	12.99	38.14	171.52	107.51	3.12
1987	34.35	13.23	37.69	172.66	107.18	3.13
1988	34.06	13.47	37.23	173.81	106.84	3.15
1989	33.76	13.71	36.78	174.95	106.51	3.16
1990	33.46	13.95	36.33	176.09	106.17	3.18
1991	33.13	14.21	35.83	177.36	105.80	3.20
1992	32.80	14.48	35.33	178.63	105.43	3.21
1993	32.46	14.74	34.83	179.89	105.05	3.23
1994	32.13	15.01	34.33	181.16	104.68	3.24
1995	31.80	15.27	33.83	182.43	104.31	3.26
1996	31.69	18.51	33.83	174.07	101.50	3.46
1997	31.59	21.74	33.83	165.71	98.68	3.66
1998	31.48	24.98	33.83	157.35	95.87	3.87
1999	31.38	28.21	33.83	148.99	93.05	4.07
2000	31.27	31.45	33.83	140.63	90.24	4.27
2001	31.24	32.26	33.83	138.54	89.54	4.32
2002	31.22	33.07	33.83	136.45	88.84	4.37
2003	31.19	33.87	33.83	134.36	88.13	4.42
2004	31.17	34.68	33.83	132.27	87.43	4.47
2005	31.14	35.49	33.83	130.18	86.73	4.52
2006	28.72	36.97	32.68	136.77	86.73	4.82
2007	26.31	38.45	31.53	143.35	86.73	5.12
2008	23.89	39.93	30.39	149.94	86.74	5.43
2009	21.48	41.41	29.24	156.52	86.74	5.73
2010	19.06	42.89	28.09	163.11	86.74	6.03
2011	18.78	45.05	28.10	162.05	86.56	7.45
2012	18.50	47.21	28.10	160.99	86.38	8.87
2013	18.21	49.36	28.11	159.93	86.19	10.29
2014	17.93	51.52	28.12	158.87	86.01	11.71
2015	17.65	53.68	28.12	157.81	85.83	13.13
2016	17.37	55.84	28.13	156.75	85.65	14.55

2017	17.08	57.99	28.13	155.69	85.46	15.97
2018	16.80	60.15	28.14	154.63	85.28	17.39
2019	16.80	60.15	28.14	154.63	85.28	17.39
2020	16.80	60.15	28.14	154.63	85.28	17.39
DESCRIPCIÓN	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO- ENCINO	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	ZONA URBANA		
1980	111.09	1.08	149.14	7.61		
1981	114.90	1.38	124.98	7.61		
1982	118.71	1.68	100.82	7.61		
1983	122.53	1.99	76.66	7.61		
1984	126.34	2.29	52.50	7.61		
1985	130.15	2.59	28.34	7.61		
1986	130.57	2.62	25.65	7.78		
1987	130.99	2.66	22.97	7.95		
1988	131.42	2.69	20.28	8.12		
1989	131.84	2.73	17.60	8.29		
1990	132.26	2.76	14.91	8.46		
1991	132.73	2.80	13.42	8.65		
1992	133.20	2.84	11.93	8.84		
1993	133.67	2.87	10.44	9.02		
1994	134.14	2.91	8.95	9.21		
1995	134.61	2.95	7.46	9.40		
1996	127.46	3.80	5.96	9.40		
1997	120.31	4.65	4.47	9.40		
1998	113.16	5.49	2.98	9.40		
1999	106.01	6.34	1.49	9.40		
2000	98.86	7.19	0.00	9.40		
2001	97.07	7.40	12.56	9.40		
2002	95.28	7.61	25.11	9.40		
2003	93.50	7.83	37.67	9.40		
2004	91.71	8.04	50.23	9.40		
2005	89.92	8.25	62.79	9.40		
2006	89.17	8.27	75.34	11.64		
2007	88.42	8.29	87.90	13.87		
2008	87.67	8.30	100.46	16.11		
2009	86.92	8.32	113.01	18.34		
2010	86.17	8.34	125.57	20.58		
2011	86.25	8.45	125.60	23.79		
2012	86.32	8.56	125.64	27.01		

2013	86.40	8.67	125.67	30.22
2014	86.48	8.78	125.71	33.44
2015	86.55	8.88	125.74	36.65
2016	86.63	8.99	125.77	39.86
2017	86.70	9.10	125.81	43.08
2018	86.78	9.21	125.84	46.29
2019	86.78	9.21	125.84	46.29
2020	86.78	9.21	125.84	46.29

FUENTES DE CONSULTA

Publicaciones periódicas

- Aburto Jarquín, P. A. . (2022). El planeta amenazado y amenazante por el cambio climático. *Revista Humanismo y Cambio Social*, 152–169. <https://doi.org/10.5377/hcs.v19i19.14126>
- Aguayo Armijo, F. (2022). El cambio climático como problema global: herramientas jurídicas para conciliar ambición y eficacia y el rol del Acuerdo de París. *Desafíos*, 34(1). <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/desafios/a.10831>
- Aguilar, V. M. S., Olave, M. E. T., Villalobos, H. L. R., Cejudo, L. C. A., & Peña, L. C. B. (2021). Alternativa probabilística bayesiana para una estimación mejor del coeficiente de cultivo basado en índices de vegetación. *Agrociencia*, 55(2), 117-131.
- Aguirre, N., Ojeda, T., & Eguiguren, P. (2010). El cambio climático y la conservación de la biodiversidad en el Ecuador. *Artículos de investigación Acuacultura*, 1(1), 17.
- Agreda, L. V. P., Parra, D. F. S., & Flores, I. G. (2021). Estimación del escurrimiento superficial utilizando sistemas de información geográfica, caso de estudio: Ciudad de Guanajuato, Jóvenes en la Ciencia: XXVI Verano de la Ciencia. Vol. 10(2021), <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/5633>
- Alfaro, P. (2007). Un estudio integrado del relieve terrestre. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(2), 112-123
- Alfaro, P. (2011). Un modelo para el funcionamiento del interior terrestre y su interacción con la superficie. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 17(67), 20-27
- Alfaro, P., et. al (2013). Fundamentos conceptuales y didácticos: La tectónica de placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21(2), 168-180.
- Álvarez, A. G., H. A. Ibáñez, M. E. Orozco, & B. García. (2020). Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales* 22(2): 5-19.
- Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J., & Ramón, J. (2015). Cambio climático y variabilidad climática para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos zulía y pamplonita, norte de santander-colombia. *Luna Azul*, (40), 127-153.
- Amblar-Francés, P., Ramos-Calzado, P., & Pastor Saavedra, A. (2018). Comparación entre métodos de corrección de sesgos para las proyecciones de cambio climático en los Pirineos. *Predicción de tiempo y clima orientada a impactos*, 6.

- Araiza-Olivares, G. A. (2022). La isla de calor en la Ciudad de México: Un análisis decadal (1950-2010). *Revista Geográfica de América Central*, (69), 415-436.
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Los retos del agua en México/Water challenges in Mexico. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2), 341-371.
- Arnold, M. (1998). Introducción a los conceptos básicos de la teoría general de sistemas. *Cinta de Moebio. Revista de Epistemología de Ciencias Sociales*(3)
- Azarte, D. A., Villanueva, W. F., Rodríguez, A. L., & Rohrer, M. (2019). Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales. In *Anales Científicos* (Vol. 80, No. 2, pp. 476-494). Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas* 21(1-2):136-147
- Becerra, Gastón. (2020). La Teoría de los Sistemas Complejos y la Teoría de los Sistemas Sociales en las controversias de la complejidad. *Convergencia*, 27, e12148. Epub 29 de mayo de 2020.<https://doi.org/10.29101/crcs.v27i83.12148>
- Belmonte Serrato, F., & Romero Díaz, A. (2006). Medida de la evapotranspiración real en coberturas vegetales semiáridas (cuenca de mula, murcia), según las variaciones de humedad del suelo medidas mediante el procedimiento (TDR). *Papeles de Geografía*, (43), 5–17. Recuperado a partir de <https://revistas.um.es/geografia/article/view/43481>
- Bellouin, N., Rae, J., Jones, A., Johnson, C., Haywood, J., & Boucher, O. (2011). Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20).
- Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J. B., Iversen, T., Kirkevåg, A., Seland, Ø., ... & Kristjansson, J. E. (2013). The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M–Part 1: description and basic evaluation of the physical climate. *Geoscientific Model Development*, 6(3), 687-720.
- Block, K., & Mauritsen, T. (2013). Forcing and feedback in the MPI-ESM-LR coupled model under abruptly quadrupled CO₂. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(4), 676-691.
- Bonilla-López, E., Lobato-Sánchez, R., Medellín-Azuara, J., & Patiño-Gómez, C. (2025). Satellite precipitation product assessment and correction technique selection at sub-basin scale for maximum annual events. Case study: Acaponeta River basin. *Atmósfera*, 39, 49–75. <https://doi.org/10.20937/ATM.53385>
- Bordera, J., Valladares, F., Turiel, A., Ferran, P. V., Prieto, F., & Hewlett, T. (2022). Advertencias del panel intergubernamental del cambio climático. *Revista de Economía Institucional*, 24(46), 237-247. Doi:<https://doi.org/10.18601/01245996.v24n46.12>
- Botey, R., & J. V. Moreno. (2015). Metodología para estimar la humedad del suelo mediante un balance hídrico exponencial diario. *Agencia Estatal de Meteorología, Área de Climatología y Aplicaciones Operativas*. Madrid-España, pp. 3-4. Disponible en línea en: https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/balance_hidrico/Metodologia.pdf (consultado el 13 de junio de 2024)
- Bradley, R. S., & Jonest, P. D. (1993). 'Little Ice Age' summer temperature variations: their nature and relevance to recent global warming trends. *The Holocene*, 3(4), 367-376.
- Cabañas, R. T. (2012). Júpiter y clima terrestre. *Revista Geográfica*, 151, 179–192. <http://www.jstor.org/stable/43558012>

- Calabrese, M. V. G., Paniagua, M. T., & Chicaiza, E. (2022). Análisis de la distribución espacial de la precipitación anual (1979-2014) aplicando métodos de interpolación en la Región Occidental del Paraguay. *Revista Geográfica*, (164), 63-81
- Camacho-Valdez et. al (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4).
- Carrera-Villacrés, D. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador y cálculo de la precipitación media, IDESA, Chile, 2016.
- Carrillo-Bastos, A., Islebe, G., Ulanie Rosas, C. B., & Villegas-Sánchez, C. A. (2019). Anomalía climática medieval y la pequeña edad de hielo en Quintana Roo. (Spanish). *AvaCient. Formación Integral Científica, Tecnológica y Humanista*, 6(1), 95–105.
- Cartaya, S., Zurita, S., & Montalvo, V. (2016). Métodos de ajuste y homogenización de datos climáticos para determinar índice de humedad de Lang en la provincia de Manabí, Ecuador. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*. E-ISSN 2477-8982, (16), 94-106
- Carvalho, A. M., R. L. de Carvalho, G. Vianello, M. Sediya, A. De Oliveira, & Junior De Sá. (2013). Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 113, Issue 1-2: 155-174. DOI: 10.1007/s00704-012-0772-1
- Casillas-Higuera, Africa, García-Cueto, Rafael, Camacho, Osvaldo, & Gonzalez-Navarro, Felix F. (2014). Detección de la isla urbana de calor mediante modelado dinámico en mexicali, b.c., México. *Información tecnológica*, 25(1), 139-150. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000100015>
- Celestin, S., Qi, F., Li, R., Yu, T., & Cheng, W. (2020). Evaluation of 32 simple equations against the Penman–Monteith method to estimate the reference evapotranspiration in the Hexi Corridor, Northwest China. *Water*, 12(10), 2772.
- Cervantes, R. I. C., & Martínez, S. A. (2021). Estrategias sustentables para Cd. Loreto BCS; humedales artificiales y propuesta vegetal para resiliencia y desarrollo local. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 21(41).
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P. & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 (6630), 253-260.
- Cordoba, Samir (2011). Estimación de la precipitación media, evaluación de la red pluviométrica y cuantificación del balance hídrico en la cuenca del Río Quito en el departamento del Chocó Colombia, 2011
- Correa Assmus, G. (2022). Disponibilidad, acceso y calidad del agua: una reflexión socioambiental para Colombia. *Revista de la Universidad de La Salle*, 2021(87), 151-166.
- Cruz, C. M. G. (2019). La teoría de la Tierra de Immanuel Kant. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32, 1.
- Del Saz, S. (2008). Medio ambiente y desarrollo: una revisión conceptual CIRIEC-España, revista de economía pública, social y cooperativa, (61), 31-49.
- De la Rosa, A., Valdés-Rodríguez, O.A., Villada-Canela, M., Manson, R., Murrieta-Galindo, R. (2021). Characterizing water security with a watershed approach: Case study Veracruz, Mexico. *Ingeniería del agua*, 25(3), 187-203. <https://doi.org/10.4995/Ia.2021.15221>

- Díaz Lezcano, M., Rodríguez Benítez, M., Moreno Resquín, H., & Britos Benítez, C. (2022). Servicio ecosistémico de regulación de un bosque de galería del arroyo San Lorenzo, Paraguay. *Agronomía Costarricense*, 46(1). <https://doi.org/10.15517/rac.v46i1.49874>
- Dimitriadou, S., & Nikolakopoulos, K. G. (2021). Annual Actual Evapotranspiration Estimation via GIS Models of Three Empirical Methods Employing Remotely Sensed Data for the Peloponnese, Greece, and Comparison with Annual MODIS ET and Pan Evaporation Measurements. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 522. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080522>
- Diouf, O. C., Weihermüller, L., Ba, K., Cisse Faye, S., Faye, S., & Vereecken, H. (2016). Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 110(1), 117–137. <https://doi.org/10.12895/jaeid.20161.417>
- Dufresne, J.L., Foujols, M.A., Denvil, S. et al (2013). Proyecciones de cambio climático utilizando el Modelo del Sistema Terrestre IPSL-CM5: de CMIP3 a CMIP5. *Clim Dyn* 40 , 2123–2165. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- Duval, V. S., & Benedetti, G. M. (2019). Política de conservação do património natural na Argentina. *Finisterra-Revista Portuguesa de Geografia*, (111), 101-118
- Fassbender, H. (2000). Conceptualización y consecuencias edafológicas de los impactos ambientales en ecosistemas naturales y agrarios en América Latina. *Revista de Ciencias Ambientales*, 20(3), 65-77.
- Figueras, B. M., & A. Torrents. (2022). El futuro está por crear: temporalidad e imaginación en el Antropoceno. *Artnodes*, revista de arte, ciencia y tecnología, N° 29: 1-9. ISSN-e 1695-5951
- Flores-Velázquez, J., & Vega-García, M. (2019). Regional management of the environment in a zenith greenhouse with computational fluid dynamics (CFD). *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 11(1), 3-20.
- Florian, V. C., H. D. Salas, & J. A. Builes. (2021). Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE. *TecnoLógicas*, 24 (52): 242-261
- Fonseca, N. E. (2022). Valoración de los servicios ecosistémicos de provisión en agroecosistemas campesinos. Caso: Provincia de Sumapaz, Cundinamarca. *SUMMA. Revista disciplinaria en ciencias económicas y sociales*, 4(1), 1-18.
- Fontúrbel, R., & Molina, A. (2004). Origen del agua y el oxígeno molecular en la tierra, *Elementos: ciencia y cultura*, marzo-mayo/vol. 11, núm. 053, Benemérita Universidad de Puebla, 3-9
- García-Bandala, M., García-Beltrán, A. N., Medina-García, G., Servín-Palestina, M., & Ramírez-Cabral, N. (2021). Efecto posible del cambio climático sobre la demanda de agua de cultivos importantes en Zacatecas. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 20(2), e202104001-e202104001.
- García-Pérez, J. E. (2022). Especies como sistemas: un enfoque filosófico. *Ludus Vitalis*, 29(56), 65-88.
- García-Rodeja, I. (1999). El sistema Tierra y el efecto invernadero. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 6(20), 75-84.

- Garrido, J. D. R. (1980). Papel de los procesos analógicos en la representación del mundo. Explicaciones en torno al origen y formación de las nubes. *Infancia y Aprendizaje*, 3(9), 110-121.
- Gaspari, F. J., Díaz Gómez, A. R., & Montealegre Medina, F. A. (2021). Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 12.
- Gavilán, S. A., Pastore, J. I., Quignard, I., Marasco, N. D., & Aceñolaza, P. G. (2019). Modelo de balance de energía para estimar evapotranspiración real a partir de información satelital y meteorológica. *Interiencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 44(7), 400-407.
- Giménez, Luis, & García Petillo, Mario. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 100-108. Recuperado en 27 de julio de 2022, de http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482011000200012&lng=es&tlng=es.
- Gispert, M. Í., Hernández, M. A. A., Climent, E. L., & Flores, M. F. T. (2018) Captación de Agua de Lluvia como una opción de agua potable en la Ciudad de México.), *Sustainability*, 10,3890
- Gómez, V. J. G., & Freire, E. E. E. (2022). Educación para el cambio climático. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 5(2), 17-24.
- González, E. L. (2018). Las vertientes de la complejidad: Pensamiento sistémico, ciencias de la complejidad, pensamiento complejo, paradigma ecológico y enfoques holistas. *ITESO*.
- Gutiérrez, J. M., & Pons, M. R. (2006). Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica. *Revista de Cuaternario y geomorfología*, 20(3-4), 15-28.
- Gürkan, H. , Arabacı, H. , Demircan, M. , Eskioğlu, O. , Şensoy, S. & Yazıcı, B. (2016). GFDL-ESM2M Modeli temelinde RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre Türkiye için sıcaklık ve yağış projeksiyonları . *Coğrafi Bilimler Dergisi* , 14 (2) , 77-88 . DOI: 10.1501/Cogbil_0000000174
- Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). Emissions—the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618-620.
- Hazeleger, W., & Bintanja, R. (2012). Studies with the EC-Earth seamless earth system prediction model. *Climate Dynamics*, 39(11), 2609-2610.
- Herger, N., Angélil, O., Abramowitz, G., Donat, M., Stone, D., & Lehmann, K. (2018). Calibrating climate model ensembles for assessing extremes in a changing climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(11), 5988-6004.
- Hernández Balanzar, J. R. (2008). El metabolismo de la Tierra. *Revista Ciencias*, 90(090), UNAM,
- Hernández-Díaz, L., Nikiéma, O., Laprise, R., Winger, K., & Dandoy, S. (2019). Effect of empirical correction of sea-surface temperature biases on the CRCM5-simulated climate and projected climate changes over North America. *Climate Dynamics*, 53(1-2), 453-476.
- Hernández, Y. . (2020). Cambio climático: causas y consecuencias. *Renovat: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*, 4(1), 38–53. Recuperado a partir de <https://revistas.sena.edu.co/index.php/rnt/article/view/3517>

- Hua, W., Chen, H., Sun, S., & Zhou, L. (2015). Assessing climatic impacts of future land use and land cover change projected with the CanESM2 model. *International Journal of Climatology*, 35(12), 3661-3675.
- Iglesias Piña, David. (2017). La valoración económica y mercantilización del agua de consumo humano en el Estado de México. Algunos determinantes. *Espiral (Guadalajara)*, 24(68), 79-109.
- Íñiguez Covarrubias, M., Ojeda Bustamante, W., Díaz Delgado, C., Mamadou Bâ, K., & Mercado Escalante, R. (2011). Análisis metodológico de la distribución espacial de la precipitación y la estimación media diaria. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(1), 57-69.
- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., & Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. *Climate dynamics*, 37(3-4), 605.
- Keen, S. (2021). La pésima economía neoclásica del cambio climático. *Revista de Economía Institucional*, 23(44), 13-52.
- Kerschner, C. (2008). Economía en estado estacionario vs. decrecimiento económico: ¿opuestos o complementarios? *Ecología política*(35), 13-16.
- Lara Rodríguez, N. Z., & Travieso Bello, A. C. (2022). Enfoques econométricos para estimar impactos económicos del cambio climático en la agricultura. *UVserva*, (13), 141-162. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi13.2835>.
- Lenton, T. M. (2023). Climate change and tipping points in historical collapse. In *How Worlds Collapse* (pp. 261-281). Routledge.
- López, Y. G., Monzón, H. B., & Gómez, M. D. (2022). Proyección climática para el periodo 2006-2075 para el valle de Jauja, simulada por la intercomparación de modelos acoplados CSIRO Mk 3.0, MIROC-ESM y CNRM de fase 5 (CMIP5). *Ingeniería Industrial*, 297-330.
- López Gamboa, Y., & Elpidio Pérez, M. (2022). Seguridad alimentaria y transformación agraria sostenible. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(1), 2586-2595. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1668
- Lopez, E. E., Pintos, G., Corral, M. A., & Rodríguez, A. (2021). Vulnerabilidad hídrica del gran Córdoba ante escenarios de sequías y análisis de alternativas para la provisión de agua, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*; 8; 1; 4-2021; 31-39.
- López-Enríquez, J. C., Rosas-Alquicira, E. F., Chávez, E. J. R., & García, A. C. (2013). Datos preliminares de la estructura y la formación de las comunidades de manglar en Zipolite, Oaxaca. *Ciencia y Mar*, 20(52), 31-35.
- Luna López, R., Hernández Rodríguez, M. de L., Castellón Gómez, J. J. ., & María Ramírez, A. . (2020). Un acercamiento a la problemática hídrica en México: Conflictos por el agua en un territorio hortícola del Acuífero Valle Tecamachalco. *Diversidad*, (19), 42-57. Recuperado a partir [de http://www.idesmac.org/revistas/index.php/diversidad/article/view/7](http://www.idesmac.org/revistas/index.php/diversidad/article/view/7)
- Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., & De Maeyer, P. (2018). Comparing bias correction methods used in downscaling precipitation and temperature from regional climate models: a case study from the Kaidu River Basin in Western China. *Water*, 10(8), 1046.
- May-Tec, A.L., Mendoza-Franco, E.F., (2022). Variabilidad temporal de crustáceos parásitos de peces y su importancia para el manejo de los recursos costeros ante el cambio climático

- antropogénico. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 4(1): 63-78. doi 10.26359/52462.0522
- Maldonado, E. G. (2022). Análisis de las causas de la migración en el contexto del cambio climático según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Determinismo climático e ideología. Revista de El Colegio de San Luis, 12(23), 1-32.
- Martín-Álvarez ID, Rodríguez-Rodríguez L, Soler-Fernández FE, Pérez-labrador JH, Perez-Cardoso JJ, Arencibia-Parada NM, (2022). Cambio climático y bioseguridad en tiempos de la COVID. Rev Ciencias Médicas [Internet]. 2022 Disponible en: <http://revcmpinar.sld.cu/index.php/publicaciones/article/view/5497>
- Martínez, M., Lorenzo, É., & Álvarez, A. (2017). Los Ciclos de Milankovitch: Origen, Reconocimiento, Aplicaciones en Cicloestratigrafía y el estudio de Sistemas Petroleros. Revista Científica y Tecnológica UPSE, 4(3), 56-65.
- Martínez-Mendoza, A., Domínguez-Mariani, E., & Altamirano-Santiago, M., (2021) La Gobernanza Hídrica Como Un Desafío Nacional El Agua En El Contexto Post-Pandemia. El Caso De Lerma, Estado De México, Revista de Investigaciones Universidad del Quindío, Colombia ISSN: 1794-631X, ISSN-e: 2500-5782 vol. 33, núm. 2, 2021
- McColl, K. A. (2020). Practical and theoretical benefits of an alternative to the Penman-Monteith evapotranspiration equation. Water Resources Research, 56(6), e2020WR027106.
- Mackay, D. S., Samanta, S., Nemani, R. R., & Band, L. E. (2003). Multi-objective parameter estimation for simulating canopy transpiration in forested watersheds. Journal of Hydrology, 277(3-4), 230-247.
- McLeana, N., Kruuk, L.E.B., van der Jeugd, H.P., Leech, D., van Turnhout, C.A.M. y van de Pol, M., (2022). Warming temperatures drive at least half of the magnitude of longterm trait changes in European birds. PNAS 119(10).
- Medina, C. (2021). Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático para un embalse de abastecimiento de agua en La Paz, Bolivia. Investigación & Desarrollo, 21(1), 63-78.
- Medina-García, G., Grageda-Grageda, J., Ruiz-Corral, J. A., Casas-Flores, J. I., Rodríguez-Moreno, V. M., & Mora-Orozco, C. D. L. (2019). Disminución de las horas frío como efecto del cambio climático en México. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 10(6), 1325-1337.
- Mendez, M.; Calvo-Valverde, L.-A.; Maathuis, B.; Alvarado-Gamboa, L.-F., (2019). Generation of Monthly Precipitation Climatologies for Costa Rica Using Irregular Rain-Gauge Observational Networks. Water 2019, 11, 70. <https://doi.org/10.3390/w11010070>. https://github.com/maikelonu/Research_Precipitation_Climatologies_Costa_Rica
- Meza-Rodríguez, Demetrio, Martínez-Rivera, Luis Manuel, Mercado-Silva, Norman, Jalón-Lastra, Diego García de, Tánago-Del Río, Marta González del, Marchamalo-Sacristán, Miguel, & Mora-Orozco, Celia De la. (2017). Propuesta de caudal ecológico en la cuenca del Río Ayuquila-Armería en el Occidente de México. Latin american journal of aquatic research, 45(5), 1017-1030. <https://dx.doi.org/10.3856/vol45-issue5-fulltext-17>
- Mooney, H. A., Ehrlich, P. R., & Daily, G. (1997). Ecosystem services: a fragmentary history. Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems, 11-19.
- Monterroso, Rivas (2016). Cambio en la disponibilidad hídrica futura en un bosque mesófilo de montaña de México, Interciencia, abril 2016, vol 41, #4 pág. 268

- Montiel Gonzaga, Ricardo, Prado Hernández, Jorge Víctor, Vázquez Peña, Mario Alberto, Ibáñez Castillo, Laura Alicia, & Pascual Ramírez, Fermín. (2019). Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 291-301. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.484>
- Morales Corozo, J. P. (2021). Diagnóstico del servicio ambiental de provisión hídrica en las comunidades indígenas de la parroquia Lumbaqui. Ecuador, *Revista de Ciencia y Tecnología / Agrollanía / Vol. 20 / Año 2021 / 89 – 98 / ISSN 2665-0053*
- Moratiel, R., Bravo, R., Saa, A., Tarquis, A. M., & Almorox, J. (2020). Estimation of evapotranspiration by the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) Penman–Monteith temperature (PMT) and Hargreaves–Samani (HS) models under temporal and spatial criteria—a case study in Duero basin (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(3), 859-875.
- Muntadas, B., & Torrents, A. (2022). El futuro está por crear: temporalidad e imaginación en el Antropoceno. *Artnodes*, (29).
- Muñoz-Carpena, R., & Gowdisha, L. (2005). Aplicación del método de infiltración de Green-Ampt con redistribución de humedad del suelo entre encharcamientos. VII Jornada de investigación en zonas no saturada del suelo, 205-213.
- Narváez Álvarez, M. J. (2025). Derechos de la naturaleza y derecho a la ciudad: Estudio de caso de las laderas del Pichincha. *Revista Cálamo*, 22(22), 30–44. <https://doi.org/10.61243/calamo.22.435>
- Nieves-Vilchez, I. A., Castillo-Infante, H. J., Carillo-Espinoza, J. I., & Pampa-Quispe, N. B. (2022). Estudio hidrológico de una cuenca para la evaluación del potencial de una pico central hidroeléctrica en una zona rural. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(1), 292-332.
- Nunes, L. H. (2019). O Avanço Científico Se Dá Ao Acaso? O conhecimento da atmosfera no contexto histórico. *Geo UERJ*, (pag. 13), 40948.
- Núñez, I., González Gaudiano, E., & Barahona, A. (2003). La biodiversidad: historia y contexto de un concepto. *Interciencia*, 28(7).
- Orantes, J. L. (2022). La determinación del eje apsidal de la Tierra según la antigua astronomía griega. (Portuguese). *Revista Espanola de Fisica*, 36(1), 9–14, Accessed August 22, 2022. <https://ebsco.uam.elogim.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=156783385&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Orozco, I., Ramírez, A. I., & Francés, F. (2018). Modelación de los impactos del Cambio Climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Ingeniería del agua*, 22(3), 125-139.
- Orozco-Hernández, M., Tapia-Quevedo, J., Míreles-Lezama, P., Vera-Bolaños, M., García-Fajardo, B., & Álvarez-Arteaga, G. (2015). Desarrollo agropecuario y variación climática en el Estado de México. *Quivera Revista De Estudios Territoriales*, 17(1), 99-119. Consultado de <https://quivera.uaemex.mx/article/view/9831>
- Ospovat, A. M. (1980). The importance of regional geology in the geological theories of Abraham Gottlob Werner: a contrary opinion. *Annals of Science*, 37(4), 433-440.
- Ouarda, T. B., Charron, C., Mahdi, S., & Yousef, L. A. (2021). Climate teleconnections, interannual variability, and evolution of the rainfall regime in a tropical Caribbean island: case study of Barbados. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(1), 619-638.

- Pántano, VC, Penalba, OC. (2018). Respuesta del suelo a proyecciones de largo plazo de temperatura y precipitación extrema en la cuenca sur del Plata. *Theor Appl Climatol* 134 , 1257–1268 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2339-7>
- Pauly, D., Watson, R., & Alder, J. (2005). Global trends in world fisheries: impacts on marine ecosystems and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1453), 5-12.
- Penalba, Olga Clorinda; Pántano, Vanesa Cristina; (2020), Proyecciones de los flujos de agua en el suelo a partir de los modelos climáticos globales del CMIP5 en Sudamérica y su impacto regional; Asociación Argentina de Agrometeorología; Revista Argentina de Agrometeorología; X; 6-2020; 1-13
- Peña-Díaz, Salvador. (2019). Condiciones hídricas en la cuenca del Valle de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(2), 98-127. Epub 21 de abril de 2021. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-02-04>
- Pérez, B. A., de Castro Rodríguez, M. T., & Noguerol, X. C. (2021). Análisis del recurso solar fotovoltaico offshore al oeste de la Península Ibérica. *Avances en ciencias de la tierra*, (11), 18-39.
- Pérez-Malvárez, C. e. a. (2006). Noventa y cuatro años de la teoría de la deriva continental de Alfred Lothar Wegener. *Interciencia*, 31(7).
- Pérez-Luque, A. J., Peinó Calero, E., Rodríguez-Brito, A., Esteban-Parra, M. J., Merino-Ceballos, M., Guerrero-Alonso, P. D., Moreno-Llorca, R., Ros-Candeira, A., & Zamora Rodríguez, R. (2021). ClimaNevada: Base de datos climática del Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada: . *Ecosistemas*, 30(1), 2155. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2155>
- Pérez-Ruzafa, Á., Marcos, C., & Pérez-Marcos, M. (2021). Principios ecológicos y gestión de sistemas complejos. *Rev. Acad. Canar. Cienc*, 33, 159-193.
- Peterson, E. E., & Pearse, A. R. (2017). IDW-Plus: An ArcGIS Toolset for Calculating Spatially Explicit Watershed Attributes for Survey Sites. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(5), 1241-1249.
- Petersson Roldán, M., Marrero Marrero, M., & Monzón Aldana, Y. (2022). La valoración económica de los servicios ecosistémicos culturales. Caso bahia de Matanzas. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), 87-96.
- Pinell-Tórrez, J., Martínez-Centeno, A., Huerta-Sobavarro, K. ., & Salinas-Hernández, B. (2022). Caracterización de plantas melíferas en la producción y conservación de las abejas. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 8(15), 1833–1854. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i15.14307>
- Piñero, D. (2008). La variabilidad genética de las especies: aspectos conceptuales y sus aplicaciones y perspectivas en México. *Capital natural de México*, I, 20.
- Pizarro, R., Ramírez, C., & Flores, J. P. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque (Valdivia)*, 24(3), 31-38.
- Pla-García, J., & Menor-Salván, C. (2017). La composición química de la atmósfera primitiva del planeta Tierra. *Anales de Química de la RSEQ*, 113(1).

- Prieto, C., José, J., Aguilera Martínez, F. A., Valdés, S., & Alonso, F. (2019). Principios, criterios y propósitos de desarrollo sustentable para la redensificación en contextos urbanos informales. *Revista Arquitectura*, Vol. 21, no. 1 (ene.-jun.); p. 21-33.
- Ramírez, N., Serrano, J. A., & Sandoval, H. (2006). Microorganismos extremófilos. Actinomicetos halófilos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 37(3).
- Rangel Mendoza, R., & García Dueñas, R. Y. (2022). Percepción social sobre el fenómeno del Cambio Climático en actores sociales de la comunidad costera O'bourke. *Revista Mapa*, 6(26). Recuperado a partir de <https://revistamapa.org/index.php/es/article/view/310>
- Restrepo, J. D., Bottaro, G., Barci, L., Beltrán, L. M., Londoño-Behaine, M., & Masiero, M. (2024). Assessing the impacts of nature-based solutions on ecosystem services: A Water-Energy-Food-Ecosystems nexus approach in the Nima River Sub-Basin (Colombia). *Forests*, 15(11), 1852.
- Reyes-Palomino, S. E., & Cano Ccoa, D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 53-64.
- Riosmena, F. (2021). Cambio climático global, ecología política y migración. *Revista de Estudios Sociales*, (76).
- Rodríguez-Moreno, V. M., Medina-García, G., Padilla, G. D., Corral, J. A. R., Estrada-Avalos, J., & Ruvalcaba, J. E. M. (2021) ¿ Por qué México es un país altamente vulnerable al cambio climático?. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas publicación especial número 25* 01 de junio - 15 de julio, 2021
- Rojas, C., & Hernández, Y. (2021). Herramientas metodológicas utilizadas para estudiar servicios ecosistémicos que presta la flora. *Bistua Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 19(1), 8-15. <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2021.933> (Original work published 28 de junio de 2021)
- Román Román, L., Díaz Valdés, T., López Avendaño, J. E., Watts, C., Cruz Bautista, F., Rodríguez Casas, J., & Rodríguez, J. C. (2017). Evapotranspiración del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 41-49.
- Romero, A. E. L., & Casimiro, W. S. L. (2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenta Jetepeque, Perú. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 28(3).
- Rosano, F. D. J. L., Cano, A. G., & Márquez, S. A. (2022). Teorías, métodos y modelos para la complejidad social: Un enfoque de sistemas complejos adaptativos. *Comunicación Científica*.
- RMAWGEN. (2013). A software project for a daily Multi-Site Weather Generator with R; Department of Sustainable Agro-Ecosystems and Bioresources, Research and Innovation Center Fondazione Edmund Mach San Michele all'Adige (TN), Italy, 2013
- Ruggieri, G., Allocca, V., Borfecchia, F., Cusano, D., Marsiglia, P., & De Vita, P. (2021). Testing Evapotranspiration Estimates Based on MODIS Satellite Data in the Assessment of the Groundwater Recharge of Karst Aquifers in Southern Italy. *Water*, 13(2), 118. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w13020118>
- Ruiz Corral, J. A., Sánchez González J. de J., Ramírez Ojeda G., Ramírez Díaz J. L., Durán Puga N., de la Cruz Larios, L., Medina García G., Rodríguez Moreno V., & Zarazúa Villaseñor P. (2018). Cambio climático en México y distribución potencial del grupo racial de maíz cónico.

- Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, (10), 1871–1883.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v0i10.1023>
- Ruiz Felipe, J. (2014). Análisis de la insolación terrestre investigada por Kepler. *Revista Tiempo Y Clima*, 5(22). Recuperado a partir de <https://pub.amezweb.org/index.php/TyC/article/view/355>
- Running, S. W., Nemani, R. R., Heinsch, F. A., Zhao, M., Reeves, M., & Hashimoto, H. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54(6), 547-560.
- Saurral, Natalia B. Montroull & Inés A. Camilloni (2013) Development of statistically unbiased twenty-first century hydrology scenarios over La Plata Basin, *International Journal of River Basin Management*, 11:4, 329-343, DOI: 10.1080/15715124.2014.885440.
- Salas, J. S., Guerra, V. M. M., Domínguez, R. P., Arredondo, F. M. S., Hernández, E. S. O., & Jurado, E. (2011). Cambio climático:¿ precursor de migración de especies vegetales en la montaña más alta del norte de México?. *Ciencia-UANL*, 14(2), 137-143.
- Salazar-Borunda, M. A., Pereda-Solís, M. E., López-Serrano, P. M., Chávez-Simental, J. A., Martínez-Guerrero, J. H., & Tarango-Arámbula, L. A. (2022). Climate change will affect the distribution of the Mexican Spotted Owl (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(2), 305-318. doi: 10.5154/r.rchscfa.2021.10.066
- Sarmiento, J. P. (2019). Protocolo de Montreal y el Convenio de Viena,¿ un caso exitoso en Derecho Internacional de protección global del medio ambiente?. *Revista de Derecho*, (52), 1-4.
- Saseendran, S., Ahuja, L., Ma, L., Trout, T., McMaster, G., Nielsen, D., & Fang, Q. (2015). Developing and normalizing average corn crop water production functions across years and locations using a system model (Doi: 10.1016/j.agwat.2014.09.002 ed.). *Agric. Water Manage.*
- Schwalm, C. R., Glendon, S., & Duffy, P. B. (2020). RCP8. 5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 19656-19657.
- Sheila, S. V., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & Villacís, M. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el distrito metropolitano de quito. *La Granja*, 16(2), 23-47
- Silva, J. F. (2016). Cambio climático y crisis de sobrevivencia como amenaza global *Revista Ciencia y Tecnología*, 148-167
- Small, E. E., Giorgi, F., Sloan, L. C., & Hostetler, S. (2001). The effects of desiccation and climatic change on the hydrology of the Aral Sea. *Journal of Climate*, 14(3), 300-322.
- Soon, W., Baliunas, S. (2003). Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years. *Climate Research*. 23, pp. 89-110
- Song, X., Lu, F., Xiao, W., Zhu, K., Zhou, Y., & Xie, Z. (2019). Performance of 12 reference evapotranspiration estimation methods compared with the Penman–Monteith method and the potential influences in northeast China. *Meteorological Applications*, 26(1), 83-96.
- Steffen W., et al (2011). The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369 (1938): 842-867
- Stine, S. (1994). Extreme and persistent drought in California and Patagonia during Medieval time. *Nature*. 269, pp. 546-549

- Suárez-Almiñana, S., Solera, A., Andreu, J., & García-Romero, L. (2020). Análisis de incertidumbre de las proyecciones climáticas en relación a las aportaciones históricas en la Cuenca del Júcar. *Ingeniería del agua*, 24(2), 89-99.
- Thorntwaite, C. W., & Mather, J. R. (1955). *The water balance*, vol 8. Centerton: Drexel Institute of Technology. Publications in climatology.
- Tokarska, K. B., Stolpe, M. B., Sippel, S., Fischer, E. M., Smith, C. J., Lehner, F., & Knutti, R. (2020). Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models. *Science advances*, 6(12), eaaz9549.
- Tong, Y., Gao, X., Han, Z., Xu, Y., Xu, Y., & Giorgi, F. (2021). Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods. *Climate Dynamics*, 57(5), 1425-1443.
- Torres, J. O. S., Melo, J. M., & Miranda, G. L. S. (2022). Escenarios bioclimáticos. reflexiones para el enfrentamiento al cambio climático *Universidad & Ciencia*, 11(2), 203-219.
- Vargas, A., Santos, A. N. A., Cárdenas, E., & Obregón, N. (2011). Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. *Dyna*, 78(167), 151-159.
- Vigil, J. L. P., & Jáuregui, G. A. D. (2022). Renovación urbana del sector Tuctilla para optimizar el espacio público y residencial, Amazonas, Perú, 2021. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 4(3), 09-14.
- Villa, Á. (2010). Servicios Ecosistemicos en las Reservas de la Biosfera de Andalucía, España: expresiones culturales y turísticas. *Reservas de la Biosfera*, 101
- Villalba-Murrieta, J. C., Murrieta-Galindo, R., & Palacios-Wassenaar, O. (2022). Áreas verdes urbanas e infiltración de agua como servicio ambiental en Xalapa, Veracruz, México. *RINDERESU*, 6(1-2).
- Villavicencio García, R., Martínez Ramírez, B. R., Toledo González, S. L., Guevara Gutiérrez, R. D., & Ávila Coria, R. (2014). Infiltración de agua y medición del caudal de arroyos en la Sierra de Quila. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(24), 184-201.
- Vitousek et. al (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D. et al (2013). The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Clim Dyn* 40, 2091–212. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259>
- Wang, Bin, Puyu Feng, De Li Liu, Cathy (2020). Waters, Modelling biophysical vulnerability of wheat to future climate change: A case study in the eastern Australian wheat belt, *Ecological Indicators*, Volume 114, 106290, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106290>.
- Weber, J., & Apestegui, L. (2013). Parámetros del modelo de infiltración de Green y Ampt en suelos de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Cuadernos Del CURIHAM*, 19, 87–103. <https://doi.org/10.35305/curiham.v19i0.90>.
- Weber, J. F. (2015). Estimación de los parámetros del modelo de infiltración de Philip para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Aqua-LAC*, 7(1), 39-48.
- Wegener, A., & Cruz, C. M. G. (2012). El origen de los continentes. *Enseñanza de las ciencias de la tierra: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20(1), 27-63

- Weiss, N. O., & Tobias, S. M. (2000). Physical causes of solar activity. *Space Science Reviews*, 94(1), 99-112.
- Weiskopf, S. R., Harmáčková, Z., Johnson, C. G., Londoño-Murcia, M. C., Miller, B. W., Myers, B. J., ... & Rosa, I. M. (2022). Increasing the uptake of ecological model results in policy decisions to improve biodiversity outcomes. *Environmental Modelling & Software*, 105318.
- Wittmer, H., Berghöfer, A., & Sukhdev, P. (2010). TEEB-la economía de los ecosistemas y la biodiversidad: Porque no podemos arriesgarnos a considerar la naturaleza como algo garantizado. *Ambienta: la revista del Ministerio de Medio Ambiente*(91), 10-18
- Yeste, P., García-Valdecasas Ojeda, M., Romero Jiménez, E., Rosa Cánovas, J. J., Gámiz Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban Parra, M. J. (2019). Calibración, validación y análisis de sensibilidad de un modelo de superficie en la Cuenca del Duero. *Jornadas de Ingeniería del Agua*, 22-25.

Libros

- Alba-Tercedor, J. (2022). Luis Herrera Mesa. Ecología, cambio climático y sexta extinción. Editorial: Mc Graw-Hill Interamericana S.L. 2021. : Comentario de Libro. *Revista Chilena De Entomología*, 48(1). Retrieved from <https://www.biotaxa.org/rce/article/view/74679>
- Aljanati, D. (1992). La vida y el universo: Ediciones Colihue SRL, Buenos Aires, Argentina, ISBN. 13:978-950-581-672-9
- Artigas, R. C., & Namono, Y. G. (2020). 4. Las sabanas como reservorio de carbono y sus escenarios RPC 2.6 y 8.5 ante el cambio climático: el caso del Parque Nacional de Arly (Burkina Faso). *Desafíos y oportunidades de un mundo en transición: Una interpretación desde la Geografía*, 67.
- Baca, E. C., Gámez, E. M. C., & Díaz, A. A. R. (2022). V. El registro fósil de los minerales. *Astrobiología: Una visión transdisciplinaria de la vida en el Universo*, 160.
- Barry, R., & Chorley, R. (1999). *Atmósfera, Tiempo y Clima* (trad. Cast. Omega), Barcelona, 441p.
- Barton, J. (2022). Branding the Earth: Selling Earth system science in the United States, 1983-1988. *Social Studies of Science*, 03063127221122436.
- Bertalanffy, L. (1950). The theory of open systems in physics and biology. *Science*, 111(2872), 23-29.
- Bertalanffy, L. v. (1968). *Teoría general de sistemas*: Madrid: Alianza.
- Carson, R. (2002). *Silent spring*: Houghton Mifflin Harcourt
- Christopherson, R. W. (2015). *Elemental geosystems*: Pearson
- Ciscar, J. C. (2020). Impactos del cambio climático en España: Una revisión parcial *Papeles de Economía Española*, (163), 2-201
- Cohen, B. J., & Harrison, M. M. (1992). *Introducción a la sociología*: McGraw-Hill
- Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, (2013). Introduction. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 1): Omega Barcelona.

- Daily G (ed) (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington DC.
- Della Maggiora AI, Gardiol JM, Irigoyen AI. (2000). Requerimientos hídricos. En: Andrade FH, Sadras VO (Eds.). *Bases para el manejo del maíz el girasol y la soja*. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana. pp. 155 - 171.
- De Menocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., Sarnthein, M., (2000). Coherent High- and Low Latitude Climate Variability During the Holocene Warm Period. *Science*. 288, pp. 2198-2202
- Desarrollo, C. M. d. M. A. y. d. (1998). *Nuestro futuro comun: comision mundial del medio ambiente y del desarrollo*: Alianza Editorial
- DORST, J. (1987). *Antes que la naturaleza muera*. Ed. Omega. 2ª edición. Barcelona.
- Fisher, B., Turner, K., Zylstra, M., Brouwer, R., De Groot, R., Farber, S., ... & Balmford, A. (2008). Ecosystem services and economic theory: integration for policy-relevant research. *Ecological applications*, 18(8), 2050-2067.
- Gutiérrez, M. (1992). *Ecología: salvemos el planeta tierra: enseñanza media básica*: Editorial Limusa.
- Hahn, H., Ayer, A., Aldama, L., Frisch, U., Molina, C. N., Torner, F. M., & Ruiz Harrel, R. (1978). *El Positivismo Lógico*.
- Hutton, J. (1960). *Theory of the earth: With proofs and illustrations (Vol. 1)*: Library of Alexandria
- Jimenez JC and Takahashi K (2019) Editorial: Tropical Climate Variability and Change: Impacts in the Amazon. *Front. Earth Sci*. 7:215. doi: 10.3389/feart.2019.00215
- Lanchbery, J., & Victor, D. (1995). The role of science in the global climate negotiations. *Green Globe Yearbook*, 1995, 29-39.
- Latterra et. al (2009). Jerarquización y mapeo de pastizales según su provisión de servicios ecosistémicos. *Campos Sulinos*, 128.
- Lovelock, J. E., & Rioja, A. J. (1983). *Gaia: una nueva visión de la vida sobre la tierra*. Madrid: Hermann Blume.
- Lozada-Chávez, I., Lorenzana, L. M., Tercero, M. G. C., Ramírez, C. L., & Silva, J. E. V. (2022). VIII. La evolución biológica. *Astrobiología: Una visión transdisciplinaria de la vida en el Universo*, 312.
- Luhmann, N. (1998). *Sistemas sociales: lineamientos para una teoría general (Vol. 15)*: Anthropos Editorial
- Llanos, V. H. L. (2016). Genealogía del proceso de individualización en los márgenes de la división del trabajo, la especialización y la solidaridad productiva. *Consejo Editorial*, 2(3), 32
- Mathieu, C., Pieltain, F., Jean, A., Chossat, J. C., & Valentin, C. (1998). *Physical Analysis of Soils: Selected Methods*. Lavoisier TEC & DOC, PARIS ed.
- Margalef, R. (2002). *Teoría de los sistemas ecológicos*: Alfaomega
- Marx, C. (1867). *El capital: crítica a la economía política*. Tomo 2.
- Méndez-Chazarra, N. (2022). *Historia de los volcanes*. Talenbook, s.I 2022, Guadalmazán, colección divulgación científica, ISBN 978-84-17547-98-1
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Ed. Alfaomega. Bogotá. Colombia.(F, C, D).
- Parsons, T., Caballero, J. J., & Castillo, J. C. (1968). *La estructura de la acción social (Vol. 1)*: Guadarrama Madrid.
- Parsons, T. (1999). *El sistema social*: Alianza Editorial
- Rodríguez, M. P. (2008). *Geología. Dinámica y evolución de la Tierra*: Editorial Paraninfo.

- Rodríguez, E., Teodoro, I., & Sánchez, J. M. (2019). La tropopausa, la primera fornera. 22, 63-66.
- Valdés, T. V., & Cano-Santana, Z. (2005). Ecología y medio ambiente: Pearson Educación.
- Vernadsky, V. I., Paños, M. V. L., & Andrés, L. G. (1997). La biosfera: Fundación Argentaria
- Villén-Pérez, S., Carrascal, L.M. y Palomino, D. (2022). Cambio climático, hábitats y Red Natura 2000: el futuro de las aves comunes en España. 167 pp. Uno Editorial Madrid.

Tesis

- Acosta, A., (2025). Evaluación de la presencia de la sequía en Cuautitlán Izcalli, Méx. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alcalá-Quesada, F. (2016). La hidrosfera terrestre, (tesis de grado), Universidad de Jaén, Centro de Estudios de Posgrado
- Bertel Ricardo, L y Burgos Barba, L. (2020). Variabilidad de la evapotranspiración potencial bajo escenarios de cambio climático y sus efectos en los sistemas productivos agrícolas en la Mojana, Colombia. Facultad de Ciencias Agrícolas
- Casanueva Vicente, A., Herrera García, S., Frías Domínguez, M. D., & Gutiérrez Llorente, J. M. (2012). Evaluation and projection of extreme temperature percentiles by means of statistical and dynamical downscaling methods, Universidad de Cantabria ISBN: 978-84-695-4331-3
- Elizalde-Servín, C. I. (2009). Evaluación de la calidad del agua de la Bahía de Guaymas, Sonora: con y sin aportes de aguas residuales (Doctoral dissertation, Dissertation, Instituto Tecnológico de Guaymas).
- Espitia Rodríguez, J. (2021). Valor agregado del modelamiento regional del clima sobre áreas caracterizadas por terreno complejo: precipitación sobre los Andes Colombianos. Universidad Nacional de Colombia.
- Godínez Montoya, L., Figueroa Hernández, E., & Pérez-Soto, F. (2021). Análisis de la Influencia de las variables socioeconómicas sobre el Medio Ambiente en México. ASMIIA, UAEM, 978-607-99509-0-3, pág. 66-81
- Hierrezuelo Pérez, Rolando (2016). Metodología para la determinación del escurrimiento medio anual de una cuenca. Tesis en opción al título de Ingeniero hidráulico. Archivo del Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., & Meehl, G. A. (2010). Challenges in combining projections from multiple climate models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739-2758.
- Leiva G. N. (2012). Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados.
- López-Urrea, R. (2004). Evapotranspiración de referencia: métodos de cálculo y de medición directa en una estación lisimétrica en ambientes semiáridos. Tesis Doctoral Departamento de producción Vegetal y Tecnología Agraria, Universidad de castilla-La Mancha, Albacete, España).
- Marroquín, A. (2016). Balance hídrico superficial de la subcuenca del río paltiture (Tesis de Pregrado). Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú
- Mediavilla, Haro, B. S. (2021). Influencia de la cobertura forestal en el balance hídrico superficial de la reserva hídrica el Paraíso [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11096>

- Ruiz García, V. H. (2022). Incendios forestales, cambios de uso de suelo y su impacto en el balance hidrológico de los bosques templados del centro de México (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo), recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12098/1101>
- Sánchez Salamanca, J. D., & Herrera Colomba, C. A. (2021). Evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico superficial a partir de un análisis oferta real-demanda en el municipio de Madrid Cundinamarca [Tesis de pregrado, Universidad de Cundinamarca]. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12558/3754>
- Valenzuela Acosta, V. S. (2022). Estudio Hidrológico En El Km 40+ 160, San José Del Sitio–Valle Del Rosario, Satevo, Chihuahua (Doctoral Dissertation, Universidad Autónoma De Chihuahua), <http://repositorio.uach.mx/id/eprint/484>
- Velasco Velasco, E. G. (2020). La contabilidad y los derechos de emisión de gases de efecto invernadero: un estudio desde las normas Internacionales de Información Financiera–NIIF (Tesis de Maestría).

Otros

- Agrawala, S. (1998). Structural and process history of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climatic change*, 39(4), 621-642.
- Álvarez-Sánchez, J. (2001). Descomposición y ciclo de nutrientes en ecosistemas terrestres de México. *Acta Zool. Méx.*, Número especial 1: 11 27, 12.
- Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Dubash, N. K. (2014). IPCC fifth assessment synthesis report-climate change 2014 synthesis report
- Arias, J. D. (2019). Herramientas de apoyo mediante los sistemas de información geográfica (SIG) para la estructura de las cuencas hidrográficas en la Dirección de Gestión Ambiental del Sistema Hídrico (DGASH) dentro de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB-ESP). Tesis de especialidad (Administración ambiental). Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. pp. 36.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Revista Ecosistemas*, 21(1-2)
- Beraldi-Campesi, H. (2014). La vida temprana en la Tierra y los primeros ecosistemas terrestres. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(1), 65-83.
- Brambila, M. G., Luna, J. A. C., & Navarrete, H. P. N. (2021). El tratamiento de agua en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Acciones metropolitanas para la gestión sustentable del agua*. 101-122
- Brenes, Á., & Saborío, V. F. (1995). Elementos de climatología: su aplicación didáctica a Costa Rica (No. 1). EUNED.
- Carabias et. al (2010). El cambio climático: Causas, efectos y soluciones Secretaria de Relaciones Exteriores de México.
- Cárdenas Gutiérrez, J. A. ., Jácome Carrascal, J. L. ., & Vergel Ortega, M. . (2021). Evapotranspiración real en la cuenca de la quebrada Tesuca, Norte de Santander. *Revista Boletín Redipe*, 10(11), 460–465. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i11.1552>.
- Carrillo-Carrillo, M., Ibáñez-Castillo, L., Arteaga-Ramírez, R., & Arévalo-Galarza, G. (2025). Spatio-Temporal Analysis of Drought with SPEI in the State of Mexico and Mexico City. *Atmosphere*, 16(2), 202. <https://doi.org/10.3390/atmos16020202>

- Casado, C. M. M. (2020). Caos e incertidumbre en los modelos climáticos. Claves de razón práctica, (268), 32-39.
- Chabot, B. F. (Ed.). (2012). *Physiological ecology of North American plant communities*. Springer Science & Business Media.
- CIIFEN (2020). Manual de Usuario RClimTool: Aplicación para control de calidad y homogeneización de datos climáticos. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno El Niño.
- Coles, S. (2001). *An Introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer Verlag London, 208.
- Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), (2023). Atlas de las cuencas hidrológicas del Estado de México 2023. Dirección General del Programa hidráulico, Estado de México.
- Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA). (2018). Estadísticas de Agua en México SEMARNAT, Ciudad de México . Pág. 31-46 [Fecha de consulta: 03 de febrero de 2019] Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA). (2023). Atlas del Agua en México 2023. Comisión Nacional del Agua
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2015–2020. Resultados nacionales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/634474/INFyS_2015-2020_Resultados_nacionales.pdf
- Compagnucci, Rosa Hilda (2011). Historia del cambio climático o calentamiento global; Sociedad Argentina de Estudios Geográficos; Contribuciones Científicas G&EA; 23; -1-2011; 13-19
- CMNUCC (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Cuevas, E., & Redondas, A. (2020). Las actividades de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña. Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española, 33(1).
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). 2015. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015: Conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Comisión Nacional del Agua. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. Marzo 15. Disponible en línea: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015
- Dilek, Y., & Furnes, H. (2011). Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3-4), 387-411
- Dlugokencky, E., Miller, J., & Staehelin, J. (2010). La vigilancia de la atmósfera global: historia de una contribución al control del clima. *Boletín-Organización Meteorológica Mundial*, 59(1), 35-39.
- Dormido, L., Garrido, I., L'Hotellerie-Fallois, P., & Santillán, J. (2022). El cambio climático y la sostenibilidad del crecimiento: iniciativas internacionales y políticas europeas.
- EDOMEX Gobierno del Estado de México), (2016), Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático “Estrategia Estatal de Cambio Climático del Estado de México” (2016), Estado de México
- EDOMEX (Gobierno del Estado de México). (2018), Programa Hídrico Integral del Estado de México 2017-2023, Comisión de Agua del Estado de México. También disponible en la página web:

<https://agua.edomex.gob.mx/sites/agua.edomex.gob.mx/files/files/AcercaCAEM/PHIEM1.pdf>

- Emerton, L. H., Geoffrey. (2008). A toolkit for the economic analysis of invasive species
- FAO, (1998), “Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”, FAO, ISBN 0254-5293, pág 322
- FAO (Producer). (2017). Servicios ecosistémicos y biodiversidad, FAO [Fecha de consulta: 03 de Agosto de 2018] <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es/>
- Falla, G., Esquivel, J. P., Aldana, L., Coronel, G., Velasco, M. A., & Pérez, R. R. (2021). Primavera silenciosa, de Rachel Carson: más de medio siglo después. PPDQ Boletín, (63).
- Fallas, J. (2007). Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones. Mapealo. Com, 83
- Fernández-Reyes, R. (2016). El Acuerdo de París y el cambio transformacional Papeles de relaciones ecosociales y cambio global, 132, 101-114
- Francés, M. P. A., Ramos-Calzado, P., Pastor-Saavedra, A., & Rodríguez-Camino, E. (2018). Comparación entre métodos de corrección de sesgo para las proyecciones de cambio climático en los Pirineos. Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española, (35).
- Frías, J. M. (2013). Fundamentos conceptuales y didácticos: El origen de la Tierra. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 21(2), 139-145.
- García, I. (2013) Balance hídrico de la cuenca del río Pixquiac en Veracruz México. Senderos y Encuentros para un Desarrollo Autónomo Sustentable A.C., Veracruz Méx.
- García, R. (2020). *Sistemas complejos: conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Gedisa editorial.
- Giddens, A., & Giddens, A. (2006). La constitución de la sociedad: bases para la teoría de la estructuración
- GIZ. (2012). Integración de los Servicios Ecosistémicos en la Planificación del Desarrollo. 92.
- Gobierno de la República. (2015). Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030.
- Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), (2022). México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 1990-2019
- Gordon, H. B., Rotstayn, L. D., McGregor, J. L., Dix, M. R., Kowalczyk, E. A., O’farrell, S. P., ... & Elliott, T. I. (2002). The CSIRO Mk3 climate system model. CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No.60, ISBN 0 643 06878 3.
- Guzmán, M. (2020). Estudio permitirá conocer impacto del cambio climático sobre cuencas hidrológicas de Costa Rica. Investiga. TEC, (37).
- Hardin, G. (2015). La tragedia de los comunes. CULCyT(3).
- Haubrich, H., Reinfried, S., & Schleicher, Y. (2007). Declaración de Lucerna sobre educación geográfica para el desarrollo sostenible. Publicada a través de la página de la Comisión. Lucerna.

- IDEAM. (2007). Información técnica. Recuperado el 26 de 10 de 2021, de [ideam.gov.co:http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd)
- IDEAM – UNAL (2018), Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia, Bogotá, D.C., ISBN: 978-958-8067-97-1
- IEECC, (2016) Inventario Estatal de Emisiones de Gases Efecto Invernadero, Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático, EDOMEX, 2016
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010), “Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica escala 1:50000 edición 2.0”, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2021), “Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación” Escala 1:250 000, Serie VII. Conjunto Nacional, escala: 1:250 000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (2021) 'Edafología'. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México”
- Instituto Geográfico Nacional, 2018a “Clima y Agua”, Atlas Nacional de España, capítulo 4, pág. 10
- Instituto Geográfico Nacional, (2018b), Climatología del Estado de México, [Fecha de consulta: 26 de enero de 2019] <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/clima.aspx?tema=me&c=15>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC (2018), “El cambio climático de frente” Biblioteca de recursos, Condiciones y escenarios frente al cambio climático. INECC Recuperado el 22 de enero de 2020, de: http://elcambioclimaticodefrente.inecc.gob.mx/biblioteca_de_recursos
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2021). González Terrazas, D., Vermonden Thibodeau A., Gress Carrasco F., Municipios Vulnerables al Cambio Climático con base en los resultados del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático. Pp.60
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2022. López-Díaz F., Nava Assad Y.S., Rojas Barajas M, González Terrazas D.I. Guía de Escenarios de Cambio Climático para Tomadores de Decisiones. pp 65.
- [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#). (2014), Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas, informe, Ginebra, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#). (2019a). “Calentamiento global de 1,5 °C”, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza, grupo de trabajo I, ISBN 978-92-9169-353-5
- [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#). (2019b). “El océano y la criosfera en un mundo cambiante”, Informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Grupo de trabajo II IPCC, ISBN 978-92-9169-355-9

- [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#). (2020) “El cambio climático y la Tierra” Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de GEI en los ecosistemas terrestres, ISBN 978-92-9169-354-2
- IPCC VZ, P. A., Connors, S. L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., ... & Huang, M. (2021). Climate change 2021: the physical science basis contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *IPCC*, 81, 208.
- [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#). (2022) Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. ISBN 978-92-9169-159-3
- [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#). (2023). [Climate Change 2023: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report \[Core Writing Team, H. Lee & J. Romero \(Eds.\)\]. IPCC](#).
- In, U. (2013). Lista roja de especies amenazadas de la UICN
- Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, (2008), Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Jáuregui, Ernesto (1981). Aspectos de la climatología del Estado de México, Investigaciones geográficas, #11 México 1981, pág. 21
- Koehler, A. WMO (1980), background air pollution monitoring network (BAPMON). Switzerland.
- Ley de Aguas Nacionales (2016), Última reforma publicada DOF 24-03-2016, México
- Ley General de Cambio Climático (LGCC) (2022), Modificación a la Ley General de Cambio Climático, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, última reforma DOF 11-05-2022
- Llanos-Herrera, Lizeth. (2014). RclimTool: manual del usuario. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR); Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), Cali, CO. 17 p.
- Madrigal, L. & Rozga, E. (2014). Una propuesta del método de análisis del desarrollo económico local: el caso de algunos territorios locales del Estado de México. Toluca, México: Centro de Investigación en Estudios Avanzados en Planeación Territorial, Facultad de Planeación Urbana y Regional, UAEMex
- Maldonado, C. E. (2015). Pensar la complejidad, pensar como síntesis. Cinta de moebio, (54), 313-324.
- Marcos-García, P., Vargas-Zamora, F., López-Nicolas, A., García-Prats, A., & Pulido-Velázquez, M. (2020). Análisis de impactos del cambio climático en las sequías meteorológicas, edáficas e hidrológicas en el Sistema de Explotación del río Júcar. JIA, Actas de la IV Jornada de Ingeniería del Agua.

- Martínez-Austria, P. F., & Jano-Pérez, J. A. (2021). Climate change and extreme temperature trends in the Baja California Peninsula, Mexico. *Air, Soil and Water Research*, 14, 1–11. <https://doi.org/10.1177/11786221211010702>
- McWeeney R. y Hausfather Z. (2018). Q&A: How do climate models work? CarbonBrief Clear on Climate. Recuperado el 28 de agosto de 2022 de <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work>
- Meyer, C. (2009). ¿Hay alguien ahí fuera? Un arca de vida, [Fecha de consulta: 18 de marzo de 2018] <https://www.scienceinschool.org/es/2008/issue9/esasuccess>
- Molina, A. (2016). Ecología y Recursos Naturales. *Ventana Científica*, 7, 10.
- Nagy, G., Bidegain, M., Verocai, J., & de los Santos, B. (2018). Escenarios climáticos futuros sobre Uruguay. Basados en los nuevos escenarios socioeconómicos RCP. Ministerio De Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), División de Cambio Climático (DCC), Uruguay.
- Negrete, F. G. (2017). Mensajes de la Última Tule, percepción del ambiente y participación de la sociedad civil en la elaboración y en el cumplimiento de las contribuciones previstas y determinadas a nivel nacional en México. Participación de las Organizaciones de la Sociedad Civil en la Agenda Multilateral de México, 179. Instituto Matias Romero. ISBN: 978-607-446-122-0
- OHCHR. (2017). 36° periodo de sesiones del consejo de derechos humanos . Suiza. [Fecha de consulta: 18 de mayo de 2019] Disponible en: <https://www.ohchr.org/SP/hrbodies/hrc/regularsessions/session36/pages/36regularsession.aspx>
- Olcina Cantos, J. (2019). Evidencias e incertidumbres del Cambio Climático y de los riesgos asociados en el Litoral Mediterráneo español. *Boletín De La Real Sociedad Geográfica*, (CLIV), 9 34. Consultado de <https://boletinrsg.com/index.php/boletinrsg/article/view/77>
- Ordoñez, J. (2011). Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. *Balance Hídrico Superficial*, 20 - 36.
- O. Orduña, A. Ghilardi y A. González. (2012). Evaluación de los impactos del cambio climático en polinizadores y sus consecuencias potenciales en el sector agrícola en México. Informe final Centro de Investigaciones en Ecosistemas. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología, México. Consultado en: http://www.lanase.unam.mx/es/proyectos_investigacion.php?ra=1
- Pachauri, R. K., Gomez-Echeverri, L., & Riahi, K. (2014). Synthesis report: summary for policy makers.
- Parras-Berrocal, I. M., Cabos, W., Izquierdo, A., Vázquez, R., Mañanes, R., & Sein, D. (2018). Señal del cambio climático en el mar Mediterráneo: perspectiva de un modelo climático regional acoplado atmósfera-océano.
- Patiño Cobaleda, M y Rodriguez Sierra, I. (2019). Oferta hídrica superficial de la cuenca del río Sumapaz para el periodo 2011-2100 de acuerdo con los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5. Bogotá : Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, 2019.
- Pedrinaci, E., Alcalde, S., Alfaro, P., Almodóvar, G. R., Barrera, J. L., Belmonte, Á., ... & Feixas, J. C. (2019). Alfabetización en Ciencias de la Tierra.

- Pérez-Vásquez, N. D. S. (2022). 13. Madre-tierra: base para una propuesta educativo ambiental en Colombia. *Nuevas metodologías, espacios y estilos de enseñanza-aprendizaje: Prácticas docentes e innovación educativa*, 255.
- Perló Cohen, M. y A.E. González, (2005). ¿Guerra por el agua en el valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), (2014). Índice de desarrollo humano municipal en México, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ciudad de México.
- Polania C., (2011). Diversidad funcional y servicios ecosistémicos. Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos. *Serie Técnica*, 384.
- Portilla, J. G. (2011). El Planeta Tierra como un Receptáculo de vida: ¿Un Planeta corriente o una rareza en el universo?. *Acta Biológica Colombiana*, 16(3), 3-14.
- Pourrut, P., & Gómez, G. (1998). El Ecuador al cruce de varias influencias climáticas. Una situación estratégica para el estudio del fenómeno El Niño. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3).
- Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., & Flannery, B. (2002). *Numerical Recipes in C++*. The Art of Scientific Computing, 2nd edn Cambridge University Press, Cambridge, 2002
- Rego, P. R., Guitián, M. A. R., Román, M. R., Dacosta, J. F., Sánchez, B. H., López, J. B., . . . Sánchez, S. M. (2005). La expresión territorial de la biodiversidad. *Paisajes y hábitats. Recursos Rurais*, 109
- Restrepo, J. D. (2024). Assessing the impacts of nature-based solutions on ecosystem services. *Forests*, 15(11), 1852. <https://doi.org/10.3390/f15111852>
- Rivas R., Ocampo D. y Carmona F. (2011). Modelo de predicción de rendimiento de trigo a partir de NDVI: aplicación en el contexto de la agricultura de precisión. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.0584.
- Rocha, J. D. (1999). Perspectivas teóricas para abordar las relaciones entre población y ambiente. Una revisión general Hacia la demografía del siglo XXI: V Reunión de Investigación Sociodemográfica en México, 3, 137.
- Rodríguez, E., & Gutiérrez, J. M. (2018). Escenarios-PNACC 2017: Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC).
- Rodríguez, R., Benito, A., & Portela, A. (2004). Meteorología y climatología. *Semana de la Ciencia y la Tecnología*. Fundación Española Para La Ciencia Y La Tecnología, 141.
- Sabogal, N. (1998). El Protocolo de Montreal, un modelo de concertación para la protección de la capa de ozono. *Relaciones Internacionales*, 7(14).
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México. Disponible en: https://cambioclimatico.gob.mx/sextacomunicacion/vulnerabilidad_adaptacion.php

- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)-Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2022) informe del Monitoreo de Sequía del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), 2022, México
- Smith, M. (1993). Cropwat: programa de ordenador para planificar y manejar el riego. Roma: FAO. 1993. 133 p.: cdrs.
- Spencer, H. (1896). *The Principles of Sociology: 1 pt. IV. Ceremonial institutions. pt. V. Political institutions in part* (Vol. 6). D. Appleton and Company.
- Sociedad Geográfica de Lima. (2011). Balance Hídrico Superficial "Contribuyendo al desarrollo de una cultura del agua y la gestión integral del recurso hídrico, Lima Perú, 2011
- Soracco, C. G., Palancar, T., & Sebastián, F. (2005). Relación entre densidad aparente seca y la infiltración del agua en el suelo. In XIII Jornadas de Jóvenes Investigadores de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (Tucumán, 2005).
- Sota Christie, J. (2022).Proyecciones de eventos hidro-meteorológicos extremos en la cuenca del altiplano chileno, bajo el escenario de cambio climático SSP5-8.5. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184808>
- Tar buck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). AMR traducciones científicas. TE J, and FK Lutgens, Ciencias de la tierra una introducción a la geología física.
- Teuling, A. J. (2024). Global ecosystem restoration and water resources availability. Nature Water. <https://doi.org/10.1038/s44221-024>
- Toro, V. G., Mosquera, W., Barrientos, N., & Bedoya, Y. (2019). Circulación oceánica del golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal Boletín científico CIOH, 38(2), 41-56.
- Turner RK, Georgiou S, Fisher B. (2008). Valuing Ecosystem Services: The Case of multi-functional wetlands. London: Cromwell Press, 2008. 240.
- Twomey, S. (2007). Pollution and the planetary albedo. Atmospheric Environment, 41, 120-125.
- UNCCD. (2013). Documento informativo: segunda conferencia informativa de la CLD.
- UN. (1972). Declaración de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano. Estocolmo, Suecia, 5-16.
- UNAM. (2015). Reporte Mexicano de Cambio Climático GRUPO II Impactos, vulnerabilidad y adaptación. Programa de Investigación en Cambio Climático Coordinadores: Carlos Gay y García, y José Clemente Rueda Abad. 185 pp.
- UNESCO (1982). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Montevideo – Uruguay: Editorial UNESCO-ROSTLAC.
- UN-Water. (2019). Sección 1. El estado de los recursos hídricos en el mundo. i. Demanda y uso del agua. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. No dejar a nadie atrás. (pp. 14). París, Francia.
- Villarreal, E., Guevara, V., Franco, G., Correo, J. C., Cortes, M., Campos, (2008). Monitoreo de Ecosistemas, Principales tipos de vegetación, México, CONABIO
- Villena Martínez, E. M., Alvizuri Tintaya, P. A., Torregrosa López, J. I., Lo Iacono Ferreira, V. G., & Lora García, J. (2021). Calibración y simulacion del balance hidrico de la cuenca del guadalquivir utilizando parametros del suelo obtenidos en trabajo de campo.
- Wilks, D. (1995). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press.

- WMO, (2011) Guía de prácticas climatológicas Organización Meteorológica Mundial N° 100 ISBN 978-92-63-30100-0, Ginebra, Suiza.
- WMO (2018). Guide to climatological practices. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization
- Zhang, X., Zwiers, F. W., & Peterson, T. C. (2008). La adaptación imperativa:¿ está preparada la ciencia climática?. Boletín de la OMM, 57(2), 103.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE DISERTACIÓN PÚBLICA

No. 00014

Matrícula: 2161801487

DEGRADACIÓN DE LOS SERVICIOS
ECOSISTEMICOS DE PROVISIÓN
HÍDRICA Y REGULACIÓN
CLIMÁTICA EN LA ZONA
NOROESTE DEL ESTADO DE
MÉXICO Y SUS POSIBLES
IMPACTOS AL CAMBIO CLIMÁTICO.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 11:00 horas del día 27 del mes de marzo del año 2026 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. SIMONE LUCATELLO
DR. PABLO DAVID ELIAS LOPEZ
DR. ELIUD GALVEZ MATIAS
DRA. ROCIO DEL CARMEN VARGAS CASTILLEJA
DR. EUGENIO GOMEZ REYES



MARCO ANTONIO PEREZ LUNA
ALUMNO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron a la presentación de la Disertación Pública cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: MARCO ANTONIO PEREZ LUNA

y de acuerdo con el artículo 78 fracción IV del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBADO

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

MTRA. ROSALÍA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

Román Linares Romero
DR. ROMAN LINARES ROMERO

PRESIDENTE

Simone Lucatello
DR. SIMONE LUCATELLO

VOCAL

Pablo David Elias Lopez
DR. PABLO DAVID ELIAS LOPEZ

VOCAL

DR. ELIUD GALVEZ MATIAS

VOCAL

DRA. ROCIO DEL CARMEN VARGAS
CASTILLEJA

SECRETARIO

DR. EUGENIO GOMEZ REYES