



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES
Y DEL AMBIENTE**

**ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL
RECURSO HÍDRICO EN LA SUBCUENCA VALLE
DE BRAVO-AMANALCO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES Y DEL
AMBIENTE**

Presenta

José Ignacio Martínez Olaya



**Maestría en Ciencias en
Ciencias Forestales
y del Ambiente**
Universidad Autónoma Chapingo
División de Ciencias Forestales

**BAJO LA SUPERVISIÓN DE:
Dr. Adán Guillermo Ramírez García**



APROBADA



Chapingo, Estado de México, Febrero de 2026

ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA SUBCUENCA
VALLE DE BRAVO-AMANALCO.

Tesis realizada por José Ignacio Martínez Olaya bajo la supervisión del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el
grado de :

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES Y DEL AMBIENTE



DIRECTOR:

DR. ADÁN GUILLERMO RAMÍREZ GARCÍA



ASESOR:

DR. ALEJANDRO CORONA AMBRÍZ



ASESOR:

MC. VICTOR HIGINIO RUÍZ GARCÍA

Declaración de uso de Inteligencia Artificial

Durante la preparación y escritura de la presente tesis el autor José Ignacio Martínez Olaya reconoce el uso de la herramienta o servicio de Inteligencia Artificial nombrado CHATGPT el cual fue utilizado para verificar que las citas bibliográficas estén debidamente reportadas en formato APA7, revisar los errores gramaticales y de puntuación. Así mismo se reconoce el uso de Inteligencia artificial en la creación de tres esquemas gráficos de la presente tesis. El autor revisó y editó el contenido generado según sus necesidades y adquiere la responsabilidad completa por el contenido de la información presentada en la tesis.

Para la realización del presente trabajo se contó con el apoyo de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) hoy renombrado como Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y del grupo de experto en la materia y conocedores de la región de estudio.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	iv
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
ABREVIATURAS.....	ix
DEDICATORIA.....	x
AGRADECIMIENTOS	xi
DATOS BIOGRÁFICOS	xii
RESUMEN GENERAL	1
GENERAL ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	4
1.1 Introducción	4
1.2 Antecedentes generales.....	5
1.2.1. La Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México.	5
1.2.2. Modelo SWAT.....	6
1.3 Investigación acción participativa	7
1.4 Justificación	8
1.5 Objetivos.....	9
1.5.1. Objetivo general.....	9
1.5.2. Objetivos Específicos.....	9
1.6. Preguntas de investigación.....	9
1.7. Hipótesis.....	10
1.8. Estructura del documento de titulación.....	10
1.9. Referencias	12
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
2.1. Recurso hídrico	15
2.2. Importancia de los recursos hídricos para México.....	15
2.3. Importancia del recurso hídrico en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.....	16
2.4. Contexto actual del recurso hídrico en la subcuenca Valle de Bravo- Amanalco	17
2.5. Problemáticas ambientales en la subcuenca Valle de Bravo – Amanalco: evidencia científica local.....	18

2.6.	Problemáticas sociales en la subcuenca Valle de Bravo – Amanalco: Evidencia científica local	20
2.7.	Impacto de las problemáticas ambientales y sociales sobre la escasez de agua y el abastecimiento	21
2.8.	Necesidad de estimar el recurso hídrico en la subcuenca.....	22
2.9.	Modelos hidrológicos y análisis de escenarios: el modelo SWAT	23
2.10.	Referencias	23
CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON ÉNFASIS EN EL MODELO SWAT.....		28
3.1	Resumen	28
3.2.	Palabras clave:.....	28
3.3.	Abstract	29
3.4.	Keywords:.....	29
3.5.	Introducción	30
3.6.	Materiales y métodos.....	30
3.7.	Resultados.....	31
3.7.1.	La importancia de los modelos en la gestión del agua actualmente ...	31
3.7.2.	Concepto de modelo hidrológico y sus tipos	32
3.7.3.	Hitos de la modelación hidrológica	33
3.7.4.	Historia del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).....	34
3.7.5.	Bondades del modelo SWAT y uso actual en el mundo	35
3.7.6.	Uso del Modelo SWAT en México	36
3.8.	Discusión	38
3.9.	Conclusiones	41
3.10.	Agradecimientos	41
3.11.	Referencias	42
CAPITULO 4. MODELACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO MEDIANTE EL MODELO SWAT:subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.....		52
4.1.	Resumen	52
4.2.	Palabras clave	52
4.3.	Abstrac	53
4.4.	Key words.....	53
4.5.	Introducción	54
4.6.	Materiales y métodos.....	55
4.6.1.	Área de estudio	55

4.6.2.	Descripción del modelo SWAT	56
4.6.3.	Metodología	57
4.6.4.	Datos de entrada.....	58
4.6.5.	Estimación de Balance hidrológico.	62
4.6.6.	Análisis estadístico.....	63
4.7.	Resultados y discusión	64
4.7.1.	Delimitación de la subcuenca	64
4.7.2.	Comparación de los usos de suelo y vegetación: Escenario año 2000 y año 2024.....	65
4.7.3.	Precipitación y temperatura de la subcuenca.	67
4.7.5.	Producción de agua anual de la subcuenca en el tiempo (PAAS). .	72
4.7.6.	Comparación escenarios año 2000 y 2024.....	74
4.8.	Conclusiones	76
4.9.	Referencias	78
CAPÍTULO 5. PERCEPCIÓN DE EXPERTOS MEDIANTE METODO DELPHI		83
5.1.	Resumen	83
5.2.	Palabras clave;	83
5.3.	Abstract	84
5.4.	Keywords:.....	84
5.5.	Introducción	85
5.6.	Materiales y métodos.....	87
5.6.1.	Fichas de Evaluación Ecológica.....	87
5.6.2.	Método Delphi.....	88
5.6.3.	Metodología	89
5.7.	Resultados y discusión	95
5.8.	Conclusiones	103
5.9.	Referencias	104
CAPÍTULO 6.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		109
6.1.	Conclusión general	109
6.2.	Conclusión sobre los fenómenos recientes de lluvia en la subcuenca	110
6.3.	Recomendaciones generales	111

LISTA DE CUADROS

Cuadro. 1. Tipos de uso de suelo y vegetación en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México.	59
Cuadro. 2. Principales tipos de suelos dentro de la subcuenca. Base referencial mundial del recurso suelo	60
Cuadro. 3. Estaciones meteorológicas empleadas en el estudio.....	60
Cuadro. 4. Comparación uso de suelo y vegetación Escenario 2000/Escenario 2024.....	65
Cuadro. 5. Balance hídrico de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.	69
Cuadro. 6. Estadísticas anuales de la producción de agua de la subcuenca. .	73
Cuadro. 7. Interpretación de la correlación de las preguntas realizadas	100
Cuadro. 8. Índice de Consenso Delphi Intercuartílico	100

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1. Estructura general del documento de Investigación	11
Figura. 2. Ubicación de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco	56
Figura. 3. Metodología para la aplicación del modelo SWAT en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México.	57
Figura. 4. Pendientes de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México.	62
Figura. 5. Tipos de suelos de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México.	62
Figura. 6. Reclasificación de uso de suelo y vegetación de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México. Escenario 2000	62
Figura. 7. Reclasificación de uso de suelo y vegetación de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México. Escenario 2024	62
Figura. 8. Ecuación del balance hídrico	63
Figura. 9. Delimitación de la subcuenca de estudio.....	64
Figura. 10. Precipitación y temperatura promedio de la subcuenca en el tiempo	67
Figura. 11. Producción de agua anual de la subcuenca de Bravo-Amanalco...	72
Figura. 12. Salida del Modelo SWAT; Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. Escenario 2000	74
Figura. 13. Salida del modelo SWAT; Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. Escenario 2024	75
Figura. 14. Recarga al acuífero en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco: Periodo 1980 al 2024.....	76
Figura. 15. Gráfico de calor del Análisis de Correlación de Spearman (r).	98
Figura. 16. Representación gráfica del razonamiento y pensamiento de los participantes.....	99

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
ARIMA	AutoRegressive Integrated Moving Average-Promedio Móvil Integrado Autorregresivo
ANP	Área Natural Protegida
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
FEE	Fichas de Evaluación Ecológica
GEE	Gases de Efecto Invernadero
GIS	Sistema de Información Geográfica (<i>Geographic Information System</i>)
GWP	Asociación Mundial para el Agua (<i>Global Water Partnership</i>)
HRU	Unidad de Respuesta Hidrológica.
IQR	Rango intercuartílico (<i>Interquartile Range</i>)
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SWAT	Herramienta para Evaluación de Suelo y Agua (<i>Soil and Water Assessment Tool</i>)
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
W	Coefficiente de concordancia de Kendall
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

DEDICATORIA

A mi esposa Verónica Virginia Tepixtle Colohua y a mi hija Samara Yalí Martínez Tepixtle, por ser siempre mis guías y sustento en los momentos más difíciles.

A mis padres Darío Martínez Balbuena y Obdulia Olaya Ramírez, por su amor incondicional y por todas las enseñanzas invaluable, gracias por siempre darme su apoyo emocional y directiva moral.

A mis hermanos Brayan y Raúl por su apoyo y cariño en cada paso que he realizado.

Y a todos mis amigos que han abonado a mi formación en lo profesional y personal, siempre los tengo presente, eternamente gracias.

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Autónoma Chapingo y al posgrado en Ciencias Forestales y del ambiente de la División de Ciencias forestales por contribuir en mi formación académica y profesional que han sido clave en mi desarrollo personal.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. Por otorgarme el apoyo financiero para concluir mis estudios de posgrado.

A la Dr. Adán Guillermo Ramírez García por su invaluable guía y apoyo otorgándome sus conocimientos y tiempo en el desarrollo de esta investigación, aprecio los consejos y la motivación que me brindó en todo momento.

A la Dr. Alejandro Corona Ambriz y al Mc. Víctor Higinio Ruíz García por compartirme sus conocimientos, otorgándome su tiempo, paciencia y dedicación. Sus aportaciones fueron fundamentales para el desarrollo y éxito de esta investigación.

A todo el personal académico, por su conocimiento compartido y entusiasmo enriquecieron mi trabajo, así como al administrativo, que con su asistencia y diligencia siempre facilitaron mis actividades dentro del Postgrado

A toda los colegas y expertos en la materia de estudio y conocedores de la subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco por brindarme su confianza y apoyo, así como la información necesaria para poder realizar la presente tesis. Su disposición para colaborar ha sido fundamental para el desarrollo de la investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

José Ignacio Martínez Olaya nació el 5 de mayo de 1995 en el Estado de México, fue un alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales y del Ambiente durante el periodo 2024/2025.

Cuenta con una formación profesional en las ciencias forestales así como de impacto ambiental, formación académica con una licenciatura como Ingeniero en Restauración Forestal título que respalda con la cédula profesional número 13924085.

Su trayectoria académica se complementa con un Diplomado cursado en Centro de educación Continua de la Universidad Autónoma Chapingo en Protección Forestal.

Sus áreas de trabajo se centran en la restauración ecológica, gestión sostenible de los recursos naturales y la integración de la sociedad en general en la gestión de los recursos naturales.



RESUMEN GENERAL¹

Estimación de la disminución del recurso hídrico en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.

El objetivo del presente fue determinar los cambios en la recarga hídrica de la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco, a través del diseño y la proyección de escenarios temporales mediante el Modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) y la evaluación ecológica de la subcuenca a fin de identificar las causas y consecuencias del impacto sobre el recurso hídrico. La metodología utilizada tuvo un enfoque mixto, integrando tres componentes principales: (1) Un estado del arte de la modelación hidrológica con énfasis en el modelo SWAT (2) la implementación del modelo SWAT en la subcuenca de estudio con el objetivo de simular el balance hídrico de escenarios temporales bajo distintas condiciones de uso del suelo y cambio climático; y (3) la evaluación de la condición ecológica de la subcuenca mediante la aplicación del método Delphi a un panel de expertos en materia de gestión ambiental a fin de conocer sus opiniones y percepciones. Los resultados obtenidos de las metodologías empleadas permitieron afirmar que el área de estudio presenta una tendencia progresiva de deterioro ecológico e hídrico, la evidencia encontrada y lo descrito por los expertos concuerdan en que la región presenta condiciones ambientales negativas generadas por el cambio de uso de suelo y un crecimiento urbano desorganizado. Se concluye que la subcuenca enfrentó cambios en la recarga hídrica mayormente negativos ocasionados por problemas antrópicos y ambientales, lo cual amenaza la sostenibilidad del recurso y soberanía hídrica para los habitantes. El enfoque metodológico adoptado permitió evaluar el estado actual y futuro del sistema hídrico, y demostrar la importancia de la participación de los habitantes de la subcuenca y expertos en materia ambiental al diseñar estrategias de conservación del agua.

Palabras clave: Método Delphi, modelación hidrológica, revisión sistemática, Producción de agua, causas y consecuencias.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias, Programa en Ciencias Forestales y del Ambiente, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: José Ignacio Martínez Olaya

Director: Adán Guillermo Ramírez García

GENERAL ABSTRACT ²

Estimation of the decrease in water resources in the Valle de Bravo-Amanalco sub-basin, Mexico

The objective of this study was to determine changes in groundwater recharge in the Valle de Bravo–Amanalco sub-basin, through the design and projection of temporal scenarios using the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool), as well as through an ecological assessment of the sub-basin aimed at identifying the causes and consequences of impacts on water resources. The methodology followed a mixed-methods approach, integrating three main components: (1) a state-of-the-art review of hydrological modeling with emphasis on the SWAT model; (2) the implementation of the SWAT model in the study sub-basin to simulate the hydrological balance under different temporal scenarios, considering variations in land use and climate change conditions; and (3) an assessment of the ecological condition of the sub-basin through the application of the Delphi method to a panel of experts in environmental management, in order to capture their opinions and perceptions. The results obtained from the applied methodologies indicate that the study area exhibits a progressive trend of ecological and hydrological degradation. The empirical evidence and expert assessments consistently suggest that the region is characterized by adverse environmental conditions primarily driven by land-use change and unplanned urban expansion. It is concluded that the sub-basin has experienced predominantly negative changes in groundwater recharge due to anthropogenic and environmental pressures, posing a threat to the sustainability of water resources and to water sovereignty for local populations. The adopted methodological approach made it possible to assess both the current and future status of the hydrological system, highlighting the importance of incorporating the participation of local inhabitants and environmental experts in the design of water conservation strategies.

Key words: Delphi method, Hydrological modeling, Systematic review, Water yield, Causes and consequences.

² Master's Thesis, Forest and Environmental Sciences Program, Chapingo Autonomus University.

Author: José Ignacio Martínez Olaya

Advisor: Adán Guillermo Ramírez García

**ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA
SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-AMANALCO.**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

En los últimos años, el cambio climático, la sobrepoblación y la pérdida de recursos forestales han acentuado los problemas ambientales de todo el mundo, recientemente México documenta un aumento de la temperatura a nivel nacional (Cuervo-Robayo et al., 2020), afectaciones a los ecosistemas (Mendoza-Ponce et al., 2018) y disminución de los recursos hídricos (Silva et al., 2023). En consecuencia, comprometiendo la capacidad de los ecosistemas para proveer y mantener servicios ambientales (Flores-Fernández et al., 2022; Guerrero-Morales et al., 2020; Olivares et al., 2018). Ante esta situación resulta fundamental conocer la condición actual de los recursos de México a fin de gestionarlos de manera sustentable.

Un caso de estudio particular es el observado en la Subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco, una subcuenca de gran importancia ecológica y social, fundamental para el abastecimiento de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (Reza-Curiel et al., 2023). En dicha subcuenca se identifica durante los últimos años los servicios ecosistémicos relacionado con la recarga de agua ha sufrido una alteración negativa, comprometiendo la cantidad de agua disponible en la región.

Existen trabajos que describen los procesos de fragmentación y pérdida de cobertura forestal que afectan la sostenibilidad de la subcuenca (Banderas & González-Villela, 2019; Cendejas et al., 2021), Sin embargo, ninguno de los antes mencionados ha realizado la integración de una metodología con las bondades de la modelación hidrológica y los métodos de investigación participativa.

La presente investigación tuvo por objetivo determinar los cambios en la recarga hídrica de la subcuenca Valle de Bravo Amanalco, mediante la comparación de

escenarios temporales empleando el Modelo SWAT y evaluación ecológica de la subcuenca mediante el método de Delphi a fin de conocer e identificar las causas y consecuencias del impacto sobre el recurso hídrico.

1.2 Antecedentes generales.

1.2.1. La Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México.

La subcuenca de trabajo se ubica al Suroeste del Estado de México, cuenta con una superficie estimada de 61 446.636 hectáreas de superficie, integra a distintos municipios del estado de México, siendo el Municipio de Valle de Bravo el de mayor superficie integrada, seguido de Amanalco de Becerra y en menores porciones los municipios de Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Temascaltepec y Zinacantepec, esto de acuerdo con García Martínez et al. (2024). Geográficamente se ubica entre los paralelos 19° 05' y 19° 20' de latitud norte y los meridianos 99° 53' y 100° 12' de longitud oeste. Hidrológicamente la subcuenca pertenece a la región hidrológica del Balsas (RH18) específicamente a la Cuenca Río Cutzamala (R18g), esto de acuerdo con datos publicados por CONAGUA (2015). Las altitudes de la subcuenca varían entre las 1780 m.s.n.m. en la parte baja de la cuenca de estudio (Embalse de la presa Miguel Alemán), hasta los 3530 en las partes más alta de la cuenca, esto de acuerdo con datos publicados por el INEGI (2018).

El clima de la región, según Köppen modificada por García-Amaro es templado subhúmedo, con precipitación media de 1042 mm al año y temperaturas medias que varían de 18 a 22 °C (Hansen et al., 2022).

El uso de suelo y vegetación varían dependiendo de la topografía del terreno, el principal el uso de suelo es agricultura de temporal, seguido de zonas de asentamientos humanos o área urbana, sin embargo, gran parte de la superficie de la subcuenca se encuentra cubierta por vegetación natural, los tipos de

vegetación presentes en la región son bosques de pino, bosque de encino, y sus diferentes mezclas, así como de boques de oyamel y boque mesófilo de montaña. Actualmente la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco sufre un proceso de deforestación y cambio de uso de suelo generando así afectaciones a los flujos de agua de la región.

Por último, se remarca la importante social de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco para usuarios externos, ya que la región representa un área de captación de agua para la ZMVM. El agua que precipita en la región es almacenada en la Presa Miguel Alemán, la cual a su vez abastece al Sistema Cutzamala y continua hasta la metropolitana de la Ciudad de México en donde satisface la necesidad del 26 % de la población de esa región (Santos-Téllez et al., 2021).

1.2.2. Modelo SWAT.

Dentro de la Subcuenca existen problemas ambientales que amenazan la permanencia de los ecosistemas y la seguridad hídrica de la sociedad que habita en ella, sin embargo, los programas actuales y nuevas tecnologías han permitido generar propuestas y alternativas para contrarrestar este tipo de afectaciones. Una de las herramientas más empleadas en el mundo para la elaboración de alternativas y estimación de las condiciones de los recursos hídricos es la modelación hidrológica, esta permite cuantificar el vital líquido así como conocer la calidad de este (Francesconi et al., 2016).

En ese sentido, el modelo hidrológico más ampliamente utilizado en el mundo es el Modelo SWAT(Rodríguez-Flores, 2020) la razón de su aplicabilidad y aceptación global se debe a su capacidad para simular procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas de distintos tamaños y contextos. Adicionalmente, el Modelo SWAT permite generar proyecciones sobre la variación de los flujos hídricos entre los distintos años de estudios, lo cual contribuye en la comprensión

de los procesos hídricos dentro de un área específica, así como los factores responsables de la variación en la disponibilidad de agua en la misma.

Algunos ejemplos en donde ha sido utilizado el Modelo SWAT son los estudios orientados a evaluar el comportamiento del escurrimiento del agua, el estado de conservación de las cuencas hidrográficas y el efecto del cambio en el uso del suelo sobre la esorrentía de las subcuencas (Cuervo-Robayo, 2019; Colín-García, 2019; Rodríguez-Flores, 2020).

1.3 Investigación acción participativa

La aplicación de modelos matemáticos enfocados a la hidrología ha logrado avances importantes en la representación de los procesos biofísicos, sin embargo, los investigadores y técnicos encargados de la aplicación de estos modelos a menudo presentan complicaciones al capturar la totalidad de los procesos humanos intrínsecos en la gestión de la tierra (Arrueta et al., 2022). Ante esta situación, autores como Baker et al. (2015) plantean un enfoque de investigación denominado “socio-hidrología” el cual integra la visión y perspectivas y relación de los habitantes con sus recursos hídricos.

En el enfoque socio-hidrológico, se plantea que la sociedad aporta información valiosa al proceso de investigación y que este conocimiento tiene un gran potencial de mejorar la comprensión de las realidades que se viven en las área de trabajo y agudizar la identificación de áreas de importancia en las que centrar esfuerzos. Lograr la comprensión con ese nivel de detalle permitirá plantear soluciones sostenibles en el tiempo (Arias et al., 2011).

Con el propósito de mejorar el entendimiento de los procesos que se desarrollaban dentro de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, se integraron a esta investigación metodologías de Investigación-Acción Participativa, a través del uso del método Delphi, retomado de Dalkey & Helmer, (1963), y adecuación

de la herramienta Ficha de Evaluación Ecológica (FEE) planteada por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).

1.4 Justificación

El presente estudio aborda la disminución del recurso hídrico en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco en México, sitio de gran relevancia debido a la posición estratégica en el abasto de agua de la ciudad de México y su zona metropolitana.

En los últimos 2 años la cantidad de agua captada en región ha disminuido y se provee que en un futuro este fenómeno sea más intenso, en ese contexto, la presente investigación permite crear un marco de referencia técnico y teórico que facilita el diseño de estrategias de gestión del recurso hídrico.

Existe evidencia de trabajos que documentan la condición de la subcuenca, así como las principales problemáticas y las consecuencias que esto conlleva, sin embargo, no existe evidencia de la aplicación de la modelación hidrológica en el área de trabajo de manera puntual, por lo que el presente estableció un referente en los estudios de este tipo. Adicionalmente, la propuesta de investigación pretende integrar enfoques técnicos y sociales mediante la combinación de los modelos hidrológicos e investigación-acción participativa.

El principal aporte del actual documento, consiste en mostrar los beneficios de la realización de investigaciones mixtas, y como esto mejora la comprensión del entorno de trabajo. Al respecto de la viabilidad del proyecto de investigación este se considera como altamente viable, ya que los modelos hidrológicos así como la metodología de investigación-acción participativa han sido probados en diversos contextos y cuentan con un acervo bibliográfico amplio que permitirá sustentar la investigación actual. Finalmente, el estudio cubre una necesidad

concreta: el acceso a información de calidad y conocimiento integral sobre los recursos hídricos para toda la sociedad e interesados en general.

1.5 Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar los cambios en la recarga hídrica de la subcuenca Valle de Bravo Amanalco, mediante la comparación de escenarios temporales empleando el Modelo SWAT y evaluación ecológica de la subcuenca mediante el método de Delphi a fin de conocer e identificar las causas y consecuencias del impacto sobre el recurso hídrico.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- a) Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso del Modelo SWAT en México y en el mundo.
- b) Implementar el modelo SWAT en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.
- c) Implementar el método Delphi que implica investigación, acción participativa de expertos en la materia sobre la condición ecológica de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco

1.6. Preguntas de investigación

- ¿Existen cambios en recarga hídrica en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco?
- ¿Los cambios en la recarga hídrica de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco son positivos o son negativos?
- ¿Cuáles son las causas y consecuencias de los cambios en la recarga hídrica de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco?

1.7. Hipótesis

- a) Existen cambios en las condiciones ambientales de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco que han alterado la dinámica natural del ciclo hidrológico durante los últimos años.
- b) Los cambios en el ciclo hidrológico de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco son predominantemente negativos y están relacionados con la disminución de la cobertura vegetal y las variaciones climáticas.
- c) Los cambios en el ciclo hidrológico de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco han provocado una disminución en la disponibilidad de agua para consumo humano.

1.8. Estructura del documento de titulación

El presente trabajo se integra por seis capítulos (Figura. 1) los cuales se describen a continuación: Capítulo 1. Plantea la introducción general del tema de investigación, incluye antecedentes, la justificación, el planteamiento del problema, el objetivo general y objetivos específicos, las preguntas de investigación y las hipótesis. Además, se presenta una descripción de la estructura guía del documento de titulación.

El Capítulo 2 aborda el marco teórico relacionados con el tema de estudio, con el propósito fundamentar y comprender los resultados obtenidos.

Capítulo 3. A partir de este capítulo se emplea el formato de artículo científico, el título del capítulo es “Estado del arte de la modelación hidrológica con énfasis en el modelo SWAT”, en él se sistematiza el conocimiento existente relacionado con el modelo y su evolución a lo largo del tiempo, empleando la metodología de estado del arte.

Capítulo 4. Centrado en la aplicación y construcción del modelo hidrológico. En él se detalla el proceso de recopilación de información, la metodología empleada y los resultados alcanzados durante la investigación.

Capítulo 5, describe el apartado correspondiente a los métodos de participación ciudadana. Este incluye la caracterización de los métodos empleados, la construcción de la encuesta aplicada y la integración de los resultados obtenidos. El Capítulo 6 presenta los resultados derivados de la investigación de manera integral acompañados de un análisis y discusión de estos y finalmente expone las conclusiones generales del trabajo realizado.

**ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL RECURSO
HÍDRICO EN LA SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-
AMANALCO.**

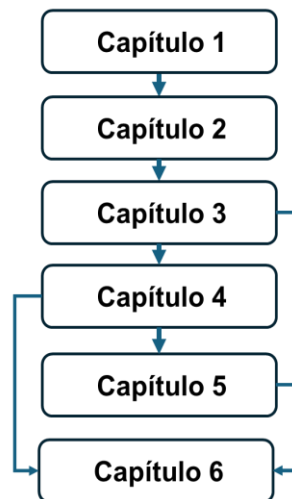


Figura. 1. Estructura general del documento de Investigación

1.9. Referencias

- Arias, M. E., Cocjrane, T. A., Lawrence, K. S., Killeen, T. J., & Farrell, T. A. (2011). Paying the forest for electricity: a modelling framework to market forest conservation as payment for ecosystem services benefiting hydropower generation. *Environmental Conservation*, 38(4), 473–484. <https://doi.org/10.1017/S0376892911000464>
- Arrueta, L., Jackson-Smith, D., & Kalcic, M. (2022). Simulating behavioral heterogeneity in watershed models: A systematic review of fertilizer use in SWAT studies. *Journal of Soil and Water Conservation*, 77, 249–260. <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.00055>
- Baker, T. J., Cullen, B., Debevec, L., & Abebe, Y. (2015). A socio-hydrological approach for incorporating gender into biophysical models and implications for water resources research. *Applied Geography*, 62, 325–338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.008>
- Banderas, A. G., & González-Villela, R. (2019). Evaluation of the sustainability of the Valle de Bravo reservoir, Mexico, as a water-supply source. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 239, 79–93. <https://doi.org/10.2495/WS190081>
- Cendejas, J. C., Ramírez, L. M., Zierold, J. R., Valenzuela, J. D., Ibarra, M. M., de Tagle, S. M. S., & Téllez, A. C. (2021, October). Evaluation of the impacts of land use in water quality and the role of nature-based solutions: A citizen science-based study. *Sustainability (Switzerland)*, 13. <https://doi.org/10.3390/su131910519>
- Comisión Nacional del agua; Programa Hídrico Regional 2014—2018 de la Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas. Recuperado el 18 de Noviembre 2025 en; <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/4%20Balsas.pdf>
- Cuervo-Robayo, A. P., Ureta, C., Gómez-Albores, M. A., Meneses-Mosquera, A. K., Téllez-Valdés, O., & Martínez-Meyer, E. (2020, July). One hundred years of climate change in Mexico. *PLoS ONE*, 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>
- Dalkey, N., & Helmer, O. (1963, April). An Experimental Application of the Delphi Method to the use of experts. *Management Science*, 9, 458–467. <https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.458>
- Flores-Fernández, G. C., García-Romero, L., & Sánchez-Quispe, S. T. (2022, May). Assessing climate change impacts on hydrology: application to Zacapu and Pastor Ortiz aquifers (Mexico). *Journal of Water and Climate Change*, 13, 2129–2142. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.101>
- Francesconi, W., Srinivasan, R., Pérez-Miñana, E., Willcock, S. P., & Quintero, M. (2016). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. *Journal of Hydrology*, 535, 625–636. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.034>

- García-Martínez, R., Hernández Soto, F. N., Emeterio Moreno, J., & Colín Velázquez, M. K. (2024). Diferencias en la fertilidad del suelo en cuatro plantaciones forestales comerciales de pino en Amanalco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(85), 150–170. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i85.1462>
- Guerrero-Morales, J., Fonseca, C. R., Gómez-Albores, M. A., Sampedro-Rosas, M. L., & Silva-Gómez, S. E. (2020, October). Proportional variation of potential groundwater recharge as a result of climate change and land-use: A study case in Mexico. *Land*, 9, 1–22. <https://doi.org/10.3390/land9100364>
- Hansen, A. M., Díaz-Valencia, S., & Sandoval-Chacón, D. A. (2022). Natural attenuation and its impact on reactive carbon loads to a eutrophic reservoir located in a mountain temperate zone. *Applied Geochemistry*, 146, 105466. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105466>
- Instituto nacional de geografía y estadística (2018). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Recuperado en 30 de Agosto 2024 de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R., Kraxner, F., Leduc, S., & Patrizio, P. (2018, November). Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change*, 53, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.004>
- Olivares, E. A. O., Jimenez, S. I. B., Takaro, T. K., Enriquez, J. O. C., & Torres, M. L. D. G. (2018, March). Decrease of the water recharge and identification of water recharge zones in the alto atoyac sub-basin, Oaxaca, as a result of climate change. *Journal of Water and Climate Change*, 9, 37–57. <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.033>
- Reza-Curiel, A., Gutiérrez Cedillo, J. G., & Serrano Barquín, R. del C. (2023, August). Caracterización de la cuenca Valle de Bravo-Amanalco para el diseño de rutas y circuitos turísticos. *La encrucijada ambiental*: <https://doi.org/10.52501/cc.120.14>
- Silva, J. A., Monroy-Becerril, D. M., & Martínez-Díaz, E. (2023, March). Effects of climate change on water resources in Mexico. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 34, 408–427. <https://doi.org/10.1108/MEQ-03-2022-0081>

ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-AMANALCO, MÉXICO

Capítulo 2

El siguiente capítulo reúne y analiza los fundamentos conceptuales y teóricos que sustentan la investigación.

Se buscó a través de la revisión de literatura exponer los principios, definiciones así como enfoques más relevantes sobre el tema, con el fin de construir una base sólida que oriente el desarrollo metodológico y la interpretación de los resultados presentados en los capítulos posteriores.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Recurso hídrico

Se definen como recursos hídricos al conjunto de cuerpos de agua superficiales y subterráneos disponibles en un territorio, susceptibles de ser aprovechados para satisfacer necesidades humanas, productivas y ecológicas (US Geological Survey, 1993) estos incluyen ríos, lagos, embalses, acuíferos, aguas de escorrentía, glaciares y precipitaciones, los cuales conforman un sistema hidrológico dinámico e interdependiente. En este sentido, la alteración de una de sus partes, como la extracción de aguas subterráneas, modifica los flujos superficiales y genera desequilibrios en los ecosistemas acuáticos (Famiglietti, 2014).

De acuerdo con Gleick (1998), en gran medida las condiciones de bienestar y desarrollo de las sociedades están definidas por la disponibilidad, calidad y distribución geográfica de estos recursos, por ello, la gestión de los recursos hídricos no solo se centra en su aprovechamiento, sino también en su conservación, regulación y uso racional. Su gestión eficiente y sostenible es un componente esencial para asegurar la seguridad hídrica, alimentar los ecosistemas y promover el bienestar humano y económico de las generaciones presentes y futuras (Liu et al., 2017).

2.2. Importancia de los recursos hídricos para México

En México, los recursos hídricos representan un componente esencial en el desarrollo económico, social y ambiental, dada su implicación directa en la salud pública, la seguridad alimentaria, la generación de energía, el abastecimiento urbano y la conservación de los ecosistemas.

El agua es indispensable para el consumo humano, la higiene y el saneamiento básico, el acceso a servicios de agua potable y tratamiento de aguas residuales es una condición necesaria para el bienestar de la población, especialmente en zonas rurales y periurbanas.

En México, el rezago en cobertura y calidad del servicio ha sido señalado como una fuente persistente de desigualdad social y sanitaria (CONAGUA, 2021; López-Pérez, 2017). Además, la contaminación de cuerpos de agua por descargas industriales, agrícolas y urbanas pone en riesgo la salud humana y la integridad ambiental (Méndez Sánchez & Nava-Bolaños, 2022).

Desde el punto de vista productivo, el agua es la base de la agricultura de riego, representando aproximadamente el 76 % del uso total concesionado de agua en el país (González-Soto et al., 2020). La disponibilidad y eficiencia en el uso del agua condicionan directamente la productividad agrícola, la seguridad alimentaria y los ingresos de los productores.

En las zonas urbanas, como en la Ciudad de México y su área metropolitana, los recursos hídricos son vitales para el abastecimiento de millones de habitantes, sin embargo, la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación y la dependencia de sistemas de abastecimiento como el Sistema Cutzamala evidencian un modelo de abasto insostenible (Ezcurra, 2010).

2.3. Importancia del recurso hídrico en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco

La subcuenca Valle de Bravo-Amanalco forma parte de la cuenca del río Cutzamala, posee un rol estratégico en la provisión de agua, la regulación ambiental, el sustento de comunidades locales y la conexión con grandes sistemas hídricos nacionales.

Una de las funciones más críticas de esta subcuenca es aportar agua al Sistema Cutzamala, el cual abastece de agua potable a la Ciudad de México, Toluca y

otros municipios. Se estima que esta subcuenca suministra aproximadamente 6 m³/s al sistema (Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, 2019).

La subcuenca está conectada directamente con la presa de Valle de Bravo, que cumple funciones de almacenamiento, regulación de caudales y abastecimiento. Este embalse tiene una superficie cercana a 18.55 km², profundidad media de 21,1 m, y capacidad máxima reportada de 391×10^6 m³. En 2024 se documentó una caída en los niveles de almacenamiento de agua en la presa Miguel Alemán, alcanzando mínimos históricos del 30 % en temporadas de sequía, lo cual puso en evidencia la vulnerabilidad del abastecimiento frente a la variación climática y la extracción excesiva (Ramírez-Zierold et al., 2024).

La cuenca alberga bosques y zonas naturales protegidas que contribuyen al ciclo del agua, la infiltración, la recarga de acuíferos y la protección del suelo frente a erosión, logrando un rol ecológico que sostiene manantiales, corrientes intermitentes y mantiene la conectividad ecológica en sistemas acuáticos.

La subcuenca abarca territorios rurales con ejidos y comunidades que dependen de los recursos naturales como el agua de manantiales, productos forestales no maderables (hierbas medicinales, hongos, etc.) y actividades agrícolas auxiliares (Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, 2019).

A pesar de su relevancia, la subcuenca presenta múltiples presiones que amenazan la calidad y cantidad del agua: contaminación y sedimentación, reducción en almacenamiento y Urbanización y cambio de uso de suelo (POER Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, 2015).

2.4. Contexto actual del recurso hídrico en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco

En los últimos años, la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco ha enfrentado una crisis hídrica cada vez más intensa debido a la reducción de la disponibilidad del recurso, el deterioro de la calidad del agua, los efectos del cambio climático y las presiones antrópicas sobre el territorio.

La subcuenca funge como una de las captadoras de agua de mayor importancia debido a que aporta directamente al abasto del recurso hídrico potable a la zona metropolitana y Ciudad de México, lo cual a su vez incrementa la tensión sobre sus recursos.

Uno de los indicadores más visibles de esta crisis es la disminución progresiva del nivel del embalse de Valle de Bravo. Informes recientes muestran que, entre 2020 y 2024, el volumen almacenado cayó en varios momentos por debajo del 40 % de su capacidad total, alcanzando un mínimo crítico del 30 % en marzo de 2024.

En paralelo, se ha reportado un deterioro en la calidad del agua. La Comisión para la Cooperación Ambiental identificó altos niveles de contaminación difusa, arrastre de sedimentos, presencia de nitratos y fósforo, así como una eutrofización progresiva del embalse. Además, organizaciones sociales han advertido que el agua del lago ha alcanzado niveles de toxicidad preocupantes debido a la proliferación de cianobacterias (Ramírez-Zierold et al., 2024).

Por otro lado, el uso intensivo del agua para abastecimiento urbano genera una presión constante sobre el equilibrio hídrico. La subcuenca aporta entre 6 y 8 m³/s al Sistema Cutzamala, representando hasta el 40 % del agua que se distribuye a la Ciudad de México y su zona conurbada.

2.5. Problemáticas ambientales en la subcuenca Valle de Bravo – Amanalco: evidencia científica local

La subcuenca Valle de Bravo – Amanalco se distinguió por su relevancia hídrica, ecológica y social dentro del contexto regional. No obstante, diversos estudios científicos documentaron una serie de impactos ambientales que comprometieron su funcionalidad ecológica, con énfasis en la calidad del agua, la degradación del suelo y los efectos derivados del manejo forestal y del uso del suelo. A continuación, se presentan algunas de las problemáticas ambientales más relevantes, respaldadas por evidencia técnica y científica.

Gómez-Albores et al. evaluaron la calidad del agua en el río Amanalco, utilizando macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores. A través del índice BMWP/México, los autores determinaron que los sitios muestreados presentaban calidades que oscilaban entre “regular” y “eutrófica/moderadamente contaminada”. Los resultados permitieron inferir la existencia de una contaminación crónica en los afluentes de la subcuenca, probablemente asociada con descargas domésticas, escurrimientos agrícolas y aportación de aguas residuales no tratadas, lo cual comprometió la integridad ecológica del sistema hídrico.

Por su parte, García-Martínez et al.(2024) analizaron las diferencias en la fertilidad del suelo en plantaciones forestales ubicadas dentro de la cuenca Amanalco–Valle de Bravo, encontrando que las plantaciones en donde previamente existió actividades, presentan variaciones en la disponibilidad de nutrientes, derivadas de su uso anterior y de las prácticas de manejo empleadas, concluyendo que se estaba produciendo una degradación progresiva de las propiedades físicas y químicas del suelo, lo cual podría afectar negativamente su capacidad de infiltración hídrica, incrementar los volúmenes de escorrentía superficial y reducir los procesos de recarga de los acuíferos en zonas de montaña.

Suárez-Jiménez (2021), documentó el impacto de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua en la subcuenca. El estudio señaló que la aplicación intensiva de fertilizantes y pesticidas, sumada a prácticas de labranza inadecuadas y a un deficiente manejo de las aguas residuales, generó alteraciones significativas en parámetros físicos, químicos y bacteriológicos del agua. Los datos obtenidos indicaron que el aporte de nutrientes a la presa de Valle de Bravo favoreció la aparición de procesos de eutrofización, la proliferación de floraciones algales y el incremento de los costos de potabilización del agua destinada al consumo humano.

2.6. Problemáticas sociales en la subcuenca Valle de Bravo – Amanalco: Evidencia científica local

La subcuenca Valle de Bravo – Amanalco no sólo se ha visto afectada por amenazas ambientales, sino también por una serie de tensiones y problemáticas sociales que emergen en torno al acceso al agua, la gobernanza, los conflictos entre actores y las desigualdades socioespaciales. A continuación se describen las principales problemáticas sociales documentadas en estudios científicos y de gobernanza:

Venancio-Flores (2019) analizó la gobernanza del recurso hídrico en la cuenca hidro-social de Valle de Bravo – Amanalco y encontró que, a pesar de los esfuerzos por establecer una gestión integrada del agua, persistieron dificultades y conflictos entre actores sociales, gubernamentales y empresariales, que obstaculizaron la ejecución de políticas efectivas.

Por otro lado, La investigación realizada por Linares (2024) hace referencia al rol que la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco tiene como fuente de suministro de agua para grandes poblaciones urbanas, y cómo esta función genera conflictos sociales en las comunidades locales cuando se percibe que las autoridades priorizan la extracción para zonas urbanas en detrimento del acceso local. Este fenómeno de desigualdad hídrica contribuye a una sensación de injusticia entre los habitantes de la cuenca, manifestada en protestas, peticiones ciudadanas y demandas legales.

En el contexto local de San Jerónimo Amanalco, un estudio cualitativo abordó la percepción de los usuarios del servicio de agua potable y evidenció que muchos pobladores se enfrentaban a fallas en el suministro, incertidumbre regulatoria y falta de mecanismos reales de participación en las decisiones sobre el recurso (Sustentabilidad Sistémica, 2018).

Finalmente el Programa de Ordenamiento Ecológico Regional (POER) para Valle de Bravo-Amanalco reconoce que los asentamientos irregulares en zonas forestales y áreas naturales protegidas representan un problema socioambiental crítico, estos asentamientos ejercieron presión sobre ecosistemas sensibles y

áreas de recarga hídrica, generando conflictos de uso del suelo, riesgos legales y vulnerabilidad ante eventos naturales como incendios o deslizamientos (Dirección General de Ordenamiento Territorial y Suelo, 2018).

2.7. Impacto de las problemáticas ambientales y sociales sobre la escasez de agua y el abastecimiento

La escasez de agua y los problemas de abastecimiento hídrico no pueden entenderse únicamente desde una perspectiva climática o hidrológica, sino que responden a un entramado complejo de factores ambientales y sociales que interactúan en múltiples escalas. Estudios recientes han demostrado que prácticas como la deforestación, el cambio de uso del suelo, el uso intensivo de agroquímicos, la expansión urbana no planificada, la mala gestión de aguas residuales y los conflictos sociales por el acceso al agua tienen efectos directos e indirectos sobre la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, tanto en superficie como en acuíferos subterráneos (Unfried et al., 2022). La deforestación y la modificación del paisaje han sido identificadas como factores que alteran profundamente el ciclo hidrológico.

Ellison et al. (2017) argumentaron que la reducción de cobertura forestal disminuye la capacidad del ecosistema para retener e infiltrar agua, afectando la recarga de acuíferos y reduciendo el flujo base en temporadas secas. Van Meerveld et al. (2025) señalaron que en zonas con suelos degradados y alta escorrentía los procesos de restauración vegetal pueden tener un efecto positivo sobre la disponibilidad estacional del agua. Sin embargo, esto depende del tipo de vegetación, características edáficas y climáticas locales (Filoso et al., 2017). Las prácticas agrícolas intensivas, en particular el uso masivo de fertilizantes y pesticidas, tienen consecuencias significativas sobre los sistemas de agua. Huang et al. (2025) mostraron que la irrigación intensiva puede aumentar la humedad del suelo a corto plazo, pero reducir la disponibilidad de agua subterránea debido a la sobreexplotación de acuíferos. Mientras que Junquera et al. (2024), en un estudio de caso en el sur de España, documentaron un colapso

hidrológico en regiones con agricultura de alta demanda hídrica, donde el descenso de los niveles freáticos llevó a la reducción del abastecimiento y pérdidas económicas severas.

En contextos donde la disponibilidad del recurso hídrico disminuye, emergen con frecuencia conflictos sociales relacionados con el acceso, la distribución y la gestión del agua. Unfried et al. (2022) identificaron una relación directa entre la disminución local de cuerpos de agua y el aumento en la probabilidad de conflictos sociales. En esa misma línea, Nkiaka et al. (2024) analizaron casos en África subsahariana, encontrando que los eventos de estrés hídrico prolongado estaban correlacionados con tensiones violentas entre comunidades.

Karamidehkordi et al. (2024) destacaron que los conflictos por el agua generan también efectos colaterales ambientales, como la sobreexplotación de fuentes locales, el abandono de prácticas sostenibles y el deterioro de ecosistemas acuáticos. De este modo, las tensiones sociales no sólo son una consecuencia de la escasez, sino también un factor que retroalimenta el deterioro del recurso.

2.8. Necesidad de estimar el recurso hídrico en la subcuenca.

Dado el conjunto de problemáticas ambientales y sociales que enfrenta la subcuenca Valle de Bravo – Amanalco resulta fundamental contar con herramientas que permitan entender, simular y anticipar el comportamiento del recurso hídrico bajo diferentes condiciones.

La modelación hidrológica se ha consolidado como una estrategia clave para la gestión integrada del agua, ya que permite analizar los procesos del ciclo hidrológico, identificar áreas críticas de escurrimiento, infiltración o recarga, y evaluar escenarios de uso del suelo, cambio climático y presión antrópica.

En este contexto, el uso de un modelo robusto como el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) se presenta como una herramienta idónea para evaluar la disponibilidad hídrica actual y futura, así como para orientar la toma de decisiones en torno a la planificación del territorio, la restauración ecológica y el uso sostenible del agua.

2.9. Modelos hidrológicos y análisis de escenarios: el modelo SWAT

El SWAT es un modelo hidrológico distribuido, de base física y operado a largo plazo, diseñado para predecir el impacto del uso del suelo, el clima y las prácticas de manejo sobre los recursos hídricos en cuencas hidrográficas complejas. Este modelo es especialmente útil para analizar escenarios temporales y proyectar el comportamiento hidrológico bajo diferentes condiciones de cambio climático, cobertura vegetal o uso del suelo (Arnold et al., 1998).

SWAT permite estimar múltiples variables del ciclo hidrológico, entre ellas la precipitación efectiva, la escorrentía, la evapotranspiración, el flujo subterráneo y la recarga hídrica. Para ello, divide la cuenca en subcuencas y luego en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), lo que permite una simulación espacialmente explícita. Esta característica es especialmente relevante para analizar subcuencas como la de Valle de Bravo – Amanalco, donde la heterogeneidad ambiental es elevada.

El uso del modelo SWAT en análisis de escenarios futuros ha demostrado ser eficaz en estudios que buscan evaluar la sustentabilidad hídrica y anticipar los efectos de prácticas de manejo o condiciones climáticas extremas. Los escenarios pueden ser diseñados a partir de datos históricos, proyecciones climáticas, cambios de cobertura y decisiones de manejo del territorio (Neitsch et al., 2011).

2.10. Referencias

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- Banton, E., Ocampo, C. J., & Bianchini, G. (2025). Forest conversion and water yield response in mountainous catchments. *Hydrology*, 12(10), 271. <https://doi.org/10.3390/hydrology12100271>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Estadísticas del agua en México, edición 2021.

- <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-del-agua-en-mexico-2021>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Estadísticas del agua en México, edición 2021. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-del-agua-en-mexico-2021>
- Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). (2023). Estado de la cuenca Valle de Bravo–Amanalco: Evaluación ambiental estratégica participativa. <https://www.cec.org/es/publicaciones/estado-de-la-cuenca-valle-de-bravo-amanalco/>
- Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS). (2019). La subcuenca Valle de Bravo–Amanalco: Una joya amenazada. https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2019/11/CCMSS_SUBCUENCA_VALLE_DE_BRAVO.pdf
- Dirección General de Ordenamiento Territorial y Suelo (2018). Programa de Ordenamiento Ecológico Regional Valle de Bravo Amanalco (POER). Gobierno del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente. <https://dgts.edomex.gob.mx>
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., ... & Gutierrez, V. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Ezcurra, E. (2010). El agua en la Ciudad de México: El pasado, el presente y un futuro posible. *Ciencias*, (94), 10–18. <https://www.revistacienciasunam.com/es/43-revistas/revista-ciencias-94/203-el-agua-en-la-ciudad-de-mexico.html>
- Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945–948. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>
- Filoso, S., Bezerra, M. O., Weiss, K. C., & Palmer, M. A. (2017). Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. *PLoS ONE*, 12(8), e0183210. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183210>
- Venancio-Flores, A., Bernal-Gonzales, E. E., (2019). Gobernanza del agua en la cuenca hidro social de Valle de Bravo Amanalco: conflictos, actores y procesos institucionales. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 64(237), 103–129. <https://doi.org/10.22201/fcpys.2448492xe.2019.237.67181>
- Gleick, P. H. (1998). Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 8(3), 571–579. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0571:WICPTO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0571:WICPTO]2.0.CO;2)
- Gobierno del Estado de México. (2015). Programa de Ordenamiento Ecológico Regional de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco (POERSVBA). Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Social. https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/archivos/poet_subcuenca_valle_de_bravo_amanalco.pdf

- González-Soto, R., Aguilar-Ávila, J., & Rendón-Macías, M. E. (2020). Valor del agua en la producción agrícola bajo riego en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(5), 1165–1175. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2715>
- Gómez Albores, M. A., Espinosa González, A. M., Martínez Arce, A., & Rodríguez Gómez, M. (2023). Calidad del agua del río Amanalco (Estado de México) basada en ensamblajes de macroinvertebrados acuáticos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94, e942832. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.2832>
- Huang, Y., Wang, L., Zhao, Y., & Zhang, W. (2025). Land use impacts on groundwater recharge and storage under climate variability. *Nature Communications Earth & Environment*, 6, 45. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02093-8>
- Junquera, P., Fernández, A., & Tapia, M. (2024). Hydro-social collapse in intensively farmed basins of southern Europe. *arXiv preprint*, arXiv:2408.00683. <https://arxiv.org/abs/2408.00683>
- Karamidehkordi, E., Mirchi, A., & Madani, K. (2024). Environmental consequences of water conflicts: A global perspective. In *Handbook of Environmental Impact Assessment*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23631-0.00016-9>
- Levy, B. S., Sidel, V. W., & Patz, J. A. (2011). Climate change and collective violence. *American Journal of Public Health*, 101(8), 1620–1627. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2011.300269>
- Linares, M. (2024). Desigualdad hídrica y conflictos por el agua en la región del Sistema Cutzamala. *Revista Latinoamericana de Estudios Ambientales*, 15(1), 55–74.
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., ... & Alcamo, J. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*, 5(6), 545–559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>
- López-Pérez, O. (2017). Hacia una sociedad del conocimiento en materia de agua en México. *Revista de la Facultad de Ingeniería, UNAM*, 27(1), 5–15. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-51362017000100087&script=sci_arttext
- Méndez Sánchez, F., & Nava-Bolaños, I. (2022). Los desafíos de México frente a la crisis por escasez de agua. *Universidad Iberoamericana*. <https://ibero.mx/prensa/opinion-los-desafios-de-mexico-frente-la-crisis-por-escasez-de-agua>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation Version 2009*. USDA-Texas A&M University.
- Nkiaka, E., Saeed, F., & van Garderen, L. (2024). Soil moisture droughts and violent conflict in the Sahel. *Earth's Future*, 12(1), e2023EF004013. <https://doi.org/10.1029/2023EF004013>

- Observatorio Ciudadano Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco & UNAM. (2025). Informe de monitoreo del Lago: Marzo 2025. https://observatoriovalle.org.mx/wp-content/uploads/2025/04/ProValle-de-Bravo-UNAM_Informe-monitoreo-del-Lago_marzo2025.pdf
- Ramírez-Zierold, J. A., Gutiérrez-Montes, I., & Flores-Rojas, A. (2024). Dinámicas de disponibilidad y calidad del agua en la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco: Retos para la seguridad hídrica en el contexto del cambio climático. *Revista Mexicana de Recursos Naturales*, 9(1), 45–62. <https://doi.org/10.22201/remern.2024.0901>
- Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Social del Estado de México (2014). Diagnóstico ambiental del Santuario del Agua: Subcuenca Amanalco-Valle de Bravo. Toluca: Gobierno del Estado de México.
- Sustentabilidad Sistémica. (2018). Percepción social y acceso al agua en comunidades rurales de San Jerónimo Amanalco, Estado de México. *Revista de Estudios Regionales y Medio Ambiente*, 10(3), 201–218.
- Suárez-Jiménez R. (2021). Monitoreo de la calidad del agua en la cuenca Amanalco Valle de Bravo: impactos del uso de suelo y las actividades agrícolas. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS). <https://www.ccmss.org.mx>
- Unfried, J., Wibbenmeyer, M., & McEvoy, D. (2022). Local surface water decline and social conflict risk: Evidence from global data. *World Development*, 157, 105949. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.105949>
- US Geological Survey (USGS). (1993). Sustaining our water resources (USGS Circular 1139). U.S. Department of the Interior. <https://pubs.usgs.gov/circ/1993/1139/report.pdf>
- Van Meerveld, I., Lyon, S., & Jencso, K. (2025). Forest restoration and streamflow: How much, when and where? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, e1760. <https://doi.org/10.1002/wat2.1760>

ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-AMANALCO, MÉXICO

El siguiente capítulo presenta una revisión sistemática de la literatura científica relacionada con el tema de investigación, con el propósito de identificar los principales avances, enfoques e identificar la pertinencia de la metodología a emplear en capítulos posteriores.

El Estado del Arte constituye una herramienta fundamental para comprender la evolución del conocimiento científico y técnico sobre la problemática abordada, permitiendo identificar las diferentes perspectivas, enfoques y metodologías empleadas por diversos autores a nivel nacional e internacional.

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON ÉNFASIS EN EL MODELO SWAT^{*3}

Martínez-Olaya José Ignacio¹ , Corona-Ambriz Alejandro¹ Ruiz-García Víctor Higinio²,
Ramírez-García Adán Guillermo^{1*}

¹Programa de Posgrado en Ciencias Forestales y del Ambiente, km 38.5 carretera México-
Texcoco C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México

²Programa de Posgrado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo
Sostenible. Universidad Autónoma Mexico-Texcoco, Km 38.5, Chapingo, México.
ARAMIREZG@chapingo.mx*

3.1 Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo sistematizar el conocimiento existente sobre la modelación hidrológica con énfasis en el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y su evolución a lo largo del tiempo. Se empleó como metodología el estado del arte, utilizando las herramientas: matriz bibliográfica y matriz analítica de contenido, ambas generadas en hojas de Excel de la paquetería de Microsoft Office. Los resultados evidenciaron que el modelo SWAT experimentó un amplio desarrollo desde su creación en los noventa, hasta la actualidad consolidándose como una de las mejores herramientas de modelación de procesos hidrológicos. En México, este modelo se ha empleado en el análisis del cambio climático, proyección de escenarios futuros y evaluación de procesos hidrológicos. Sin embargo, el modelo también ha sido cuestionado bajo el argumento de que está basado en un modelo semidistribuido que generalizan las propiedades físicas de la subcuenca (uso de suelo, tipo de suelo, pendiente) a través de la creación de Unidades de respuesta hidrológica (HRU). Se concluye que el modelo SWAT ha permitido avances relevantes en la representación de procesos biofísicos y estimación de servicios ecosistémicos (Aprovisionamiento y regulación), aunque cuenta con limitaciones en la cuantificación de servicios ecosistémicos culturales y de soporte, por lo que se recomienda integrar a estas investigaciones un enfoque socio hidrológico y metodologías de investigación acción participativas.

3.2. Palabras clave:

Aplicaciones hidrológicas, desarrollo histórico, México, revisión sistemática, limitaciones operativas, potencial de modelación

³ Artículo enviado a la revista: Tecnología y ciencias del agua.
Actualmente en revisión.

3.3. Abstract

The present study aimed to systematize existing knowledge on hydrological modeling, with an emphasis on the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model and its evolution over time. The research adopted a state-of-the-art review methodology, employing tools such as a bibliographic matrix and an analytical content matrix, both developed using Microsoft Excel from the Microsoft Office suite. The results showed that the SWAT model has undergone significant development since its creation in the 1990s, establishing itself as one of the most robust tools for modeling hydrological processes. In Mexico, this model has been applied in climate change analysis, future scenario projection, and the evaluation of hydrological processes. However, the model has also been subject to criticism, primarily due to its semi-distributed structure, which generalizes the physical characteristics of sub-basins (such as land use, soil type, and slope) through the creation of Hydrological Response Units (HRUs). In conclusion, the SWAT model has enabled substantial advances in the representation of biophysical processes and the estimation of ecosystem services (provisioning and regulating). Nevertheless, it presents limitations in the quantification of cultural and supporting ecosystem services. Therefore, it is recommended to integrate such assessments with socio-hydrological approaches and participatory action research methodologies.

3.4. Keywords:

Hydrological applications, historical development, Mexico, systematic review, operational limitations, modeling potential

3.5. Introducción

La reducción de los recursos hídricos evidencia la vulnerabilidad humana ante la escasez de agua y refuerza la necesidad de una planificación adaptativa frente a los cambios globales (Wang et al., 2022). Wedajo et al. (2024) documentaron que la expansión urbana y el cambio de uso del suelo alteran los procesos hidrológicos afectando la cantidad y calidad del agua. Adicionalmente Ruiz-García et al. (2023) mencionan que el balance hidrológico se ha visto modificado también por los efectos del cambio climático global (Ruiz-García et al., 2023), Intensificando eventos extremos como sequías y variaciones en la lluvia, transformando la dinámica de la escorrentía (Huang & Zhang., 2024).

En México, Gutiérrez-Ojeda & Escolero-Fuentes (2020) reportaron 105 acuíferos con explotación intensiva, mientras que la Comisión Nacional del Agua en el año 2015, estimó un consumo promedio de 380 litros diarios por persona, de las cuales, estudios locales reportan que 74.8 % de los hogares carece de acceso constante a agua potable y 70.8 % debe adquirirla, reflejando un déficit en necesidades básicas (Monroy-Torres et al., 2018).

Ante esta situación, resulta fundamental establecer protocolos que permitan evaluar los recursos del país a fin de garantizar su sustentabilidad, es así como la modelación hidrológica surge como herramienta clave en el diagnóstico y gestión de recursos hídricos (Aawar & Khare, 2020), aplicándose también a la gestión de uso de suelo y planificación en asignación de los recursos (Parra et al., 2018).

El objetivo del presente trabajo fue analizar las tendencias de la investigación científica en torno a la modelación hidrológica aplicada a la gestión de cuencas, con énfasis en el modelo SWAT, a partir del estudio de publicaciones indexadas en bases de datos académicas de alto impacto.

3.6. Materiales y métodos

Se adoptó un enfoque cualitativo tipo exploratorio, fundamentado en el método de estado del arte, según Londoño-Palacio et al. (2014). El tema de investigación fue

“Estado del arte de la modelación hidrológica con énfasis en el modelo SWAT” y posteriormente se delimitaron los subtemas de interés; Importancia de los modelos en la gestión del agua, definición de los modelos hidrológicos y tipos de modelación hidrológica, hitos históricos, integración de los sistemas de información geográfica, historia, bondades y tendencias actuales del modelo SWAT y uso del Modelo SWAT en México.

La búsqueda de información se llevó a cabo en la base de datos Scopus y adicionalmente, se utilizó Google Scholar como fuente de acopio de información complementaria. En cuanto a los instrumentos de análisis se empleó la matriz bibliográfica y la matriz analítica de contenido según Gómez-Vargas et al. (2015). Para cada artículo revisado se extrajeron los resúmenes, resultados y conclusiones, posteriormente se procedió con su lectura, revisión y extracción de información relevante, según los subtemas definidos. El análisis se realizó con lectura lineal, centrada en la revisión continua del contenido, y lectura transversal, enfocada en comparar variables bibliométricas como año de publicación, palabras clave y resumen.

3.7. Resultados

3.7.1. La importancia de los modelos en la gestión del agua actualmente

La modelación hidrológica es una herramienta esencial en la gestión del agua ante el cambio climático y la creciente presión sobre los ecosistemas, permite simular sistemas hídricos y generar escenarios futuros útiles para la toma de decisiones. Las cuencas hidrográficas son la unidad mínima de gestión pues integran funciones ecológicas, sociales y económicas, por lo que su modelación permite comprender dinámicas vinculadas al uso de agua en hogares, agricultura e industria

De acuerdo con Zhang et al. (2019) la modelación representa cuantitativamente las relaciones entre variables climáticas, actividades humanas y caudal fluvial, permitiendo la formulación de estrategias de adaptación a fin de que garanticen la sostenibilidad del recurso agua en contextos de variabilidad climática (Mahdaoui et al., 2024). En complemento; autores refieren que la capacidad de anticipar eventos extremos como sequías y degradación ambiental son vitales para garantizar la seguridad hídrica (Wang et al., 2022; Badika et al., 2024).

Por su parte, Emami & Koch. (2018) emplearon la modelación hidrológica en la optimización para asignación del agua en agricultura en el país de Irán, además, Wang et al. (2020) la utilizaron para la evaluación de la influencia del uso del suelo y la urbanización en la cuenca del río Xi en China, así como para la planeación de la ubicación y diseño de infraestructuras hidráulicas (Zhang et al., 2019).

3.7.2. Concepto de modelo hidrológico y sus tipos

Devia et al. (2015) describen que un modelo es una representación simplificada de un sistema real, siendo el mejor aquel que reproduce resultados cercanos a la realidad con pocos parámetros y baja complejidad. En ese sentido, un modelo hidrológico representa conceptual o matemáticamente al ciclo hidrológico, utilizando ecuaciones y herramientas computacionales (Singh & Woolhiser, 2010), su objetivo es predecir el comportamiento del sistema y comprender sus procesos bajo distintos escenarios basándose en tres principios: conservación de masas, representación e integración de datos multiescales (Chow et al., 1988).

Los modelos hidrológicos se clasifican según la forma en que abordan la variabilidad espacial en la cuenca. Los modelos “lumped” tratan la cuenca como una unidad homogénea, sin distinguir componentes internos (Peel & McMahon, 2020).

Por su parte los modelos semidistribuidos dividen el área de trabajo en unidades más pequeñas y homogéneas, como subcuencas o unidades de respuesta hidrológica (HRU), que combinan características similares de suelo, uso del suelo y pendiente. Ejemplos de estos son SWAT, HEC-HMS y HBV. Esta estructura permite

representar procesos clave en cada subcuenca e integrar sus resultados (Budhathoki et al., 2025).

Mientras que, los modelos distribuidos desagregan el espacio en celdas, simulando detalladamente los procesos hidrológicos en tiempo y espacio (Khaing et al., 2022). Cada celda incorpora parámetros propios (suelo, vegetación, topografía) y aplica ecuaciones físicas como las de Richards para el flujo en el suelo y las de Saint-Venant para la escorrentía.

3.7.3. Hitos de la modelación hidrológica

La modelación hidrológica tiene sus orígenes en el método racional desarrollado por Mulvany en 1850 según Poonia & Tiwari (2020) y el modelo de evento de Imbeau en 1892, quien relacionó el pico de escorrentía con la intensidad de lluvia (Beven, 2025). De acuerdo con Mishra et al. (2022), en 1932, Sherman introdujo el hidrograma unitario que vinculó escorrentía directa con exceso de precipitación, adicionalmente Jehanzaib et al. (2022) refiere que Horton desarrolló la teoría de infiltración y una ecuación semiempírica sobre flujo superficial entre 1933 y 1939.

Para el año de 1944, Keulegan propuso simplificaciones dando origen al concepto de onda cinemática (Himanshu et al., 2023). Finalmente, en 1945 Horton formuló las leyes empíricas que sentaron las bases de la geomorfología cuantitativa, integrando principios físicos y observaciones de campo (Sutradhar, 2020).

En la década de los sesenta, con los avances de la revolución digital se realizó el primer intento por representar el ciclo del agua en una subcuenca, surgiendo así el Standford Watershed Model-SWM de Crawford y Linsley en 1966, como lo refiere Nevárez-Favela et al. (2019). García-Alén et al. (2024) y Zhang et al. (2024) refieren que en ese periodo también surgieron otros modelos relevantes como el modelo Dawdy y O'Donnell (1965) el HEC-1 (1968) precursor del HEC-HMS, y el SWMM.

Durante las décadas de 1980 y 1990, los modelos hidrológicos se expandieron hacia la gestión ambiental y fortaleciendo la integración con disciplinas como meteorología, biología y climatología, gracias al desarrollo de los Sistemas de

información geográfica (SIG), la teledetección y gestión de bases de datos (Tan et al., 2020).

En los años noventa, surgieron los primeros modelos hidrológicos a gran escala (LHMs), como respuesta a la necesidad de evaluar el impacto humano en los sistemas hidrológicos (Wada et al., 2017). Este periodo se caracterizó por la adopción de modelos más sofisticados para la planificación de recursos hídricos, integrando componentes económicos, sociales y ambientales. De acuerdo con Sui & Maggio (1999) y Goyal et al. (2021) a finales de la década de 1990, la literatura especializada reconocía ampliamente los beneficios mutuos derivados de la integración entre los SIG y la modelización hidrológica. Moore et al. (1991) refieren que en el periodo 1990, la modelación evolucionó de enfoques conceptuales a modelos distribuidos con mayor resolución espacio-temporal, continuando con esta tendencias hasta los años 2000, en donde se integraron tecnologías como sensores remotos y modelos digitales de elevación lo que permitió vincular eficazmente la modelación hidrológica con plataformas SIG promoviendo estimaciones más precisas y relacionado problemáticas de los recursos hídricos y biológicos (Singh, 2018; Shekar & Mathew, 2024).

3.7.4. Historia del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

El modelo SWAT fue diseñado por Jeff Arnold para el Servicio de Investigación Agrícola (Agricultural Research Service) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en 1992. Con el tiempo evolucionó hasta ser una herramienta físicamente basada y semidistribuida (Srinivasan & Arnold, 1994; Kumar et al., 2023), permitiendo simular procesos hidrológicos y ambientales en cuencas hidrográficas, integrando datos de elevación, uso del suelo, variables edáficas y climáticas para representar interacciones complejas que afectan la escorrentía y la pérdida de suelo en distintas escalas espaciales y temporales (Akoko et al., 2021).

En un inicio el modelo buscaba estimar el impacto de las prácticas agrícolas sobre la calidad del agua y la producción agrícola, en escenarios de condiciones variables

de suelo, cobertura vegetal y uso del territorio (Arnold, 1998), sin embargo, la evolución del modelo los ha convertido en la actualmente en uno de los modelos más utilizados a nivel mundial por su versatilidad y capacidad de análisis (Aloui et al., 2022).

En 2003, SWAT fue renovado con la incorporación de algoritmos de programación que mejoraron la simulación de procesos de erosión y transporte de sedimentos en cuencas altamente erosionadas, facilitando la identificación de áreas críticas (Bieger et al., 2017; Giri, 2021).

Posteriormente, en 2006 se generó una versión del modelo que integraba nuevas capacidades para simular el drenaje superficial y subterráneo continuando con los trabajos de mejorar la precisión en la predicción de contaminación difusa proveniente de actividades agrícolas (Wang et al., 2019). Olivera et al. (2006) presentaron ArcSWAT, una interfaz desarrollada sobre la plataforma ArcGIS, Esta herramienta permitió almacenar y organizar datos de entrada y salida en una geo database, facilitando el análisis, visualización de resultados y su interoperabilidad con otras aplicaciones como Excel y MATLAB (Tan et al., 2020).

Kim et al. (2008) documentaron una evolución significativa del modelo SWAT al integrar MODFLOW, fortaleciendo la capacidad de SWAT para representar la recarga de acuíferos, la evapotranspiración, los niveles freáticos y la interacción entre cuerpos subterráneos de agua y redes fluviales (Wang & Chen, 2021). Recientemente Krysanova & Srinivasan (2015) describen que SWAT añadió a su capacidad funciones orientadas a evaluar el impacto del cambio climático sobre la hidrología y la disponibilidad de agua en cuencas hidrográficas.

3.7.5. Bondades del modelo SWAT y uso actual en el mundo

Comparaciones han demostrado que el Modelo SWAT ofrece características superiores respecto a sus similares (Rodríguez-Flores, 2020). El modelo integra un mayor número de parámetros, incrementando la precisión en la simulación y ampliando su aplicabilidad, además, destaca el hecho de ser un software de uso libre, flexible y con interfaces robustas como la adaptada a programa QGIS (López-

Ballesteros et al., 2024). El modelo también cuenta con el respaldo académico, foros técnicos y bases de datos globales que fortalecen su calibración (Janjić & Tadić, 2023). SWAT incorpora procesos agrícolas y de cuenca (Psomas et al., 2016) al tiempo que muestra alta versatilidad predictiva en diversas escalas temporales (Horan et al., 2020).

El modelo SWAT, se reitera como uno de los modelos ecohidrológicos más empleados, con cerca de 4,000 publicaciones, aunque la simulación de caudales extremos sigue poco documentada (Tan et al., 2020). Sin embargo, su uso se ha incrementado en los últimos diez años, con aplicaciones en distintas escalas y regiones, aunque limitado por la necesidad de grandes volúmenes de datos. Por último es necesario mencionar que existen Autores como Rasheed et al. (2024) quienes continúan proponiendo mejoras al modelo a fin de reducir incertidumbres y mejorar precisión de este.

3.7.6. Uso del Modelo SWAT en México

Con el propósito de identificar las tendencias y enfoques en la aplicación del modelo SWAT en México, se llevó a cabo una revisión sistemática de publicaciones indexadas en Scopus durante el periodo 2019–2024.

Durante el primer año analizado, Bribiesca-Rodríguez et al. (2019) evaluó y validó la pertinencia del modelo SWAT en México, estimando la carga de sedimentos en una cuenca rural en el centro del país, mientras que González-Ramírez y Parés-Sierra (2019) aplicaron el modelo SWAT a procesos hidrológicos regionales en 5 ríos del país, Grijalva, Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos y Pánuco.

En 2020, el modelo fue utilizado en la estimación de calidad del agua, sequías y disponibilidad hídrica. Deng et al. (2020) calibraron el modelo en la cuenca independencia, al Noreste del estado Guanajuato para reproducir escenarios históricos y futuros. Mientras que en Sonora en la parte baja de la cuenca del Río Mayo los autores Rojas-Rodríguez et al. (2020) lo emplearon en el análisis de contaminación difusa agrícola, por su parte Ruiz-Gibert et al. (2020) desarrollaron el modelo también en el norte de México, en Tijuana, pero ahora integrando SPI y

NDVI para analizar sequías; finalmente López-Lambraño et al. (2020) también lo utilizó en el mismo estado para identificar el déficit hídrico en el río Guadalupe.

Adicionalmente, los autores Velázquez-Zapata et al. (2020) y Flores-Cesáreo et al. (2020) desarrollaron investigaciones relacionadas a los Modelos SWAT, con el fin de mejorar la simulación de escenarios climáticos contrastantes en las cuencas mexicanas de cuenca del río Tampaón en San Luis Potosí, la cuenca del río Papagayo se localiza por completo en el estado de Guerrero y la subcuenca Huaquechula, Puebla, esto con el fin de mejorar los insumos mediante mapas Landsat.

Nevárez-Favela et al. (2021) comparó el uso del Modelo SWAT y WEAP teniendo como marco de referencia la cuenca del Río Sordo en Oaxaca, comprobando un mejor desempeño del primero. Mientras tanto en el estado de Veracruz el autor Alcalá et al. (2021) utilizaron SWAT en la región de los Tuxtlas para identificar potencial hidroeléctrico, por su parte, López-Ramírez et al. (2021) validaron la versión SWAT-T con datos de evapotranspiración y caudal en zonas montañosas tropicales pertenecientes a la cuenca alta del río Antigua. Al centro del país, Cruz-Arévalo et al. (2021) analizaron el cambio de uso de suelo empleando el modelo para identificar las repercusiones que este tendría sobre el escurrimiento en la subcuenca del Río Chapingo, aunque sin variaciones significativas.

En el estado de Michoacán, Bernal-Santana et al. (2022) evaluaron erosión en el río Duero, vinculando la erosión de manera directa con fenómenos de desmonte forestal. Finalmente, en Chiapas, Pérez et al. (2022) evaluaron la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río Huehuetán, Chiapas, México combinando SINMAP y SWAT para delimitar zonas inestables.

En 2023, los estudios se enfocaron en cambio climático y agricultura. Sánchez-Gómez et al. (2023) proyectaron reducciones de caudal de hasta 60 % en cuencas mediterráneas en el norte de México. López-Escudero et al. (2023) evaluaron fertilización en maíz y la contaminación que el exceso de fertilizante causa en la cuenca del Papaloapan, Alavez-Vargas et al. (2023) relacionaron erosión hídrica con cambios de cobertura en la misma cuenca, mientras que Colín-García et al.

(2023) demostraron mayor precisión edáfica con el uso de la metodología DSM, dentro de la cuenca del Río Mixteco en Oaxaca, Rodríguez-Flores et al. (2023) integraron SWAT con ARIMA para estimar sedimentos en la Subcuenca de Santa Cruz de Aquismón en San Luis Potosí, mostrando que esta combinación permitía completar series de datos faltantes y generar estimaciones de corto plazo.

Hernández-Marín et al. (2024) confirmaron pérdidas de precipitación por evapotranspiración en la cuenca del río Juchipila en Zacatecas; mientras que, Colín-García et al. (2024) aplicaron proyecciones CMIP6 en la Subcuenca del Mixteco, estimando descensos de hasta 61% en rendimiento hídrico. Torres-Suárez et al. (2024) aplicaron SWATCUP en Tulancingo, Hidalgo, para identificar contrastes en disponibilidad hídrica y cambios ligados a la precipitación.

3.8. Discusión

La importancia de los modelos hidrológicos en la gestión del agua radica en su capacidad para comprender la dinámica del balance hídrico de las cuencas hidrográficas (Tezel et al., 2025); los cuales se complementan con estudios de impacto del uso del suelo, cobertura terrestre y cambio climático haciendo más eficiente la gestión sostenible de los recursos hídricos (Hamid et al., 2025).

Los modelos hidrológicos siguen siendo representaciones simplificadas de procesos naturales y están sujetos a errores (Rivera et al., 2015) y continúan siendo limitados en su capacidad para integrar los usos del agua como una resultante del contexto social, esto debido a que estos modelos se basan necesariamente en leyes y ecuaciones imperantes que describen el movimiento del agua a través del ciclo hidrológico (Baker, 2015).

Los avances en las metodologías computacionales y continua evolución de las técnicas observacionales han acelerado el desarrollo de modelos hidrológicos numéricos basados en el acoplamiento de procesos físicos superficie-subsuelo (Shu et al., 2024; Paniconi & Putti, 2015). En los últimos años, los modelos de cuencas hidrográficas han experimentado importantes desarrollos; recientemente como la aparición de modelos híbridos de aprendizaje automático Refsgaard et al.

(2022). Por lo tanto, el concepto de modelación hidrológica continúa en crecimiento y se estima que existan nuevas maneras de definir a este en un futuro próximo.

Por otro lado, la revisión bibliográfica evidencia un consenso respecto a la aplicabilidad y ventajas sobre el uso de la modelación hidrológica, destacando el modelo SWAT como herramienta versátil y actual en la simulación de procesos hidrológicos a nivel de cuenca. Con respecto a la recomendación de uso, la literatura destaca que SWAT integra un conjunto más amplio de procesos hidrológicos que otros modelos como WEAP o VIC, lo que le confiere mayor precisión y flexibilidad. Su carácter de software libre y su compatibilidad con plataformas de código abierto como QGIS son elementos que han favorecido su adopción global. Sin embargo, esta ventaja técnica no elimina la necesidad de una capacitación específica para su correcto uso, ni resuelve los problemas asociados a la falta de información y escala de simulación.

Autores mencionan que el modelo SWAT presenta debilidades respecto a sus homólogos debido a que es un modelo semi distribuido, que realiza una generalización de las propiedades físicas (uso de suelo, tipo de suelo, pendiente) traduciéndose en la creación de las HRU dentro de las subcuencas, derivando en la disminución de resolución espacial en comparación con enfoques más detallados (Pechlivanidis et al., 2011)

Adicionalmente, se señala que el modelo SWAT enfrenta limitaciones significativas relacionadas con la disponibilidad y la calidad de los datos, así como dificultad de adaptación a diferentes condiciones geográficas y climáticas (Tan et al., 2019).

En el contexto mexicano, el modelo SWAT ha sido ampliamente empleado para evaluar procesos hidrológicos y analizar el impacto del cambio climático, así como para proyectar escenarios climáticos futuros.

Recientemente, su uso se ha extendido a cuencas rurales y al análisis de vulnerabilidad hídrica, validándose su eficacia en zonas semiáridas, donde ha mostrado un buen desempeño en la predicción del escurrimiento mensual y en la gestión de recursos hídricos en condiciones de escasez.

A nivel internacional, la aplicación de SWAT ha evolucionado hacia nuevas áreas de interés, como la cuantificación explícita de los servicios ecosistémicos. Francesconi et al. (2016) evidenciaron esta tendencia al identificar 44 artículos científicos que emplean el modelo SWAT para estimar servicios ecosistémicos de aprovisionamiento (34%), de regulación (27%) o una combinación de ambos (25%). De manera complementaria, Zhao et al. (2024) examinaron 81 publicaciones revisadas por pares que utilizan SWAT en el análisis de servicios ecosistémicos, destacando la evaluación de funciones como el rendimiento hídrico, la retención de suelo, la regulación del flujo de agua y el almacenamiento de carbono.

Estos avances demuestran que, si bien SWAT ha incorporado de manera significativa la representación de procesos biofísicos, persisten limitaciones importantes en su capacidad para capturar la complejidad de los comportamientos humanos asociados a la gestión de la tierra (Arrueta et al., 2022).

Dicha restricción introduce incertidumbres, especialmente en la estimación de servicios ecosistémicos culturales y de soporte los cuales dependen de interacciones humanas difíciles de parametrizar en modelos puramente biofísicos. Ante esta limitante, diversos autores como Baker et al. (2015) propusieron la adopción de enfoques socio hidrológicos que integren las percepciones y conocimientos locales de los habitantes de las subcuencas, como los planteados por Ramírez García et al. (2023), quienes usaron el método de valoración contingente para poder asignar un valor económico del recurso agua como base y plantear propuestas de políticas públicas que contribuyan al uso sustentable del recurso agua. No obstante, se plantea que estas aproximaciones no necesariamente deben incorporarse dentro de modelos como SWAT, sino que pueden abordarse mediante metodologías complementarias, tales como la investigación-acción participativa, que permita capturar de manera holística las dimensiones sociales de los servicios ecosistémicos.

3.9. Conclusiones

El presente estudio permitió sistematizar las tendencias y avances en la modelación hidrológica, destacando el papel del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) como una de las herramientas más robustas y versátiles para la simulación de procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas.

La revisión evidenció que el modelo SWAT ha evolucionado significativamente desde su desarrollo, lo que ha potenciado su aplicabilidad en diversos contextos y su utilidad en el análisis de impactos del cambio climático, la gestión del uso del suelo y la estimación de servicios ecosistémicos.

En el contexto mexicano, el modelo ha sido ampliamente aplicado y validado, mostrando resultados consistentes en la simulación de escurrimientos, evaluación de calidad del agua, predicción de eventos extremos y soporte a la toma de decisiones en planificación hídrica y territorial.

Pese a sus múltiples fortalezas, el modelo SWAT presenta limitaciones asociadas a su carácter semidistribuidos, la generalización espacial de parámetros físicos y su escasa capacidad para integrar dimensiones sociales, culturales o de soporte en los servicios ecosistémicos. En consecuencia, se recomienda complementar el uso del modelo con enfoques sociohidrológicos y metodologías de investigación-acción participativa, a fin de lograr una representación más integral del ciclo hidrosocial y fortalecer su utilidad en contextos de gobernanza hídrica compleja.

3.10. Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por otorgarme el apoyo financiero para la realización del presente trabajo, a la Universidad Autónoma Chapingo y muy especialmente al posgrado en Ciencias Forestales y del ambiente por contribuir en mi formación académica y profesional.

3.11. Referencias

- Aawar, T., & Khare, D. (2020). Assessment of climate change impacts on streamflow through hydrological model using SWAT model: A case study of Afghanistan. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1427–1437. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00759-0>
- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., & Kato, T. (2021). A review of SWAT model application in Africa. *Water (Switzerland)*, 13. <https://doi.org/10.3390/w13091313>
- Alavez-Vargas, M., González-Celada, G., Birkel, C., Fonseca, R., & Breña-Naranjo, J. A. (2023). Erosión potencial estimada en el río Papaloapan: Eficiencia e incertidumbre en las modelaciones. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 14(4), 349–414. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-04-08>
- Alcalá, G., Grisales-Noreña, L. F., Hernandez-Escobedo, Q., Muñoz-Criollo, J. J., & Revuelta-Acosta, J. D. (2021). SHP assessment for a run-of-River (RoR) scheme using a rectangular mesh sweeping approach (MSA) based on GIS. *Energies*, 14(11), 3095. <https://doi.org/10.3390/EN14113095>
- Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2022). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, 326(Pt B), 116799. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arrueta, L., Jackson-Smith, D., & Kalcic, M. (2022). Simulating behavioral heterogeneity in watershed models: A systematic review of fertilizer use in SWAT studies. *Journal of Soil and Water Conservation*, 77, 249–260. <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.00055>
- Badika, P., Raghuvanshi, A. S., & Agarwal, A. (2024). Climate change impact assessment on the hydrological response of the Tawa basin for sustainable water management. *Groundwater for Sustainable Development*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101249>
- Baker, T. J., Cullen, B., Debevec, L., & Abebe, Y. (2015). A socio-hydrological approach for incorporating gender into biophysical models and implications for water resources research. *Applied Geography*, 62, 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.008>
- Bernal-Santana, N., Cruz-Cárdenas, G., Silva, J. T., Martínez-Trinidad, S., Moncayo-Estrada, R., Estrada-Godoy, F., Álvarez-Bernal, D. (2022). Variation of surface runoff due to change of land use in the river Duero watershed. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 13(1), 427–469. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-10>

- Beven, K. (2012). Evolution of rainfall–runoff models: Survival of the fittest? In *Rainfall-Runoff Modelling* (pp. 25–50). <https://doi.org/10.1002/9781119951001.CH2>
- Beven, K., (2025). A short history of philosophies of hydrological model evaluation and hypothesis testing. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 12. John Wiley & Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/wat2.1761>
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association*, 53, 115–130. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>
- Bribiesca-Rodriguez, M. A., Juarez-Dehesa, J. I., Gonzalez, F., & Gutierrez-Aviña, G. (2019). Sediment load calculation within a rural basin by using a physically-based model (ARCSWAT). *Proceedings of the IAHR world congress*, 773–782. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0343>
- Budhathoki, B. R., Adhikari, T. R., Shu, L., Shrestha, S., Awasthi, R. P., Dawadi, B., Baniya, B., & Dhital, Y. P. (2025). Evaluation of distributed and semi-distributed hydrological models in complex river basin system, Nepal. *HydroResearch*, 8, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.09.006>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Colín-García, G., Palacios-Vélez, E., Fernández-Reynoso, D. S., López-Pérez, A., Flores-Magdaleno, H., Ascencio-Hernández, R., & Canales-Islas, E. I. (2023). Hydrological modeling with the SWAT model using different spatial distributions of soil type in the Mixteco river basin. *Revista Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1566>
- Colín-García, G., Palacios-Vélez, E., López-Pérez, A., Bolaños-González, M. A., Flores-Magdaleno, H., Ascencio-Hernández, R., & Canales-Islas, E. I. (2024). Evaluation of the impact of climate change on the water balance of the Mixteco River Basin with the SWAT model. *Hydrology*, 11(4), 45. <https://doi.org/10.3390/hydrology11040045>
- Cruz-Arévalo, B., Gavi-Reyes, F., Martínez-Menez, M., & Juárez-Méndez, J. (2021). Uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(2), 157–206. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-02-04>
- Deng, C., Li, Y., Pisani, B., Hernández, H., & Li, Y. (2020). Assessing the impact of climate change on water resources in a semi-arid area in central Mexico using a SWAT model. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. <https://doi.org/10.18268/BSGM2020v72n2a150819>
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2016). Introducing a new open-source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling & Software*, 85, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004>

- Emami, F., & Koch, M. (2018). Agricultural water productivity-based hydro-economic modeling for optimal crop pattern and water resources planning in the Zarrine River Basin, Iran, in the wake of climate change. *Sustainability (Switzerland)*, 10. <https://doi.org/10.3390/su10113953>
- Flores, J. C., González, A. B., López, S. V., Cajuste, L., Escobedo, F. J., & Ramírez, M. V. (2020). Cartografía del uso del suelo en la subcuenca Huaquechula, Puebla, México, con un índice combinado de imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/RIG.59914>
- Francesconi, W., Srinivasan, R., Pérez-Miñana, E., Willcock, S. P., & Quintero, M. (2016). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. *Journal of Hydrology*, 535, 625–636. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.034>
- García-Alén, G., Montalvo, C., Cea, L., & Puertas, J. (2024). Iber-PEST: Automatic calibration in fully distributed hydrological models based on the 2D shallow water equations. *Environmental Modelling & Software*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106047>
- Giri, S. (2021). Water quality prospective in twenty first century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: A review. *Environmental Pollution*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332>
- Gómez-Vargas M., Galeano, C., & Jaramillo, D. (2015). El estado del arte : una metodología de investigación. Universidad Católica Luis Amigó, Facultad de Psicología y Ciencias Sociales. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10495/6843>
- González-Ramírez, J., & Parés-Sierra, A. (2019). Streamflow modeling of five major rivers that flow into the Gulf of Mexico using SWAT. *Atmosfera*, 32, 261–272. <https://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.04.01>
- Goyal, D., Haritash, A. K., & Singh, S. K. (2021). A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling and coupling methods. *Journal of Environmental Management*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>
- Hamid, I., Dar, L. A., & Akintug, B. (2025). Impact of land use land cover and climate change on the hydrological response of Jhelum River basin in Kashmir, India. *Sustainable Water Resources Management*, 11(5), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S40899-025-01281-W/METRICS>
- Hernández-Marín, M. A., Ortiz-Gómez, R., Zavala, M., Rodríguez-Rodríguez, J. A., Alvarado Medellín, P., & Ortiz-Robles, F. A. (2024). Hydrological simulation using the SWAT model in a semi-arid region in the southern part of Zacatecas, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 83(18), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11837-2>
- Himanshu, S. K., Pandey, A., Madolli, M. J., Palmate, S. S., Kumar, A., Patidar, N., & Yadav, B. (2023). An ensemble hydrologic modeling system for runoff and evapotranspiration evaluation over an agricultural watershed. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51, 177–196. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01634-4>

- Horan, R. G., Wable, P., Baron, H., Keller, V., Garg, K., Mujumdar, P., Houghton-Carr, H., & Rees, G. (2020). A comparative assessment of the GWAHA, SWAT and VIC models in the hydrological modelling of the upper Cauvery catchment, India. <https://doi.org/10.20944/preprints202012.0106.v1>
- Huang, F., & Zhang, X. (2024). A new interpretable streamflow prediction approach based on SWAT-BiLSTM and SHAP. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 23896–23908. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32725-z>
- Janjić, J., & Tadić, L. (2023a). Fields of application of SWAT hydrological model—A review. *Earth (Switzerland)*, 4, 331–344. <https://doi.org/10.3390/earth4020018>
- Jehanzaib, M., Ajmal, M., Achite, M., & Kim, T. W. (2022). Comprehensive review: Advancements in rainfall-runoff modelling for flood mitigation. *Climate*, 10. <https://doi.org/10.3390/cli10100147>
- Khaing, Z. M., Soe, M. W., Thu, M. M., & Norgbey, E. (2022). Comparative study of semi-distributed and 2D-distributed hydrological models for streamflow prediction in a data scarce mountainous watershed. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 2933–2949. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01271-9>
- Krysanova, V., & Srinivasan, R. (2015). Assessment of climate and land use change impacts with SWAT. In *Regional Environmental Change*, 15 (pp. 431–434). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0742-5>
- Kumar, V., Sharma, K. V., Caloiero, T., Mehta, D. J., & Singh, K. (2023). Comprehensive overview of flood modeling approaches: A review of recent advances. *Hydrology*, 10. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070141>
- Londoño-Palacio, O. L., Luis, P., Maldonado, F., Liccy, G., & Calderón Villafañez, C. (2014). Guías para construir estados del arte. MINISTERIO DE EDUCACION. <https://repositorio.minedu.gob.pe/handle/20.500.12799/4637>
- López-Ballesteros, A., Srinivasan, R., & Senent-Aparicio, J. (2024). Introducing MapSWAT: An open source QGIS plugin integrated with Google Earth Engine for efficiently generating ready-to-use SWAT+ input maps. *Environmental Modelling & Software*, 179, 106108. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106108>
- López-Escudero R.D. J., Romero-López, G., Reynoso-Lango V., & Aguirre-Inurreta H. D. (2023). Análisis de fertilización en el agroecosistema maíz en la cuenca de Papaloapan. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(8), e3378. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i8.3378>
- López-Lambrano, A. A., Martínez-Acosta, L., Gámez-Balmaceda, E., Medrano-Barboza, J. P., López-Remolina J. F., & López-Ramos, A. (2020). Supply and demand analysis of water resources. Case study: Irrigation water demand in a semi-arid zone in Mexico. *Agriculture*, 10(8), 333. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE10080333>
- López-Pérez, A., Colín-García G., Martínez-Cruz, T. E., & Manuel-Andrés, J. (2022). Mapeo del índice de estabilidad y de saturación del suelo en la cuenca del

- río Huehuetán, Chiapas, mediante el modelo SINMAP. *Investigaciones Geográficas*, 109. <https://doi.org/10.14350/RIG.60586>
- López-Ramírez, S. M., Mayer, A., Sáenz, L., Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Looker, N., Schürz, C., Berry, Z. C., Manson, R., Asbjornsen, H., Kolka, R., Geissert, D., & Lezama, C. (2021). A comprehensive calibration and validation of SWAT-T using local datasets, evapotranspiration and streamflow in a tropical montane cloud forest area with permeable substrate in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 603, 126781. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126781>
- Mahdaoui, K., Chafiq, T., Asmlal, L., & Tahiri, M. (2024). Assessing hydrological response to future climate change in the Bouregreg watershed, Morocco. *Scientific African*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e02046>
- Mishra, A., Mukherjee, S., Merz, B., Singh, V. P., Wright, D. B., Villarini, G., Paul, S., Kumar, D. N., Khedun, C. P., Niyogi, D., Schumann, G., & Stedinger, J. R. (2022). An overview of flood concepts, challenges, and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0002164](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0002164)
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5, 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Nevárez-Favela, M. M., Fernández-Reynoso, D. S., Sánchez-Cohen, I., Sánchez-Galindo, M., Macedo-Cruz, A., & Palacios-Espinosa, C. (2021). Comparación de los modelos WEAP y SWAT en una cuenca de Oaxaca. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(1), 358–401. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-01-09>
- Nouwakpo, K., Williams, J., Darboux, F., Cartwright, J. H., Shammi, S. A., & Rodgers, J. C. (2022). Use of multi-criteria decision analysis (MCDA) for mapping erosion potential in Gulf of Mexico watersheds. *Water*, 14(12), 1923. <https://doi.org/10.3390/W14121923>
- Paniconi, C., & Putti, M. (2015). Physically based modeling in catchment hydrology at 50: Survey and outlook. *Water Resources Research*, 51(9), 7090–7129. <https://doi.org/10.1002/2015WR017780>
- Parra, V., Fuentes-Aguilera, P., & Muñoz, E. (2018). Identifying advantages and drawbacks of two hydrological models based on a sensitivity analysis: A study in two Chilean watersheds. *Hydrological Sciences Journal*, 63, 1831–1843. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1538593>
- Pechlivanidis, I., Jackson, B., McIntyre, N., & Wheeler, H. (2011). Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *GlobalNEST International Journal*, 13, 193–214.
- Peel, M. C. & McMahon, T. A. (2020). Historical development of rainfall-runoff modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7 (5), <https://doi.org/10.1002/wat2.1471>

- Poonia, V., & Tiwari, H. L. (2020). Rainfall-runoff modeling for the Hoshangabad Basin of Narmada River using artificial neural network. *Arabian Journal of Geosciences*, 13. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05930-6>
- Psomas, A., Panagopoulos, Y., Konsta, D., & Mimikou, M. (2016). Designing water efficiency measures in a catchment in Greece using WEAP and SWAT models. *Procedia Engineering*, 162, 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.058>
- Ramírez García, A. G., Castillo Escalante, I. C. ., Calderón Vega, M. F., Duffus Miranda, D. ., & Pirela Hernández, A. A. (2022). Valoración económica y disponibilidad para pagar por el agua en comunidades rurales. *Económicas CUC*, 44(1), 83–102. <https://doi.org/10.17981/econcuc.44.1.2023.Econ.5>
- Raja Shekar, P., & Mathew, A. (2024). Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. In *Watershed Ecology and the Environment*, 6 (pp. 13–25). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>
- Rasheed, N. J., Al-Khafaji, M. S., Alwan, I. A., Al-Suwaiyan, M. S., Doost, Z. H., & Yaseen, Z. M. (2024). Survey on the resolution and accuracy of input data validity for SWAT-based hydrological models. In *Heliyon*, 10. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38348>
- Refsgaard, J. C., Stisen, S., & Koch, J. (2022). Hydrological process knowledge in catchment modelling – Lessons and perspectives from 60 years development. *Hydrological Processes*, 36(1). <https://doi.org/10.1002/HYP.14463>
- Rivera, D., Rivas, Y., & Godoy, A. (2015). Uncertainty in a monthly water balance model using the generalized likelihood uncertainty estimation methodology. *Journal of Earth System Science*, 124(1), 49–59. <https://doi.org/10.1007/S12040-014-0528-7/METRICS>
- Rodriguez-Flores, E. (2020). Análisis del efecto del cambio de uso de suelo en la escorrentía de cuencas usando el modelo SWAT [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Rodriguez+Flores%2C+comparación+del+rendimiento+de+múltiples+modelos+hidrológicos+%28SWAT%2C+WEAP%2C+VIC%2C+SPHY%2C+WEEP+y+AGWA&btnG=
- Rodríguez-Flores, S., Quevedo-Tiznado, J. A., Muñoz-Robles, C., & Julio-Miranda, P. (2023). Sediment transport estimation from hydrological and autoregressive models. *Agrociencia*, 57(5), 1071–1082. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i5.2433>
- Rojas-Rodríguez, I. S., Coronado-García, M. A., Rossetti-López, S. R., & Beltrán-Morales, F. A. (2020). Pollution by nitrates and phosphates from agricultural activity in the low basin of the Mayo River in the State of Sonora, Mexico. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(2), 247–256. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V38I2.642>

- Ruiz-García, V. H., Asensio-Grima, C., Ramírez-García, A. G., & Monterroso-Rivas, A. I. (2023). The hydrological balance in micro-watersheds is affected by climate change and land use changes. *Applied Sciences*, 13(4), 2503.
- Ruiz-Gibert, J. M., Hallack-Alegría, M., Robles-Morua, A., & Molina-Navarro, E. (2020). Using an integrated hydrological model to estimate the impacts of droughts in a semiarid transboundary river basin: The case study of the Tijuana River Basin. *International Journal of River Basin Management*, 18(4), 445–460. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1597727>
- Sánchez-Gómez, A., Martínez-Pérez, S., Sylvain, L., Sastre-Merlín, A., & Molina-Navarro, E. (2023). Streamflow components and climate change: Lessons learnt and energy implications after hydrological modeling experiences in catchments with a Mediterranean climate. *Energy Reports*, 9, 277–291. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.191>
- Shu, L., Chen, H., Meng, X., Chang, Y., Hu, L., Wang, W., Shu, L., Yu, X., Duffy, C., Yao, Y., & Zheng, D. (2024). A review of integrated surface-subsurface numerical hydrological models. *Science China Earth Sciences*, 67(5), 1459–1479. <https://doi.org/10.1007/S11430-022-1312-7/METRICS>
- Singh, A. (2018). Managing the salinization and drainage problems of irrigated areas through remote sensing and GIS techniques. In *Ecological Indicators*, 89 (pp. 584–589). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.041>
- Singh, V. P. (2018). Hydrologic modeling: Progress and future directions. *Geoscience Letters*, 5. <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2010). Mathematical modeling of watershed hydrology. In *Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th anniversary of the American Society of Civil Engineers* (pp. 345–367). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270))
- Sui, D. Z., & Maggio, R. C. (1999). Integrating GIS with hydrological modeling: Practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, 33–51. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(98\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(98)00052-0)
- Sutradhar, H. (2020). Assessment of drainage morphometry and watersheds prioritization of Siddheswari River Basin, Eastern India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, 627–644. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01108-5>
- Tan, M. L., Gassman, P. W., Yang, X., & Haywood, J. (2019). A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. *Advances in Water Resources*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103662>
- Tezel, A. Ç., Akpınar, A., Bor, A., & Alfredsen, K. T. (2025). Exploring Hydrological Response to Land Use/Land Cover Change Using the SWAT+ Model in the İznik Lake Watershed, Türkiye. *Water* 2025, Vol. 17, Page 1924, 17(13), 1924. <https://doi.org/10.3390/W17131924>
- Moroy-Torres, R., Sánchez, J. N., & Melgar-Quinónez, H. (2018). Experiencias en torno a la falta de acceso al agua en hogares del Estado de Guanajuato, México. *Revista Española de Nutrición Comunitaria*, 24(2). Consultado en

- https://renc.es/imagenes/auxiliar/files/RENC_2018_2_4._R_Monroy._Falta_acceso_agua.pdf
- Torres-Suárez, S. L., Bolaños-González, M. A., Ibáñez-Castillo, L. A., Quevedo-Nolasco, A., Arteaga-Ramírez, R., Rico-Sánchez, A. E., & Vaquera-Huerta, H. (2024). Spatial-temporal surface water availability in the Tulancingo River Basin, Hidalgo, Mexico. *Agrociencia*, 58(4). <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i4.2904>
- Velázquez, Z. J., Troin, M., Potosí, L., Alberto, J., & Zapata, V. (2020). Incertidumbre en la evaluación del impacto del cambio climático en dos cuencas mexicanas / Uncertainty in the evaluation of climate change impacts over two Mexican catchments. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(1), 01–36. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2020-01-01>
- Velázquez-Zapata, J. A., Troin, M., Potosí, L., Alberto, J., & Zapata, V. (2020). Incertidumbre en la evaluación del impacto del cambio climático en dos cuencas mexicanas / Uncertainty in the evaluation of climate change impacts over two Mexican catchments. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(1), 1–36. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-01-01>
- Wada, Y., Bierkens, M. F. P., De Roo, A., Dirmeyer, P. A., Famiglietti, J. S., Hanasaki, N., Konar, M., Liu, J., Schmied, H. M., Oki, T., Pokhrel, Y., Sivapalan, M., Troy, T. J., van Dijk, A. I. J. M., van Emmerik, T., van Huijgevoort, M. H. J., van Lanen, H. A. J., Vörösmarty, C. J., Wanders, N., & Wheeler, H. (2017). Human-water interface in hydrological modelling: Current status and future directions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 4169–4193. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4169-2017>
- Wang, K., Niu, J., Li, T., & Zhou, Y. (2020). Facing water stress in a changing climate: A case study of drought risk analysis under future climate projections in the Xi River Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00086>
- Wang, R., Yuan, Y., Yen, H., Grieneisen, M., Arnold, J., Wang, D., Wang, C., & Zhang, M. (2019). A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns. *Science of the Total Environment*, 669, 512–526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.141>
- Wang, T., Shi, R., Yang, D., Yang, S., & Fang, B. (2022). Future changes in annual runoff and hydro-climatic extremes in the upper Yangtze River Basin. *Journal of Hydrology*, 615. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128738>
- Wang, Y., & Chen, N. (2021). Recent progress in coupled surface–ground water models and their potential in watershed hydro-biogeochemical studies: A review. *Watershed Ecology and the Environment*, 3, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2021.04.001>
- Wedajo, G. K., Muleta, M. K., & Awoke, B. G. (2024). Impacts of combined and separate land cover and climate changes on hydrologic responses of Dhidhessa River basin, Ethiopia. *International Journal of River Basin Management*, 22, 57–70. <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.2101464>

- Zhang, B., Wei, Y., Liu, R., Tian, S., & Wei, K. (2024). Hydrological simulation study in Gansu Province of China based on flash flood analysis. *Water (Switzerland)*, 16. <https://doi.org/10.3390/w16030488>
- Zhang, H., Yang, Q., Shao, J., & Wang, G. (2019). Dynamic streamflow simulation via online gradient-boosted regression tree. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001822](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001822)
- Zhao, J., Zhang, N., Liu, Z., Zhang, Q., & Shang, C. (2024, June). SWAT model applications: From hydrological processes to ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172605>

ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-AMANALCO, MÉXICO.

En el siguiente capítulo se describe el proceso de construcción, parametrización y aplicación del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en el área de estudio.

Se detallan las etapas metodológicas seguidas, las fuentes de información empleadas y los procedimientos utilizados para la simulación hidrológica.

El objetivo es mostrar cómo el modelo permitió representar los procesos del ciclo hidrológico y evaluar la dinámica del recurso hídrico bajo diferentes condiciones ambientales y de uso del suelo en el tiempo.

CAPITULO 4. MODELACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO MEDIANTE EL MODELO SWAT:SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-AMANALCO.

4.1. Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco mediante la implementación del modelo hidrológico SWAT, con el fin de evaluar los efectos del cambio de uso del suelo y del cambio climático en la dinámica de escorrentía y otros procesos hidrológicos. La metodología empleada fue balance hidrológico mediante modelo SWAT, en el periodo 1981 a 2024. Los insumos utilizados por el modelo fueron: relieve del terreno, tipo de suelo y sus propiedades fisicoquímicas, uso de suelo y vegetación; además, valores hidrológicos y climáticos. Los resultados del estudio demostraron que el modelo SWAT fue eficaz para simular el comportamiento hidrológico de la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco distintos escenarios temporales. El balance hídrico identificó una precipitación promedio para el área de estudio de 1188.1 mm anuales, con una desviación estándar de 103.8 mm, por lo que la precipitación observada en el año 2000 (1156.0 mm) mostrando una disminución estadísticamente significativa ($t = -2.82$; $p = 0.0073$), lo mismo para el caso del año 2024 con sus 1013.9 mm anuales, mostrando una diferencia estadísticamente significativa ($t = -13.03$; $p < 0.0001$) evidenciando un fenómeno anormal de precipitación. Finalmente, la producción anual de agua de la subcuenca registró una media anual de 613.8 mm, con una desviación estándar de 70.6 mm, un error estándar de 10.6 mm. identificando que el año 2000 con 545.2, ($t = -6.47$; $p < 0.0001$) y 2024 registró 577.8 mm ($t = -3.4$; $p \approx 0.0015$) ambas presentan una diferencia estadísticamente significativa indicando un rendimiento inferior al promedio anual, aclarando que el año menos productivo en términos de agua fue el año 2000.

4.2. Palabras clave

Modelación hidrológica, Soil and water assessment tool, microcuenca, cambio climático y cobertura forestal

4.3. Abstrac

This study aimed to analyze the hydrological behavior of the Valle de Bravo–Amanalco sub-basin through the implementation of the SWAT hydrological model, in order to evaluate the effects of land use change and climate change on runoff dynamics and other hydrological processes. The methodology consisted of a hydrological balance assessment using the SWAT model for the period 1981–2024. Model inputs included terrain relief, soil type and physicochemical properties, land use and vegetation cover, as well as hydrological and climatic variables. The results demonstrated that the SWAT model effectively simulated the hydrological behavior of the Valle de Bravo–Amanalco sub-basin under both temporal scenarios. The water balance analysis identified an average annual precipitation of 1188.1 mm for the study area, with a standard deviation of 103.8 mm. The precipitation observed in 2000 (1156.0 mm) showed a statistically significant decrease ($t = -2.82$; $p = 0.0073$). Similarly, 2024 recorded 1013.9 mm, presenting a highly significant difference ($t = -13.03$; $p < 0.0001$), indicating an anomalous low-precipitation event. Finally, the annual water yield of the sub-basin averaged 613.8 mm, with a standard deviation of 70.6 mm and a standard error of 10.6 mm. The years 2000 (545.2 mm; $t = -6.47$; $p < 0.0001$) and 2024 (577.8 mm; $t = -3.4$; $p \approx 0.0015$) showed statistically significant reductions relative to the mean, indicating below-average water production. The year 2000 was identified as the least productive in terms of water yield.

4.4. Key words

Hydrological Modeling/Soil and Water Assessment Tool/Watersheds/Climate Change/Land Use

4.5. Introducción

La subcuenca Valle de Bravo-Amanalco se ubica al suroeste del Estado de México, se integra por los municipios de Valle de Bravo, Amanalco de Becerra, Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Temascaltepec y Zinacantepec, esto de acuerdo con García-Martínez et al. (2024).

El área se considera fundamental en el suministro de agua para el área metropolitana de la megaciudad del Valle de México, cubriendo el 26% de la demanda hídrica de la ciudad (Santos-Téllez et al., 2021). La mayoría de la precipitación de la región es captada en el embalse de la Presa Miguel Aleman, una presa de importancia nacional, sin embargo, existe evidencia que refieren que el cuerpo de agua sufre un proceso de eutrofización que en combinación con los efectos secundarios generados por las sequías (Tromas et al., 2025), disminuyen la disponibilidad de agua para consumo humano (Silva-Rubio & Nieto-DelValle, 2024). En la actualidad la región presenta problemas en con gestión del territorio y usos de suelo que en suma a factores ambientales generan disminución en la calidad de su agua.

Por otra parte, el cambio de uso de suelo que existe en la zona (CONAGUA, 2016), genera afectaciones al recurso agua, debido a la modificación de cobertura vegetal natural generando cambios al ciclo hidrológico (Aboelnour et al., 2020) y disminución de la recarga hídrica, constituyéndose así como una de las principales afectaciones a las subcuencas de manera general (Mekonnen et al., 2023).

En consecuencia, el sistema de abastecimiento de agua Cutzamala, responsable de abastecimiento del 26% de ZMVM presenta una condición de alta vulnerabilidad frente al cambio climático, así lo informan los autores Escolero et al., (2016). De no implementar medidas de adaptación ante dicho escenario la suficiencia alimentaria estará en riesgo (Poliopro et al., 2012).

Resulta necesario realizar la gestión sustentable de los recursos hídricos de la subcuenca, una herramienta fundamental para ello son los modelos hidrológicos los cuales han sido utilizados a nivel global en el ámbito científico y para toma de decisiones en la planificación del agua (Jodar-Abellan et al., 2018).

El objetivo del presente estudio es calibrar y validar el modelo SWAT en la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco, con el fin de simular el comportamiento hidrológico de la subcuenca y aportar información clave para la gestión sustentable del agua.

4.6. Materiales y métodos.

4.6.1. Área de estudio

La subcuenca cuenta con una superficie estimada de 61 446.636 hectáreas, integra a los municipios; Valle de Bravo, el de mayor extensión en la subcuenca, posteriormente Amanalco de Becerra y en pequeñas porciones los municipios de Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Temascaltepec y Zinacantepec (Díaz-Valencia, 2020). Geográficamente se ubica entre los paralelos 19° 05' y 19° 20' de latitud norte y los meridianos 99° 53' y 100° 12' de longitud oeste (Figura 2), con altitudes que van desde 1780 m.s.n.m. en la parte baja hasta los 3530 en las regiones más altas de la cuenca.

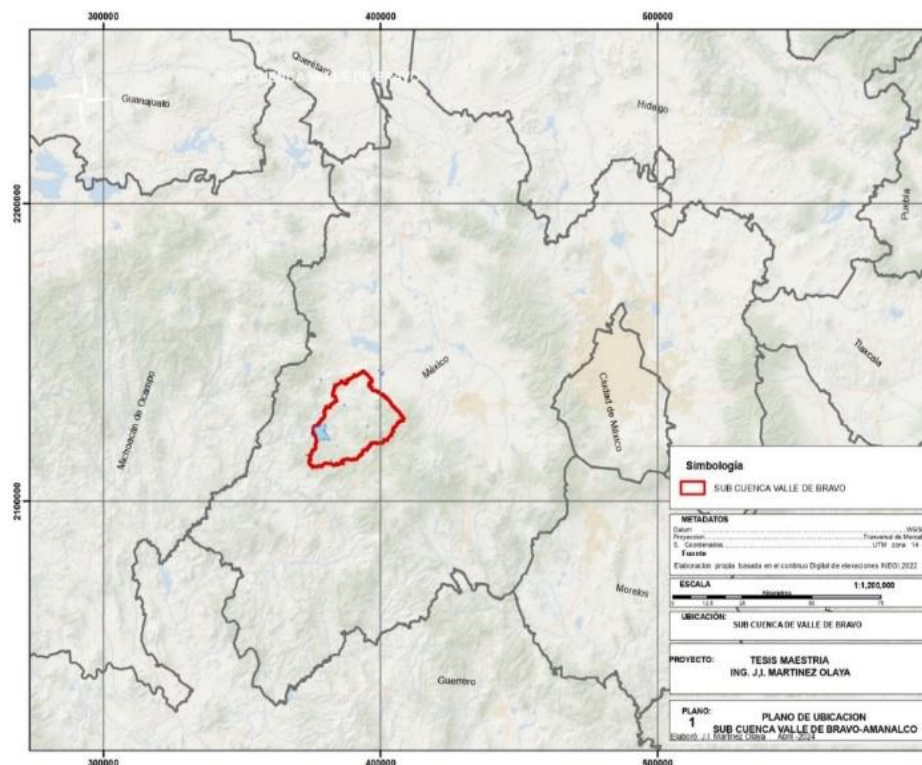


Figura. 2. Ubicación de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco

El clima, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García, es templado subhúmedo con una precipitación media de 1042 mm al año, se cuenta con temperaturas medias que varían de 18 °C en las partes más altas de la cuenca hasta 22 °C en las partes más bajas (Hansen et al., 2022).

4.6.2. Descripción del modelo SWAT

El modelo SWAT es un modelo hidrológico continuo, semidistribuido y físicamente basado, desarrollado por Arnold et al. 1994 para el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) en los años noventa; el cual permite simular procesos hidrológicos como la escorrentía, la infiltración, el transporte de sedimentos, la calidad del agua y los flujos subterráneos.

4.6.4. Datos de entrada.

Topografía. La representación topográfica de la cuenca se realizó a partir del Continuo de elevaciones mexicano (CEM) de 15 metros de resolución, proporcionado por el Instituto Nacional de Geografía y estadística (INEGI) elaborado en 2013. Previo a su utilización, el insumo fue empleado como un archivo ráster, para ser corregido con la herramienta “Rellenar no data” del programa QGIS 3.34.9; la cual en términos sencillos, rellena vacíos en la superficie y elimina imperfecciones mediante interpolación desde los bordes (Olivo-Escudero, J. C. , & Perez-Indoval, R. 2025).

Posterior al preprocesamiento, el producto fue empleado como insumo principal en la delimitación de la cuenca hidrográfica y la determinación de la red fluvial, esto debido a que el modelo SWAT requiere dicha información para predecir la extensión de la subcuenca (Hussain et al.,2024). De acuerdo con Peña-Corona et al.(2014) la subcuenca de trabajo presenta distintos tipos de relieve, planicies en la zona baja; así como lomas y sierras en la parte media y alta de la misma.

Cobertura del suelo y vegetación. Este insumo consistió en 2 capas de información ráster (Escenario 2000 y 2024);las cuales fueron generadas a partir de una reclasificación no supervisada de imágenes de satélite. Para el escenario del año 2000, se adquirió una imagen del satélite Landsat 7, de fecha 24 de enero del 2000 mediante el programa Google Earth Engine (GEE), de la cual se descargaron las bandas de la 1,2,3,4, 5 y 7 (con resolución de 30 m x 30 m) así como la banda pancromática (banda 8), de 15 m de resolución.

Posteriormente, la imagen fue reclasificada tomando como referencias la metodología de Rullan-Silva et al., (2011) y Flores-Cesareo et al., (2020) con modificaciones, cambiando el algoritmo Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques (ISODA) por el algoritmo de Random Forests (RF) en RStudio; posteriormente el producto fue empleado en la generación de las firmas espectrales para los usos del suelo y vegetación.

Para el escenario año 2024, se emplearon de igual manera las metodologías antes mencionadas, con la modificación particular para el caso, empleando imágenes del satélite Landsat 9 y la imagen correspondiente a la fecha 18 de noviembre 2024. Finalmente, las clases de uso de suelo y vegetación identificadas en ambos escenarios fueron adaptadas al esquema de categorías del modelo SWAT para su integración, la totalidad de los uso de suelo se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro. 1. Tipos de uso de suelo y vegetación en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, México.

Id	Clase	Descripción del uso de suelo	Clases de referencia basado en Uso de suelo de vegetación, INEGI Serie VII	Clave SWAT
1	Agri_T	Agricultura de temporal	TA y TAP	AGRL
2	Agri_R	Agricultura de riego	RA	AGRL
3	Bos_Oy	Bosque de Abies (Oyamel)	BA	FRST
4	Bos_P	Bosque de pino	BP, VSA/BP y VSa/BP	PINE
5	Bos_PQ	Bosque pino y encino	BPQ, BQP, VSA/BPQ y VSa/BPQ	FRST
6	Bos_Q	Bosque de encino	BQ y VSa/BQ	OAK
7	H2O	Agua	H2O	WATR
8	A_Hum	Zona urbana (de alta densidad)	AH (asentamientos humano)	URML
9	Past	Pastizal	PI (Pastizal cultivado) y PC (Pastizal inducido)	PAST
10	Sel_Bc	Selva baja caducifolia	VSa/SBC	FRSD

La clasificación del uso de suelo y su equivalencia a la nomenclatura del Modelo SWAT fueron retomados de los autores: Rivera-Toral (2010), García-Cuevas (2012), Jaimes-Rodriguez (2016) y Cruz-Arévalo, et al., (2021)

Suelos. En cuanto a la información edáfica, se empleó el método desarrollado por Bueno-Hurtado et al., (2013) con una modificación del insumo de abastecimiento, usando ahora el Conjunto Nacional de Información Edafológica, escala 1:250, Serie III, correspondiente al período 2013-2020. De los cuales se extrajo la información geográfica y variables específicas de suelo (Cuadro 2).

Cuadro. 2. Principales tipos de suelos dentro de la subcuenca. Base referencial mundial del recurso suelo

Id	Nombre del Suelo dominante	Nombre clave SWAT	Grupo hídrico	Textura	Superficie en Ha	% de superficie subcuenca
1	Acrisol	AL-7003	B	LOAM	2136.04	3.5%
2	Andosol	AN-7005	C	SANDY_CLAY_LOAM	48681.86	79.3%
3	Cambisol	CM-7017	C	CLAY_LOAM	2152.54	3.5%
4	Luvisol	LV-7027	C	CLAY	2198.08	3.6%
5	Leptosol	LP-7032	B	SANDY_LOAM	3458.21	5.6%
6	Tecnosol	TC-7033	B	SANDY_LOAM	1726.2	2.8%
7	Umbrisol	UM-7042	C	SILTY_CLAY_LOAM	1014.98	1.7%
Total					61367.91	100%

Clima. La información requerida para el abastecimiento del Modelo SWAT del periodo de calibración y validación (1980 a 2024) fue obtenida del Sistema meteorológico nacional, para ello se identificaron 5 estaciones meteorológicas dentro del área de estudio con características deseables de las cuales se obtuvieron los datos diarios de precipitación, y temperaturas máximas y mínimas (Cuadro 3).

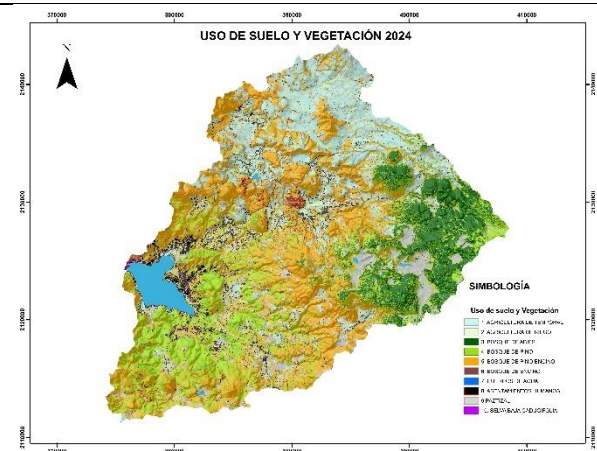
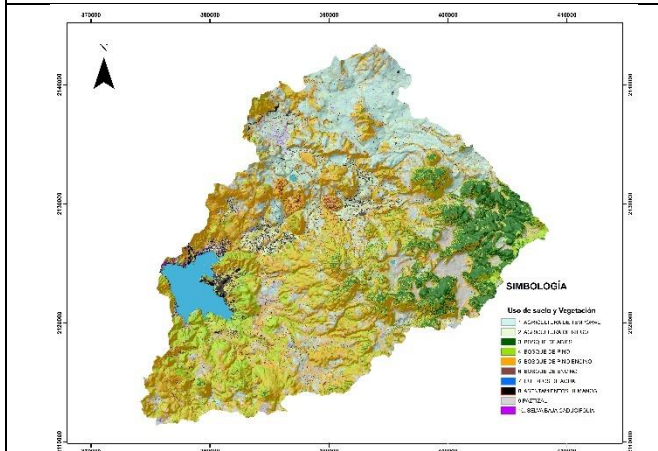
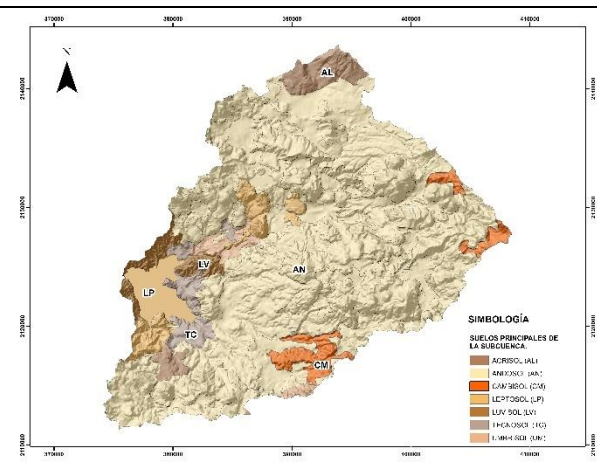
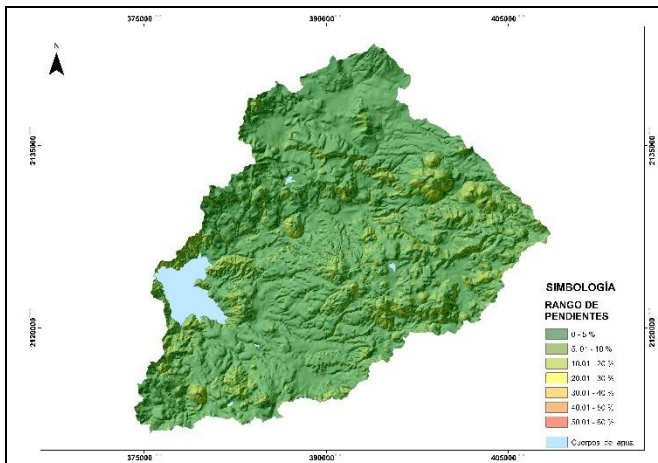
Cuadro 3. Estaciones meteorológicas empleadas en el estudio

id	Nombre de Estación	Municipio	Situación	Numero Estación	Latitud	Longitud	M.S.N.M.
1	Presa valle de bravo	Valle de bravo	operando	15130	19.2333333	-100.133333	1942
2	Presa colorines CFE	Valle de bravo	operando	15046	19.1763889	-100.216389	1645
3	El fresno	Valle de bravo	operando	15368	19.1461111	-100.062778	2160
4	Agua bendita	Amanalco	operando	15374	19.2672222	-99.9502778	2817
5	Presa chilesdo	Villa de allende	operando	15140	19.3475	-100.151944	2365

Los datos obtenidos se ordenaron y clasificaron y a continuación se procesaron a fin de subsanar valores faltantes, errores de información, para dicho cometido se utilizó el Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico (LARS-WG) esto debido la capacidad del programa para simular datos faltantes de temperatura y

precipitación en series de tiempo esto de acuerdo con Camargo-Bravo & García-Cueto (2012).

Debido a la falta de información relacionada a la velocidad del viento y radiación solar, los datos empleados se obtuvieron de la página oficial de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio - Predicción de Recursos Energéticos Mundiales (*NASA-POWER*) en la página: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>; en donde es posible hallar información sobre valores solares y meteorológicos a partir de observaciones y modelos satelitales, dicha información y método ya ha sido empleado por otros autores para acopiar datos de radiación solar y velocidad del viento ante la falta de información (Du et al., 2025; Morsy et al., 2024; Zapata et al., 2025). Las representaciones cartográficas de los insumos antes descritos se presentan a continuación Figura. 4, Figura. 5, Figura. 6 y Figura. 7.



4.6.5. Estimación de Balance hidrológico.

Para la elaboración del balance hidrológico se emplearon los resultado generados por el Modelo SWAT correspondientes al balance hídrico anual de la cuenca enlistado en las salidas de este como “basin_wb_yr”. Y teniendo como premisa central la ecuación conceptual del modelo (Figura 8), en la cual el almacenamiento de agua en el suelo resulta de la diferencia entre las entradas y salidas del sistema misma que se representa en la siguiente imagen:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Figura. 8. Ecuación del balance hídrico

En donde; R_{day} corresponde a la precipitación. Q_{surf} será el escurrimiento superficial, E_a es la evapotranspiración, W_{seep} es el agua que se percola y Q_{gw} será el flujo de retorno. Las variables se expresan en mm de H_2O para el día, i , y el tiempo, t , en días (Neitsch et al., 2011).

4.6.6. Análisis estadístico.

Como parte del análisis estadístico, se estudió la variable producción de agua anual, a fin de analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco, dicha variables también fue obtenida como resultados del modelo hidrológico SWAT. La variable producción de agua anual ha sido estudiada por autores como Torres-Benites et al.,(2004), quienes la utilizan en un análisis del comportamiento del modelo SWAT en la cuenca “El Tejocote” se localiza en el estado de México.

Se analizó la serie de datos de producción de agua anual desde el año 1980 hasta el 2024, obteniendo el valor medio de la producción anual. Siguiendo el orden de ideas, se plantea como hipótesis nula que el valor observado de producción de agua anual no difiere significativamente de la media general de los valores observados en el periodo de estudio. Para verificar las hipótesis se llevó a cabo una comparación de medias (prueba de t) para comprobar si los años estudiados presentan comportamientos atípicos con relación a la media general.

4.7. Resultados y discusión

4.7.1. Delimitación de la subcuenca

Como resultado del análisis espacial, el área de la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco (Figura 9), fue de aproximadamente 61,367.9 hectáreas en el escenario 2000 y 61,366.7 hectáreas en el escenario 2024. Para el análisis hidrológico, la subcuenca fue dividida en 12,576 Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) en el escenario del año 2000 y en 12,968 URH para el escenario del año 2024.

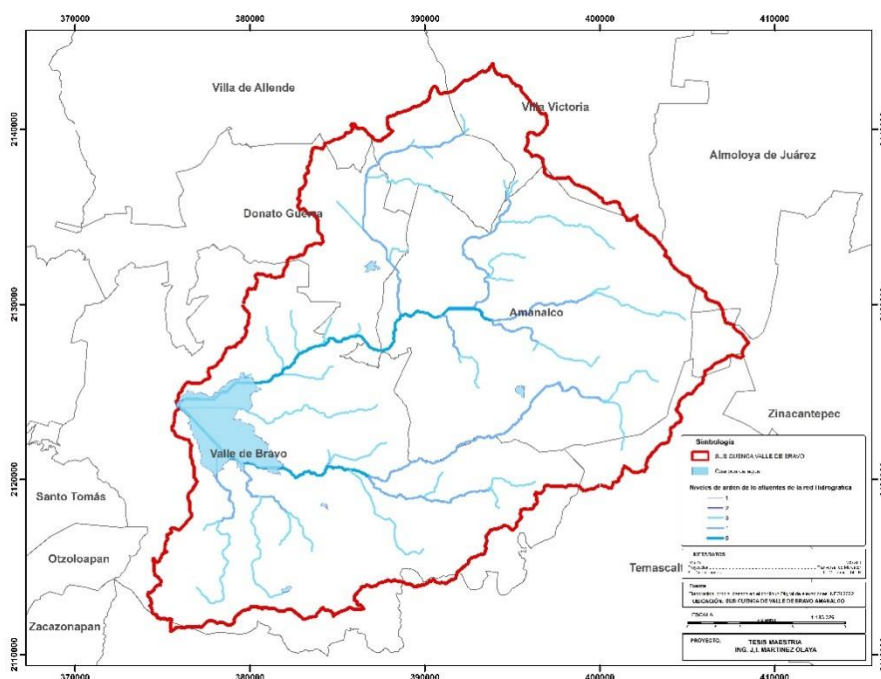


Figura. 9. Delimitación de la subcuenca de estudio.

De acuerdo con Kotyra (2022), la delimitación de cuencas hidrográficas constituye una de las tareas fundamentales en los estudios hidrológicos. En este estudio, la delimitación de la subcuenca fue determinada a partir de las características morfológicas del relieve de la región. En particular, el punto de desfogue de la subcuenca se localizó en las coordenadas 19°12'27.30"N y 100°10'59.57"O, correspondiente al sitio hacia el cual drenan de forma natural las aguas superficiales (Chou et al., 2004).

Según la clasificación hidrológica propuesta por Aguirre (2007), la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco clasifica como una cuenca exorreica, dado que se integra al sistema hidrológico del río Cutzamala; el cual desemboca posteriormente en el río Balsas y finalmente, en el océano Pacífico. Respecto a la variación en el número de HRU se identificó un incremento de 392 HRU en el escenario del año 2024 en contraste con el año 2000, dicha variación se debe a la heterogeneidad de las condiciones abióticas en la zona de estudio, aunque el principal factor asociado fue el cambio en los usos del suelo ocurrido entre ambos periodos de análisis.

Las diferencias observadas en los patrones de uso del suelo entre los escenarios de 2000 y 2024 reflejan un proceso de fragmentación del hábitat en la región, fenómeno, documentado por Díaz-Valencia (2020) en el municipio de Valle de Bravo y por Camacho-Sanabria et al. (2015) en el municipio de Amanalco de Becerra.

4.7.2. Comparación de los usos de suelo y vegetación: Escenario año 2000 y año 2024

De acuerdo con la clasificación de los usos de suelos realizados se observaron cambios en la cobertura de vegetación forestal y asentamientos humanos. En el Cuadro 4 se plantea la comparación entre los escenarios de estudio.

Cuadro. 4. Comparación uso de suelo y vegetación Escenario 2000/Escenario 2024

Uso de suelo y vegetación	Código SWAT	Superficie (Ha) ocupada año 2000	% de la subcuenca año 2000	Superficie (Ha) ocupada año 2024	% de la subcuenca año 2024	Comparación 2000 y 2024.	% de la subcuenca
Agricultura	AGRL	11,581.8	18.9%	10,525.51	17.2%	-1056.3	-1.7%
Bosque Mixto	FRSD	277.6	0.5%	188.87	0.3%	-88.7	-0.1%
Bosque Caducifolio	FRST	19,895.7	32.4%	19,880.70	32.4%	-15.0	-0.02%
Bosque de Quercus	OAK	831.6	1.4%	1,045.26	1.7%	213.7	0.3%
Pastizal	PAST	7,936.1	12.9%	6,388.27	10.4%	-1547.9	-2.5%
Bosque de Pino	PINE	17,643.0	28.7%	19,537.68	31.8%	1894.7	3.1%
Asentamiento humanos	URML	1,217.8	2.0%	2,165.57	3.5%	947.8	1.5%
Cuerpos de Agua	WETW	1,984.4	3.2%	1,634.89	2.7%	-349.5	-0.6%
Totales		61,367.91	100%	61,366.75	100%		
Nota: Los numero positivos denotan ganancias y los negativos perdidas.							

El análisis comparativo del uso del suelo y la cobertura vegetal en la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco correspondiente a los años 2000 y 2024, revela cambios significativos en la distribución espacial de las unidades de cobertura, asociados principalmente al avance de la frontera urbana, a procesos de conversión de ecosistemas naturales y a transformaciones en las prácticas agropecuarias.

En el año 2000, la subcuenca contaba con una superficie total de 61,367.91 hectáreas; mientras que, en 2024 se proyecta una cobertura de 61,366.75 hectáreas, mostrando diferencia de 1.2 ha, la cual se atribuye a la variación del modelo utilizado.

Sin embargo, al analizar la variación interna entre las clases de cobertura, se observan dinámicas particulares. Primero, el uso de suelo que ha presentado la mayor pérdida de cobertura es el pastizal, con una reducción de 1,547.9 hectáreas (−2.5%), seguido de la agricultura, que pierde 1,056.3 hectáreas (−1.7%). Las reducciones están asociadas a procesos de abandono o transformación del uso del suelo, ya sea por expansión forestal, regeneración secundaria o urbanización.

Por el contrario, los asentamientos humanos muestran un incremento notable de 947.8 hectáreas (+1.5%), mientras que el bosque de pino presenta la mayor ganancia neta, con 1,894.7 hectáreas adicionales (+3.1%). Esto es un reflejo de la tendencia a la expansión urbana y al crecimiento de áreas forestales específicas, posiblemente como resultado de procesos de reforestación o sucesión ecológica.

En complemento, Pons et al. (2018) señalan que la mayor parte de los cambios en la cobertura del suelo corresponden a transiciones hacia categorías asociadas con asentamientos humanos y zonas urbanas, destaca también que los bosques templados y la selva baja caducifolia están experimentando procesos de conversión hacia vegetación secundaria, pastizales inducidos y áreas agrícolas.

Un punto interesante por aclarar es que la superficie ocupada por cuerpos de agua también registra pérdidas, 349.5 hectáreas (−0.6), lo cual evidencia una disminución en la cantidad de espejos de agua para acceso de la región.

Esto evidencia una transformación del paisaje marcada por la presión antrópica, la dinámica de cambio de uso de suelo y la fragmentación de hábitats naturales. Las tendencias observadas reflejan tanto la expansión urbana como el desplazamiento de sistemas productivos tradicionales, acompañados de procesos fragmentación ecológica y cambios en la cobertura forestal.

4.7.3. Precipitación y temperatura de la subcuenca.

La cantidad de agua que precipita en la región es clave para comprender el comportamiento del ciclo hidrológico. Se realizó una comparación entre los años 2000 y 2024 (Figura 10) para analizar la cantidad de agua precipitada y la temperatura promedio registrada en la subcuenca . A continuación se muestra la representación graficas de los valores observados que permiten evidenciar cómo estas variables climáticas están estrechamente relacionadas con la dinámica hídrica del territorio.

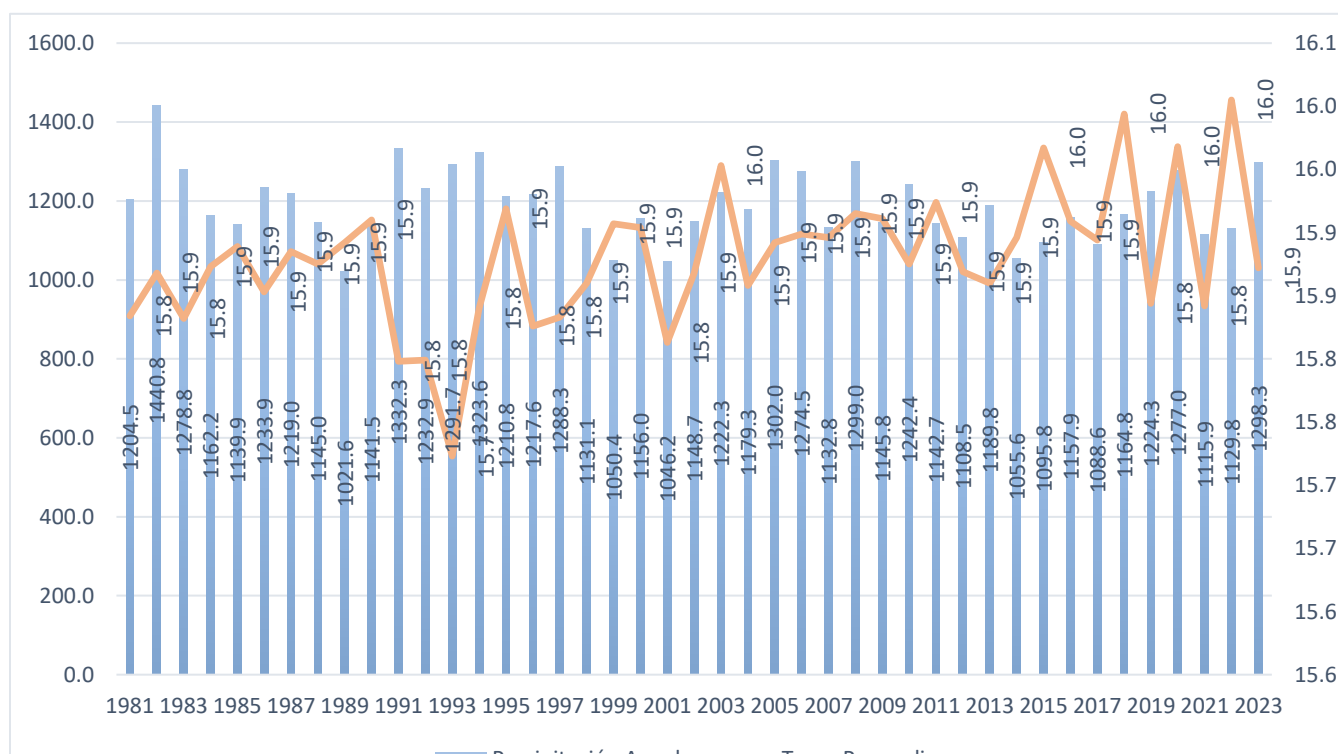


Figura. 10. Precipitación y temperatura promedio de la subcuenca en el tiempo

Al observar las mediciones reportadas en la subcuenca, se aprecia una tendencia creciente en la temperatura promedio en la región, mientras que la cantidad de agua que precipita en la subcuenca fenómenos cada vez variables y aleatorios..

A fin de comprobar dicha afirmación se realizó un análisis estadístico, primero se comprobó que los datos de precipitación y temperatura promedio cumplen con la normalidad, por lo que procedió a realizar pruebas paramétricas.

De acuerdo con los datos analizados se estimó que la precipitación promedio histórica de la región es de 1188.12 mm, con una desviación estándar de 103.8 mm, posteriormente, se aplicó la “Prueba t” a los datos de los años a comparar obteniendo los siguientes resultados: En 1981 con una precipitación total anual de 1204.5 mm presentó un valor crítico de $t \pm 2.02$ y un valor de t calculada de -1.3 y $p_{valor} = < 0.2$ y con un $\alpha = 0.05$, indicando que el valor observado para dicho año no cuenta con evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula, interpretándose así que en 1982 la precipitación no difiere significativamente de la media histórica.

El año 2000, conto con una precipitación total anual de 1156.0 mm, con un valor $t = -2.82$ y $p_{valor} = 0.0073$, indicando una diferencia significativamente menor respecto a la media observada durante el periodo de análisis. Respecto al año 2024, se contó con un total 1013.9 mm anuales, presentando un valor $t = -13.03$ y $p_{valor} < 0.0001$, lo cual constituye una diferencia altamente significativa, reflejando una anomalía extrema en términos de baja precipitación.

Estos resultados permiten afirmar que los años 2000 y 2024, se desvían significativamente del patrón histórico, lo cual puede estar asociado a fenómenos climáticos regionales o globales que impactan la distribución anual de las precipitaciones.

4.7.4. Balance hídrico de la subcuenca: Periodo 1980-2024

A continuación, se presenta el balance hídrico del área de estudio (Cuadro 5). El análisis muestra los resultados del Modelo SWAT, desglosando cada uno de los flujos de agua que integran el balance hídrico para una mejor comprensión. .

Cuadro. 5. Balance hídrico de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.

Año	R_{day} (Precipitación)	Q_{surf} (E scorrimiento superficial	E_a (Evapotrans piración)	W_{seep} (Percolación desde el perfil del suelo)	Producción de agua anual (SWt)
1981	1204.5	601.0	466.6	99.0	612.7
1982	1440.8	793.4	507.6	133.7	809.2
1983	1278.8	661.6	505.8	128.1	677.4
1984	1162.2	568.1	481.2	107.7	581.0
1985	1139.9	537.6	493.2	113.5	551.7
1986	1233.9	627.5	517.0	120.7	642.8
1987	1219.0	598.1	493.1	116.4	612.4
1988	1145.0	560.7	479.8	104.5	573.1
1989	1021.6	458.9	470.5	101.9	471.2
1990	1141.5	560.3	473.0	107.3	573.1
1991	1332.3	703.9	492.1	120.8	717.9
1992	1232.9	613.3	514.0	121.8	628.2
1993	1291.7	653.2	510.7	130.0	669.0
1994	1323.6	693.3	502.4	125.2	708.3
1995	1210.8	585.7	501.1	115.5	599.4
1996	1217.6	614.0	494.3	116.0	628.4
1997	1288.3	662.6	514.1	129.3	677.9
1998	1131.1	513.4	503.3	113.6	528.1
1999	1050.4	466.1	486.8	102.4	479.2
2000	1156.0	531.8	481.0	113.6	545.2
2001	1046.2	454.6	446.2	86.6	465.0
2002	1148.7	561.0	470.0	120.8	575.9
2003	1222.3	649.7	454.1	110.7	662.9
2004	1179.3	582.7	466.3	113.6	597.1
2005	1302.0	710.1	486.2	126.4	726.2
2006	1274.5	646.2	474.6	125.6	661.6
2007	1132.8	602.4	466.4	110.8	616.4
2008	1299.0	676.7	472.2	125.4	691.8
2009	1145.8	568.3	457.6	118.9	582.6
2010	1242.4	655.7	460.3	113.7	669.3
2011	1142.7	575.7	472.2	119.3	590.4

Año	R_{day} (Precipitación)	Q_{surf} (Escorrentamiento superficial)	E_a (Evapotrans piración)	W_{seep} (Percolación desde el perfil del suelo)	Producción de agua anual (SWt)
2012	1108.5	561.8	435.1	99.3	573.2
2013	1189.8	595.5	460.6	120.2	610.3
2014	1055.6	482.6	454.5	109.1	495.7
2015	1095.8	525.4	465.7	113.7	539.1
2016	1157.9	583.0	465.8	108.3	596.1
2017	1088.6	575.5	441.7	101.4	587.9
2018	1164.8	585.8	465.1	106.9	599.0
2019	1224.3	643.3	450.9	112.0	656.1
2020	1277.0	706.1	473.1	118.4	720.8
2021	1115.9	563.8	446.2	103.5	576.3
2022	1129.8	571.3	458.5	98.2	583.2
2023	1298.3	703.2	478.9	121.1	718.2
2024	1013.9	567.6	356.2	85.7	577.8

El comportamiento hidrológico de la subcuenca, presenta una variabilidad a lo largo del periodo de análisis. El año con la mayor precipitación fue observado en 1982 con un total de 1440.8 mm anuales mientras que el año más seco fue observado el año 2024 con un total de 1013.9 mm anuales. Revisando los valores observados se aprecia que los años 1982, 1991, 2005 y 2020 así como 2023 son años con una alta cantidad de humedad anual. Mientras que los años 1989, 1999, 2014 así como el 2024 fueron años secos.

Con relación a escurrimiento superficial (Q_{surf}) este mantiene una relación directa con respecto de la precipitación anual, lo que indica que el sistema de la subcuenca responde de manera rápida a los eventos de lluvias de la zona. Los valores máximo concuerdan con los valores de la precipitación.

Al respecto de la evapotranspiración (E_a) esta muestra un comportamiento que varía entre 470 y 515 mm anuales, el año con el valor mínimo de este flujo fue registrado en 2024 con total de 356.2 mm anuales. La percolación profunda (W

seep) presenta valores que oscilan entre los 100 y 130 mm anuales, sin mostrar una tendencia de aumento o disminución sostenida en el tiempo. Sin embargo también este flujo está ligado con el valor de precipitación, siendo el valor mínimo el observado el 2024 con un total de 85.7 mm anuales.

Finalmente la producción anual de agua (*SWt*) mantiene un comportamiento relacionado con la precipitación, exceptuando el año 2024, durante este el año más seco del periodo analizado, la producción de agua no presento el valor mínimo de producción de agua de manera histórica.

Al realizar la comparación entre los periodos 1981 al 2000 en contraste con el 2001 al 2024, se observa que el primero de estos presenta una mayor variabilidad en los flujos de agua y con mayor cantidad de años humedad, por el contrario el segundo presenta con mayor frecuencia valores anuales de precipitación por debajo de la media histórica.

4.7.5. Producción de agua anual de la subcuenca en el tiempo (PAAS).

De acuerdo con Torres-Benites et al., (2004) la Producción de agua de una subcuenca (Figura 11) se puede definir como la suma de los escurrimientos superficiales y subsuperficiales menos las pérdidas por transmisión.

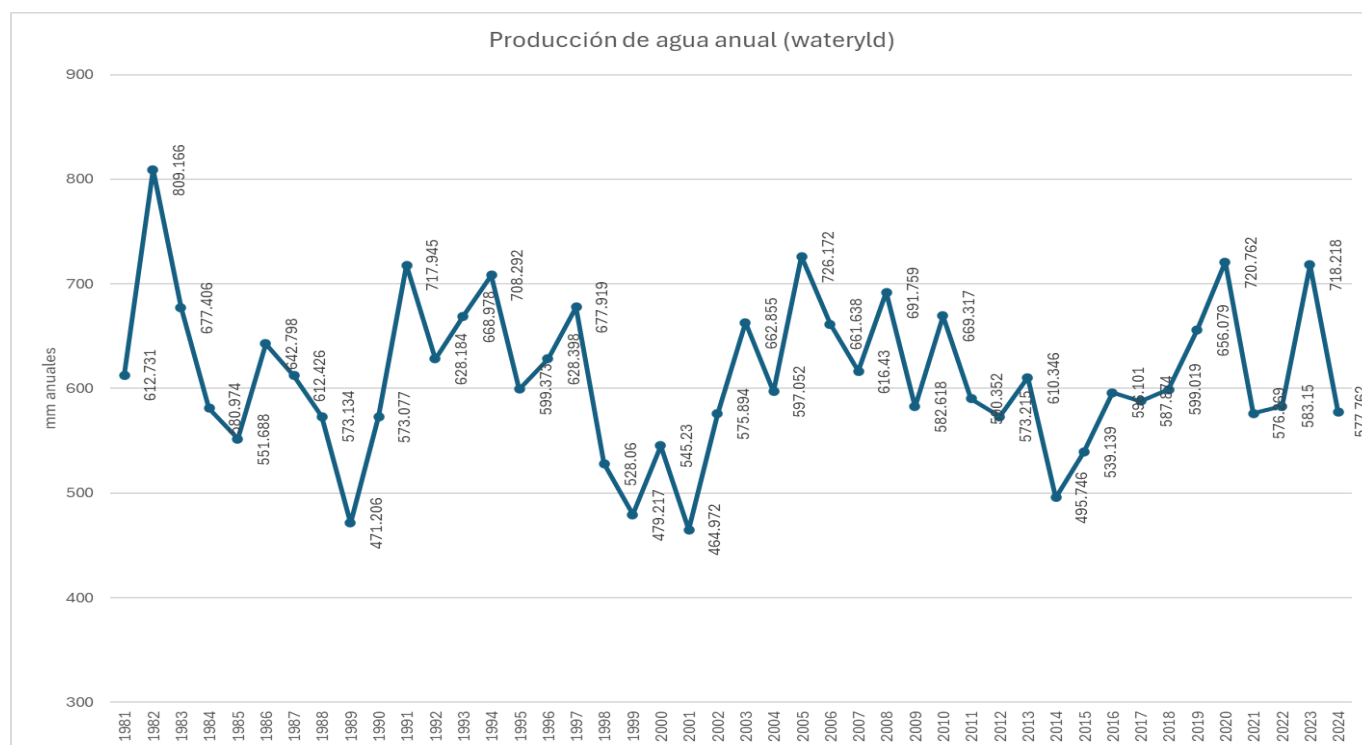


Figura. 11. Producción de agua anual de la subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco

Al analizar la producción de agua anual de la subcuenca se observa que en 1981 existía una producción de 612 mm anual en la cuenca; mientras que, en el año 2000 este fue de 545 mm, para el año 2024 el rendimiento fue de 577mm (Cuadro 6). Por lo que la producción de agua anual es un parámetro que presenta variaciones constantes.

Cuadro. 6. Estadísticas anuales de la producción de agua de la subcuenca.

Año	Valor observado	Valor medio de PAAS (μ)	Desviación estándar (σ)	Error estándar(SE M)	t calculada	p_ Valor	Significancia
1981	612.7	613.9	70.6	10.6	0.11	0.91	No
2000	545.2				-6.47	< 0.0001	Si
2024	577.8				-3.40	0.0015	Si

Sin embargo, al analizar las medias de dichos valores, se identifica que valor promedio de producción de agua anual durante todo el periodo analizado fue de 613.86 mm anuales, con una desviación estándar de 70.6 mm anuales, lo que refleja una variabilidad moderada en los datos. El error estándar de la media de la producción de agua anual se estimó en 10.6 mm de agua anual permitiendo construir un intervalo de confianza del 95% para la media, el cual abarca desde 592.45 hasta 635.27 mm de agua anual.

Por lo que en el caso del año 1981, el valor observado fue de 612.7, lo que resultó en un estadístico t de 0.11 y $p_{valor} = 0.91$, concluyendo que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, y afirmar que el rendimiento de 1981 difiere de la media general.

En contraste, el año 2000 presentó un rendimiento de 545.2, lo cual generó un estadístico t de -6.47 y un $p_{valor} = < 0.0001$, esta diferencia es altamente significativa, permitiendo rechazar la hipótesis nula, lo que indica que el rendimiento de ese año fue estadísticamente significativamente distinto al promedio general.

De manera similar, el año 2024 tuvo un valor de rendimiento de 577.8, con un t de -3.4 y un $p_{valor} = 0.0015$, también menor al nivel de significancia establecido. Por lo tanto, de acuerdo con la prueba de T, se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que el rendimiento de 2024 fue significativamente menor que la media, aunque con una evidencia estadística menos contundente que en el caso del año 2000. En resumen, a un nivel de confianza del 95%, los resultados permiten afirmar que los

años 2000 y 2024 presentan rendimientos significativamente más bajos que la media general del periodo analizado.

4.7.6. Comparación escenarios año 2000 y 2024.

A continuación se presenta el comportamiento de los flujos de agua de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, contrastando el Escenario 2000 (Figura 12) y Escenario 2024 (Figura 13).

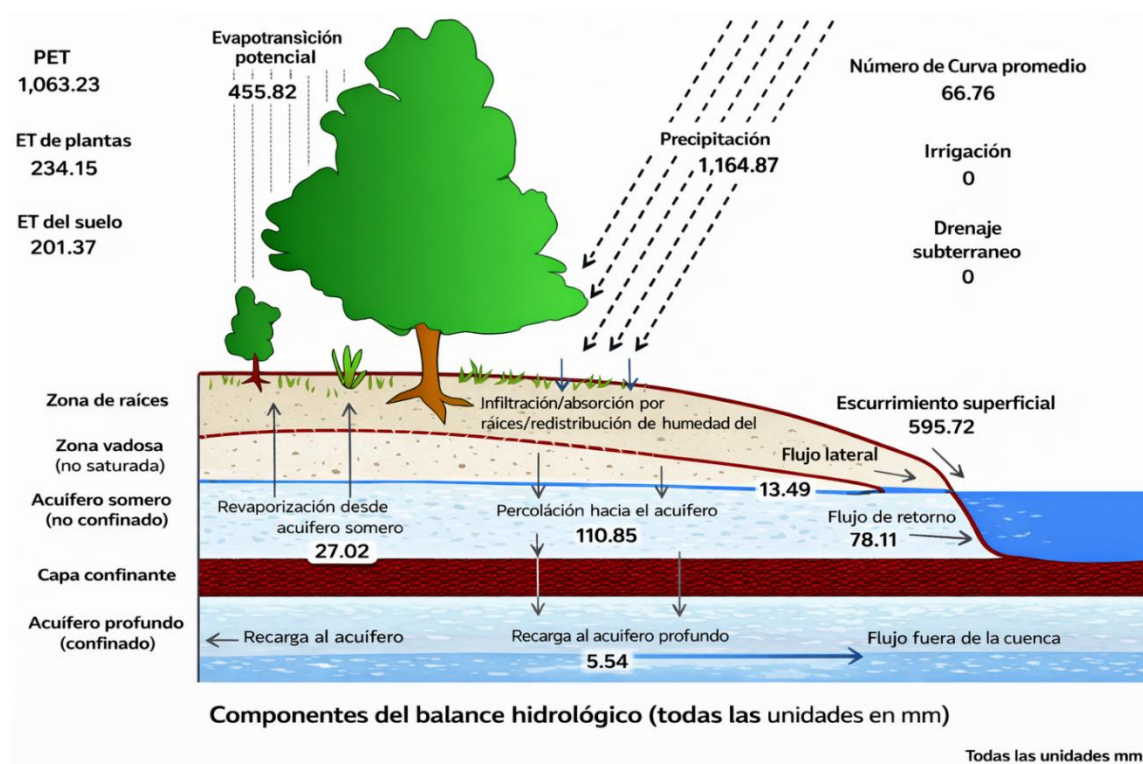


Figura. 12. Salida del Modelo SWAT; Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. Escenario 2000

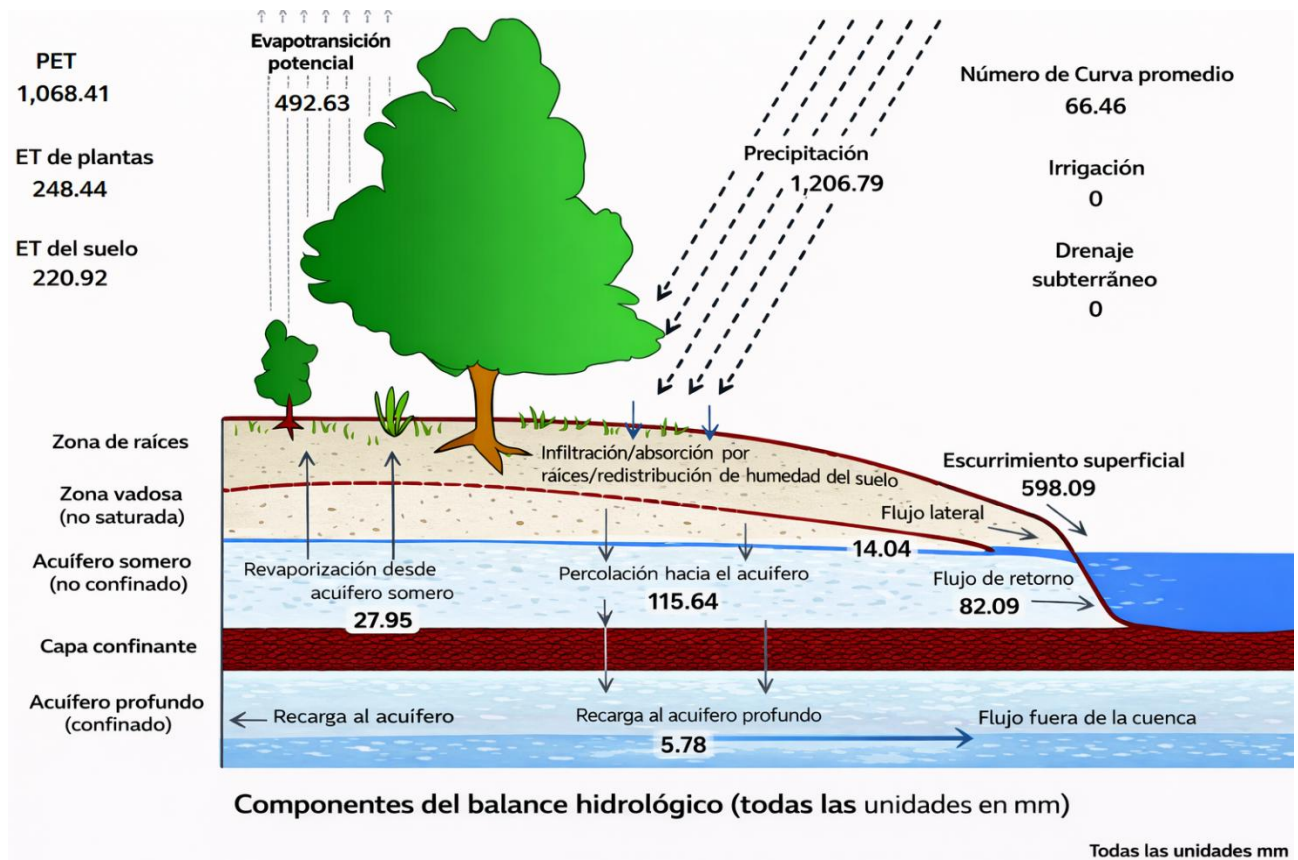


Figura. 13. Salida del modelo SWAT; Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. Escenario 2024

4.7.7. Recarga al acuífero.

Con el fin de evaluar la condición de la recarga al acuífero en el escenario 2000 y 2024, se realizó una prueba de t con respecto de los valores observados durante el periodo de estudio, esto con el fin de diferencias si existe diferencias estadísticamente significativas. La media general del periodo de estudio fue de $119.09 \text{ mm} \pm 11.72 \text{ mm}$.

El valor observado en el escenario 2000 fue de 119.3 mm , el cual no mostro una diferencia significativa respecto de la media general, el valor de t para este caso fue de 0.12 con un $p \text{ valor} = 0.90$. En contraste, el valor de 90 mm observado en el escenario 2024, presento una diferencia estadísticamente significativa con respecto a la media histórica con valor de $t = -16.5$ y un $p \text{ valor} < 0.001$. Indicando una disminución extraordinaria respecto al comportamiento medio de la subcuenca. La

representación graficas del comportamiento antes descrito se presenta en la siguiente figura 14.

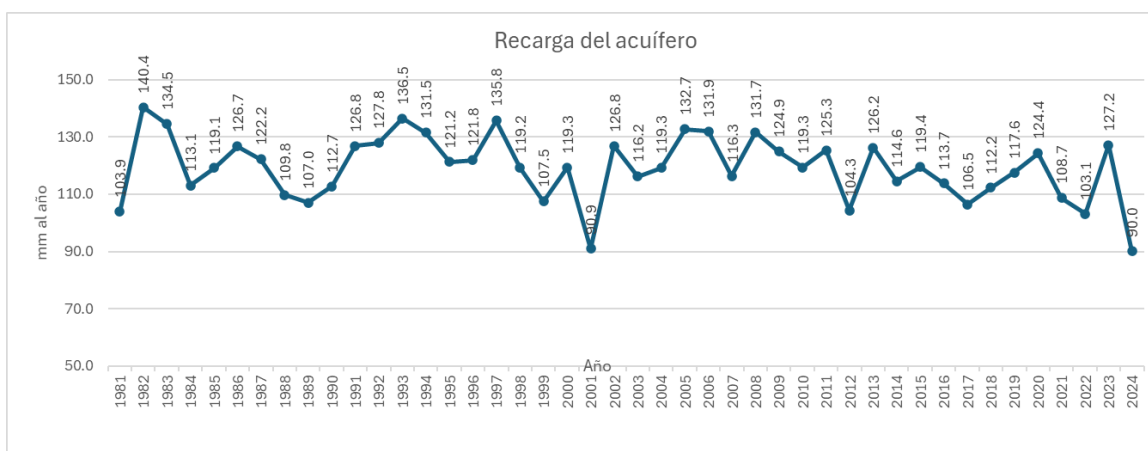


Figura. 14. Recarga al acuífero en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco: Periodo 1980 al 2024.

4.8. Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo SWAT permitieron analizar el comportamiento de los flujos hidrológicos de la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco, bajo distintos condiciones de temperatura y precipitación.

Adicionalmente, el estudio de la cobertura de uso de suelo y vegetación evidencio la transformación del paisaje causado por el cambio de uso de suelo, incremento en las áreas de asentamientos humanos y el establecimiento de plantaciones en áreas distintas a las naturales.

En cuanto a los valores observados de precipitación, se observa que escenario del año 2000 y 2024, mostraron precipitaciones que se apartan significativamente del comportamiento histórico de la subcuenca, dichos comportamientos son asociados a fenómenos climáticos globales o regionales, los cuales modifican la distribución y magnitud de la precipitación. La media anual del periodo de estudio fue de 1188.1 mm.

Los años 1982, 1991, 2005 y 2020 así como 2023 fueron años con una alta cantidad de humedad anual, por su parte el 1989, 1999, 2014 y 2024 fueron años significativamente más secos. las observaciones demuestran que a partir del año 2000 los valores de precipitación menores 1150 mm anuales son más constantes. Respecto a la producción anual de agua, la subcuenca presento una disminución significativa en los años 2000 y 2024 respecto al promedio histórico, reflejo del impacto acumulado de los cambios en el uso del suelo y las condiciones climáticas. Finalmente, la recarga al acuífero en el escenario 2000 no presento diferencias significativas, contrario a lo observado en el 2024 el cual mostro una disminución estadísticamente significativa respecto a la media histórica generando en consecuencia una reducción extraordinaria en la recarga de los recursos hídricos de la subcuenca.

.

4.9. Referencias

- Aboelnour, M., Gitau, M. W., & Engel, B. A. (2020). A comparison of streamflow and baseflow responses to land-use change and the variation in climate parameters using SWAT. *Water*, 12(1), Article 191. <https://doi.org/10.3390/w12010191>
- Aguirre, N. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas. Universidad Nacional de Loja.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Borah, D. K., & Bera, M. (2004). Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications. *Transactions of the ASAE*, 47(3), 789–803.
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan-Pérez, J. I., & Pineda-Jaimes, N. B. (2015). Modelado de cambios de cobertura y uso del suelo: Escenarios prospectivos en el Estado de México. Estudio de caso Amanalco de Becerra. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(2), 203–220.
- Camargo-Bravo, A., & García-Cueto, R. O. (2012). Evaluación de dos modelos de reducción de escala en la generación de escenarios de cambio climático en el Valle de Mexicali en México. *Información Tecnológica*, 23(3), 11–20. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000300003>
- Cendejas, J. C., Ramírez, L. M., Zierold, J. R., Valenzuela, J. D., Ibarra, M. M., de Tagle, S. M. S., & Téllez, A. C. (2021, October). Evaluation of the impacts of land use in water quality and the role of nature-based solutions: A citizen science-based study. *Sustainability*, 13(19), Article 10519. <https://doi.org/10.3390/su131910519>
- Chou, T. Y., Lin, W. T., Lin, C. Y., Chou, W. C., & Huang, P. H. (2004). Application of the PROMETHEE technique to determine depression outlet location and flow direction in DEM. *Journal of Hydrology*, 287(1–4), 49–61.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Diagnóstico para el manejo integral de las subcuencas Tuxpan, El Bosque, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Colorines-Chilesdo y Villa Victoria pertenecientes al Sistema Cutzamala*. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/diagnostico-para-el-manejo-integral-de-las-subcuencas...>
- Cruz-Arevalo, B., Gavi-Reyes, F., Martínez-Menez, M., & Juárez-Méndez, J. (2021). Uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(2), 157–206.
- Díaz-Valencia, S. E. (2020). *Modelación de las cargas de carbono en la cuenca hidrológica de la Presa de Valle de Bravo* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/f729a208-de70-45c3-8375-d242a76a2e86/content>

- Díaz-Valencia, S. E. (2020). *Universidad Nacional Autónoma de México: Programa de maestría y doctorado en ingeniería* [Documento académico]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Du, H., Tan, M. L., Chun, K. P., & Zhang, F. (2025). Evaluación de cuatro productos climáticos reticulados para simulaciones de caudal y sequía en la cuenca del río Kelantan, Malasia. *Geocarto International*, 40(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2453615>
- Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S. E., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409–427. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94347938003>
- Olivo-Escudero, J. C., & Perez-Indoval, R. (2025). Regionalización hidrológica de una cuenca en Veracruz, México mediante técnicas multivariadas. *Proyección*, 19(37), 145–164.
- Flores-Cesáreo, J. C., Bustamante-González, A., Vargas-López, S., Cajuste-Bontemps, L., Escobedo, F. J., & Valadez-Ramírez, M. (2020). Cartografía del uso del suelo en la subcuenca Huaquechula, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, (101). <https://doi.org/10.14350/rig.59914>
- García-Martínez, R., Hernández-Soto, F. N., Emeterio-Moreno, J., & Colín-Velázquez, M. K. (2024). Diferencias en la fertilidad del suelo en cuatro plantaciones forestales comerciales de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(85), 150–170. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i85.1462>
- García-Cuevas, L. M. (2012). *Modelación de la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Ahuehuepan en el estado de Guerrero* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/c03a1575-cd1f-49c6-b34e-90154d2571c2/content>
- Hansen, A. M., Díaz-Valencia, S., & Sandoval-Chacón, D. A. (2022). Natural attenuation and its impact on reactive carbon loads to a eutrophic reservoir located in a mountain temperate zone. *Applied Geochemistry*, 146, 105466. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105466>
- Bueno-Hurtado, P., Sanchez-Cohen, I., Esquivel-Arriaga, G., Velazquez-Valle, M. A., & Inzuna-Ibarra, M. A. (2013). Caracterización hidrológica para cuencas en zonas áridas en México. *Agrofaz*, 13(2), [Páginas no especificadas].
- Hussain, S., Niyazi, B., Elfeki, A. M., Masoud, M., Wang, X., & Awais, M. (2024). SWAT-driven exploration of runoff dynamics in Hyper-Arid Region, Saudi Arabia: Implications for hydrological understanding. *Water*, 16(14), 2043.
- Jaimes-Rodríguez, J. (2016). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Yautepec, Morelos, México* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/a74db312-6ae2-4e02-9bea-212e4edb1f3c>
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias*

- Kotyra, B. (2023). High-performance watershed delineation algorithm for GPU using CUDA and OpenMP. *Environmental Modelling & Software*, 160, 105613.
- Martell-Hernández, E., Ramos-Martínez, M., & Peña-Corona, F. (2014). *Turismo como agente de cambio de uso de suelo en la cabecera municipal de Valle de Bravo, Estado de México 1979–2008* [Universidad Autónoma del Estado de México]. <https://files.core.ac.uk/download/pdf/55524492.pdf>
- Martínez-Austria, P., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5–20. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100001
- Mekonnen, Y. A., & Manderso, T. M. (2023). Land use/land cover change impact on streamflow using Arc-SWAT model, in case of Fetam watershed, Abbay Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 13(5), 111.
- Morsy, M., Sayad, T., Abdou, M. I., & Aboelkhair, H. (2024). Estudio comparativo de la evapotranspiración a partir del modelo SWAT y datos de teledetección derivados de MODIS en dos zonas climáticas de Egipto. *Revista de Agua y Cambio Climático*, 15(10), 5219–5241. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.303>
- Pons, V. L., Aragón, I. E. R., Robles, J. S., & Lima, P. T. (2018). Evaluación del servicio ecosistémico de rendimiento hídrico entre los años de 1994 y 2016 en el municipio de Valle de Bravo, Estado de México. *Papeles de Geografía*, (64), 93–113.
- Rivera-Toral, F., Pérez-Nieto, S., Ibáñez-Castillo, L. A., & Hernández-Saucedo, F. R. (2012). Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia*, 46(2), 101–105. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000200001
- Rodríguez-Flores, E. (2020). *Análisis del efecto del cambio de uso de suelo en la escorrentía de cuencas usando el modelo SWAT* [Tesis, Universidad Autónoma de México]. https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Rodriguez+Flores+...
- Rodríguez-Hernández, L. D. (2016). Servicios ambientales hidrológicos proporcionados por los ecosistemas forestales de la cuenca del río Misantla, Veracruz [Tesis, Universidad Veracruzana].
- Silva-Rubio, P. I., & Nieto-Delvalle, C. A. (2024). Sequía por cambio climático como factor de vulneración del derecho humano al agua potable y saneamiento: Una visión desde México. *Brazilian Journal of Development*, 10(10). <https://doi.org/10.34117/bjdv10n10-038>
- Ruiz-Gibert, J. M., Hallack-Alegría, M., Robles-Morua, A., & Molina-Navarro, E. (2020). Using an integrated hydrological model to estimate the impacts of droughts in a semiarid transboundary river basin: The case of study of the Tijuana River Basin. *International Journal of River Basin Management*, 18(4), 445–460. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1597727>

- Rullán-Silva, C. D., Gama-Campillo, L. M., Galindo-Alcántara, A., & Olthoff, A. E. (2011). Clasificación no supervisada de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante imágenes LANDSAT ETM+. *Universidad y Ciencia*, 27(1), 33–41. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792011000100003
- Sánchez-Gómez, A., Martínez-Pérez, S., Sylvain, L., Sastre-Merlín, A., & Molina-Navarro, E. (2023). Streamflow components and climate change: Lessons learnt and energy implications after hydrological modeling experiences in catchments with a Mediterranean climate. *Energy Reports*, 9, 277–291.
- Santos Téllez, R. U., Medina Mendoza, R., & Rodríguez Varela, J. M. (2021). *Vulnerabilidad del Cutzamala*. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2257>
- Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, D. S., Luis Oropeza-Mota, J., & Mejía-Saenz, E. (2004). Calibration of the Hydrologic Model SWAT in the Watershed "El Tejocote", Atlacomulco, State of Mexico. [Manuscrito no publicado].
- Tromas, N., Simon, D. F., Fortin, N., Hernández-Zamora, M., Pereira, A., Mazza, A., Pacheco, S. M., Levesque, M. J., Martínez-Jerónimo, L., Antuna-González, P., Munoz, G., Shapiro, B. J., Sauvé, S., & Martínez-Jerónimo, F. (2025). Metagenomic insights into cyanotoxin dynamics in a Mexican subtropical lake. *Chemosphere*, 376, 144285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144285>
- Zapata, J. J. A., Casila, J. C. C., Kurniawan, T. A., & Haddout, S. (2025). Analyzing historical and potential climate change impacts on monthly streamflow using SWAT+ in the Marikina River Basin, Philippines. In J. C. Casila, A. Khajuria, & S. Memon (Eds.), *Proceedings of The 3rd International Conference on Climate Change and Ocean Renewable Energy (CCORE 2024)*. Springer *Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-93887-0_23

ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-AMANALCO, MÉXICO.

En el capítulo a continuación se presenta la aplicación del método Delphi como herramienta de consulta y consenso entre expertos, orientada a complementar el análisis técnico con la percepción cualitativa a través de la creación de Fichas de Evaluación ecológica de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.

Se describe el diseño del cuestionario, la selección de participantes, las rondas de evaluación y el tratamiento de la información obtenida. Este enfoque permite integrar distintas perspectivas sobre la gestión y el estado del recurso hídrico en la subcuenca, fortaleciendo la interpretación de los resultados del modelo hidrológico y aportando una visión integral al estudio.

CAPÍTULO 5. PERCEPCIÓN DE EXPERTOS MEDIANTE METODO DELPHI

5.1. Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo describir de manera sistemática la percepción de expertos en materia de gestión ambiental sobre el estado actual de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco mediante la implementación de entrevista usando el método Delphi para la creación de la Ficha de Evaluación Ecológica a fin de identificar las problemáticas, causas y consecuencias relacionadas con la escasez de agua en la subcuenca de estudio. La metodología empleada fue la investigación-acción participativa (IAP) mediante la aplicación de un método Delphi, La herramienta utilizada fue encuestas estructuradas basadas en las Ficha de Evaluación Ecológica (FEE) con modificaciones y adaptadas a la valoración de una subcuenca hídrica en México. Los resultados revelan que los participantes comparten una perspectiva generalizada del deterioro ambiental en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, con afectaciones a los cuerpos de agua y ecosistemas, igualmente se identifica un consenso sobre la existencia de una disminución en el volumen de los cuerpos de agua. Las principales amenazas son el cambio de uso de suelo, la deforestación, los incendios forestales y la contaminación de los cuerpos de agua. El análisis estadístico (Prueba de Kendall, W) reveló un consenso general de la percepción negativa del estado ambiental, con niveles de consenso que varían entre alto y moderado. No obstante, se identificaron áreas de disenso en aspectos vinculados a las tendencias futuras y estrategias de manejo forestal. En conclusión, el estudio permitió evidenciar la percepción de expertos sobre el deterioro ambiental de la subcuenca, atribuida principalmente a una mala gestión institucional y a presiones antrópicas como la deforestación, el cambio de uso de suelo y la contaminación. Se reconoce la urgencia de una gestión integral y articulada que recupere la funcionalidad ecológica del territorio y fortalezca la gobernanza ambiental.

5.2. Palabras clave;

Google forms/Encuesta/Fichas de evaluación ecológica/agua/ Subcuenca/Valle de Bravo/Amanalco

5.3. Abstract

The present study aimed to systematically describe expert perceptions in environmental management regarding the current condition of the Valle de Bravo–Amanalco Sub-basin through the implementation of interviews using the Delphi Method for the development of the Ecological Evaluation Sheet (FEE), in order to identify the problems, causes, and consequences associated with water scarcity in the study area. The methodology employed was participatory action research (PAR), applying a Delphi method. The tool used consisted of structured surveys based on the Ecological Evaluation Sheet (FEE), modified and adapted to the assessment of a hydrological sub-basin in Mexico. The results reveal that participants share a generalized perspective of environmental degradation in the Valle de Bravo–Amanalco sub-basin, with impacts on water bodies and ecosystems. A consensus was also identified regarding the decrease in water volume in streams and reservoirs. The main threats include land-use change, deforestation, forest fires, and water pollution. The statistical analysis (Kendall's W test) showed an overall consensus regarding the negative perception of environmental conditions, with consensus levels ranging from high to moderate. However, areas of disagreement were identified in aspects related to future trends and forest management strategies. In conclusion, the study made it possible to demonstrate the experts' perception of environmental deterioration in the sub-basin, mainly attributed to poor institutional management and anthropogenic pressures such as deforestation, land-use change, and pollution. The findings highlight the urgency of implementing integrated and coordinated management actions that restore the ecological functionality of the territory and strengthen environmental governance.

5.4. Keywords:

Participatory Action Research / Survey / Ecological Evaluation Sheets / Participatory Diagnosis

5.5. Introducción

La subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco se ubica al sur del estado de México y cuenta con una superficie estimada de 61,366.7 hectáreas, perteneciente a la Región hidrológica del Balsas (RH18) específicamente a la Cuenca Río Cutzamala (R18g).

La región funge un papel de vital importancia para el aprovisionamiento de agua a la zona metropolitana y parte del Valle de México. Sin embargo, a pesar de su importancia, la cuenca sufre serios problemas de deterioro ambiental (Bonfil & Madrid, 2006) y carece de evaluaciones medioambientales actualizadas generando problemas en la gestión de los recursos forestales e hídricos, desde el corto hasta el largo plazo.

En la subcuenca se ubican 124 localidades urbanas y rurales, con 39,055 y 64,065 habitantes, respectivamente. El 47.33% de la población total de la subcuenca habitan en 4 comunidades urbanas, 2 de las cuales pertenecen al municipio de Valle de Bravo, 1 perteneciente al Municipio de Amanalco y otra al municipio de Donato Guerra. Del total de la población, aproximadamente el 46.2 % son población económicamente activa (INEGI, 2020). Las principales actividades económicas que desarrollan en el área están influenciadas por la riqueza natural y sus recursos forestales.

El ecoturismo es una de las principales actividades económicas de la región, ha sido impulsado en gran medida por los recursos hídricos captados mediante la presa Miguel Alemán, dando paso a las actividades como deportes acuático y desarrollo de servicios relacionados, y en consecuencia un desarrollo desorganizado de la comunidad con nuevos retos ambientales y de organización (Corona-Martínez & Esquivel-Ríos, 2022).

La transformación socioeconómica de la región ha modificado su identidad, pasando de ser una comunidad rural con base agrícola, a convertirse en un destino turístico, caracterizado por una creciente gentrificación y presión inmobiliaria sostenida (Navidad-Sánchez et al., 2024). Dicha situación ha generado la

degradación del ecosistema de la subcuenca, siendo una de las principales causas la fragmentación de los hábitat, afectando así de forma directa la capacidad de regulación hídrica, la recarga de acuíferos, la retención de suelo y la conservación de la biodiversidad (Calderón-Cendejas et al., 2021).

Ante esta situación, resulta necesario contar con herramientas que permitan comprender el estado actual del medio ambiente dentro de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. Por lo tanto, el presente trabajo plantea la implementación de la metodología de fichas de evaluación ecológica propuesta por CONANP en el año 2016, para identificar el estado de conservación, amenazas y necesidades del manejo en áreas naturales.

En este marco de trabajo, el objetivo del estudio es describir de manera sistemática la percepción de expertos en materia de gestión ambiental sobre el estado actual de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco mediante la implementación de entrevista cerradas a fin de identificar las problemáticas, causas y consecuencias ambientales en la subcuenca.

5.6. Materiales y métodos.

La presente investigación es de carácter diagnóstico-participativo, con un paradigma pragmático y constructivista, se reconoce que el conocimiento sobre la condición ecológica de la subcuenca de análisis no es enteramente visible ni cuantificable de forma directa, por lo cual se recurre a la construcción interpretativa de varios expertos mediante el consenso (Cabrera-Palafox, 2022; Reguant-Álvarez et al., 2016).

El enfoque metodológico adoptado es el de la investigación-acción participativa (IAP). Dado que la condición ecológica de la subcuenca es integrada por múltiples dimensiones de la realidad, resulta complejo de medirse o cuantificarse por lo que se recurrió al consenso entre expertos (personal técnico, académicos, usuarios locales y representantes de la sociedad civil) para describir la condición actual de la subcuenca (Colmenares, 2012).

Para la creación e implementación del instrumento de investigación, se desarrollaron encuestas basadas en la herramienta Ficha de Evaluación Ecológica (FEE), diseñadas en formato digital mediante la herramienta Google Forms para su distribución a los participantes, a fin de estructurar y sistematizar las respuestas emitidas por el grupo de expertos.

La técnica para el análisis de la información fue el método Delphi; a través de la implementación de una encuesta de 20 preguntas enfocadas a la evaluación de la condición ecológica de la subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco.

5.6.1. Fichas de Evaluación Ecológica.

Las fichas de evaluación ecológica (FEE), creadas por la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), constituyen una metodología enfocada en la valoración del estado actual y la evolución o tendencias futuras de los ecosistemas de una región específica. Esta metodología se basa en el análisis de tres ejes

principales: el agua, los hábitats y los recursos vivos, a partir ellos la metodología busca comprender la condición general del área de estudio.

La metodología en general se inspira en el enfoque “monitoreo del sistema completo” o “System-Wide Monitoring” (SWiM, por sus siglas en inglés) originalmente implementado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica en áreas marinas protegidas de Estados Unidos. (CONANP,2016). Aun cuando las FEE fueron inicialmente diseñadas para su uso en contextos marinos y costeros (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2011), en la presente investigación se utilizan como punto de referencia inicial en la valoración ecológica de una subcuenca hidrográfica de México. Su utilización como marco de referencia teórico buscó facilitar la comprensión de los procesos socioambientales que se viven en la región, así como ofrecer una visión particular y única sobre las posibles causas, amenazas y problemáticas ambientales de la región.

La adecuación de las FEE se llevó a cabo mediante la realización de una serie de preguntas estructuradas y orientadas al análisis de los temas a) Agua-ecosistema, b) Hábitat-biodiversidad y c) Cuerpos de agua-Bosque. Para el estudio se formularon 20 preguntas las cuales fueron dirigidas a un panel de expertos.

5.6.2. Método Delphi.

El método Delphi se empleó como la técnica principal en el proceso de acopio de información, esto debido a que los participantes se hallaban distribuidos geográficamente en distintas partes del país. Este proceso se desarrolló a través de la aplicación de una encuesta estructurada y cerrada a cada persona, con el fin de alcanzar un consenso entre los expertos.

El estudio Delphi busca alcanzar un consenso, sobre un tema específico, basado en cuestionamientos anónimos a un panel de expertos, el cual recibe retroalimentación iterativa entre las distintas rondas, hasta llegar a un punto en el

cual se considera lograda una visión compartida (De Villiers et al., 2005; 2019; Humphrey-Murto et al., 2020; Sablatzky, 2022).

Los primeros registros documentados del uso del método Delphi datan de 1968 (Gordon & Hayward, 1968); y desde entonces la metodología ha sido adoptada de manera gradual hasta consolidarse como una herramienta ampliamente utilizada en la actualidad.

De acuerdo con la revisión realizada durante el presente trabajo, en el año 2024 se identificaron aproximadamente 1865 artículos que emplearon dicho método. La aplicación del Delphi en temas relacionados con los recursos hídricos tiene sus primeros antecedentes en el año 1973 (Dean & Shih, 1973) y desde entonces, se ha empleado para abordar distintas cuestiones relacionadas con agua, tales como la toma de decisiones, gestión del recurso, desarrollo sostenible, calidad del agua, abastecimiento, evaluación de riesgos, sostenibilidad, cambio climático, contaminación entre otros.

Particularmente el uso del Delphi en estudios relacionados con sequía y disminución de los recursos hídricos se observaron por primera vez hacia finales de la década de 2010. A partir del 2019, la mencionada metodología fue empleada con mayor regularidad, evidenciando su capacidad de adaptación y pertinencia del método en contextos en donde si involucra a la sociedad en general, ejemplo de ello la gestión del agua (Dohale et al., 2024; Fan et al., 2022; Fatehpanah et al., 2025; Shin et al., 2023; Tri et al., 2024; Yackulic et al., 2022). En ese sentido el método Delphi representa actualmente una herramienta metodológica válida, confiable y versátil para los fines propuestos del estudio.

5.6.3. Metodología

En términos de aplicación la investigación integró cinco pasos; 1) Creación y estructuración de la encuesta 2) Selección del panel de expertos, 3) realización de

la investigación Delphi con los expertos para identificar la condición del ecosistema, 4) análisis estadístico y 5) interpretación del resultado.

5.6.3.1. Creación y estructuración de la encuesta: Anexo I.

Como parte del proceso metodológico, se creó una encuesta conformada por 20 ítems, basados en las fichas de evaluación ecológica (Anexo I). Para asegurar la validez de la encuesta se integró un grupo de apoyo mediante la selección de profesionales con trayectoria relevante en las áreas académicas y técnicas afines al objeto de estudio.

El cometido del grupo de apoyo fue validar la claridad, relevancia y viabilidad de las preguntas incluidas en la encuesta. Este procedimiento fue retomado de prácticas estándar en estudios Delphi, donde se crea un instrumento de acopio de información y su calidad depende de la diversidad y experiencia del grupo de trabajo convocado (Mukherjee et al., 2015; Sankaran et al., 2023)

El grupo de apoyo, estuvo conformado por once personas con perfiles diversos y complementarios, se incluyeron: Doctores en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Doctores en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible, dos maestros en ciencias en Ciencias Forestales y del Ambiente, con experiencia profesional y conocimientos en diseño de encuestas en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Además, participaron cuatro alumnos del programa de maestría en Ciencias Forestales y del Ambiente, quienes ofrecieron una perspectiva académica actualizada, además se contó con la participación de un ingeniero en Recursos Naturales y un pasante en Ingeniero agrónomo especialista en Fitotecnia quienes aportan una visión técnica aplicada al contexto del estudio. De acuerdo con Panpakdee et al. (2022) este tipo de medidas es considerada una buena práctica en procesos Delphi, donde se tratan temas ambientales y ecológicos, ya que permite integrar tanto conocimiento experto consolidado como visiones emergentes y contextuales.

5.6.3.2. Selección del panel de expertos.

A continuación, se procedió a seleccionar el panel de expertos a los que serían aplicadas la encuestas previamente realizadas por el grupo de apoyo, el tamaño y la selección del panel se basó en las recomendaciones metodológicas del método Delphi realizadas por Akins et al.(2005) quienes mencionan que no existe un número específico de participantes para garantizar la estabilidad de los resultados en un estudio de este tipo. Sin embargo, también se consideró a Goodarzi et al.(2017) quienes definieron que un panel de expertos integrado por 10 o 20 personas resulta adecuado para obtener consensos válidos y representativos.

Se realizó una selección intencional de los encuestados con el objetivo de conformar un grupo de especialistas, el criterio para la selección fue la experiencia profesional en el área de recursos hídricos o bien experiencia en el campo académico o técnico. Como resultado del análisis se identificó un panel potencial de 40 individuos, a los cuales les fueron enviadas vía por correo electrónico una invitación de participación, un link de acceso al formato Google forms y las indicaciones para responder la encuesta. Sin embargo, solo se obtuvieron 19 respuestas.

Entre los participantes que respondieron la solicitud se encuentran profesionales con experiencia en la gestión de áreas naturales protegidas con conocimiento técnico y diagnóstico de biodiversidad, también participaron personas con formación jurídica y operativa en temas de derecho ambiental y aplicación de normativas en legislación forestal, además de profesionales con formación en materia forestal y finalmente personal provenientes del ámbito académico con participación en procesos de investigación y educación ambiental en universidades de México.

5.6.3.3. Realización y aplicación del Método Delphi

La implementación del método se llevó a cabo conforme a Fink-Hafner et al. (2019), quienes señalan que los estudios Delphi se desarrollan a través de una serie de rondas sucesivas de consulta y retroalimentación, con el objetivo de alcanzar consensos mediante la reflexión individual y anónima de estos.

La distribución y aplicación de los instrumentos de recolección de datos se efectuó conforme a la metodología descrita por Pertiwi et al. (2025). La encuesta enviada a los participantes incluyó preguntas abiertas y otras más cerradas, diseñadas con el propósito de captar las percepciones e identificar problemáticas relacionadas con el estado ecológico del territorio y analizar aspectos vinculados a la gestión del recurso hídrico.

La información recabada fue sistematizada y analizada mediante el uso de hojas de Excel de la paquetería Microsoft 365 en combinación con Google Forms lo cual permitió mantener la trazabilidad del proceso, garantizar la confidencialidad y facilitar la participación de los encuestados.

La información obtenida fue sistematizada y consolidada en las fichas de evaluación ecológica, permitiendo sintetizar los principales hallazgos sobre el estado ambiental de la subcuenca desde un enfoque integral y sistémico (Requena-Bolívar, 2018)

5.6.3.4. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizaron técnicas estadísticas paramétricas y no paramétricas que permitieron identificar patrones de percepción, relaciones entre variables ambientales así como los niveles de consenso de los participantes. Primero, las respuestas obtenidas de las encuestas fueron codificadas a la escala de Likert, para posteriormente realizar un análisis de correlación de los resultados y finalmente estimar el coeficiente de Kendall W para la comprensión integral del fenómeno estudiado.

Codificación y análisis de correlación, basados en Sadowska (2024), las entrevistas y fichas de recolección fueron codificadas mediante una escala de tipo Likert, lo que permitió la creación de una matriz de datos ordinales, a partir de la cual, se aplicó un análisis de correlación de Spearman con el objetivo de identificar asociaciones estadísticamente significativas entre variables de carácter ambiental.

Estimación del consenso Delphi. Con el propósito de evaluar el grado de consenso entre los participantes en relación con los temas ; a) Agua-ecosistema, b) Hábitat-biodiversidad y c) Cuerpos de agua-Bosque, se empleó el enfoque metodológico propuesto por (Sun et al., 2020).

Dado el tipo de escala empleada (Likert), se recurrió a estadísticos no paramétricos para describir la tendencia central y la dispersión de las valoraciones. Los indicadores utilizados fueron la medida de tendencia central: Mediana ;la cual refleja el valor central de las respuestas y permite identificar la tendencia predominante en las percepciones del grupo. Asimismo, se utilizó el rango intercuartílico (IQR) como indicador de dispersión, ya que este expresa la amplitud entre los cuartiles primero y tercero. Un valor reducido del IQR denota una mayor uniformidad en las respuestas, lo que se traduce en un nivel más elevado de consenso entre los participantes.

Coefficiente de concordancia de Kendall (W). La estimación individual del consenso por ítem (rango intercuartílico) fue complementado con la evaluación de medidas de consenso global, como el coeficiente de concordancia de Kendall (W), el cual fue empleado para validar el grado de consenso de la encuesta esto de acuerdo con lo planteado por (Jung & Choi, 2012).

El coeficiente de concordancia de Kendall (W) es una medida estadística no paramétrica utilizada para evaluar el grado de acuerdo o consenso entre múltiples jueces o expertos que califican un conjunto común de ítems (por ejemplo, preguntas, afirmaciones, variables). A diferencia de las correlaciones bivariados (como Spearman o Pearson), Kendall W se aplica cuando hay tres o más evaluadores que asignan rangos u ordenamientos ordinales a los mismos ítems (Field, 2005).

El coeficiente W oscila entre 0 y 1, donde 0 indica ausencia total de acuerdo y 1 representa unanimidad. De esta manera, se obtiene una visión integral del grado de convergencia del panel de expertos sobre el conjunto de temas evaluados.

Interpretación del resultado. El procesamiento de la información obtenida se realizó de acuerdo con (Zambrano-Pita & León-Palma, 2018), para ello se realizó un procesamiento preliminar de los datos se efectuó mediante Microsoft Excel®, lo cual permitió organizar matrices de información, tabular frecuencias, codificar respuestas abiertas y calcular promedios. Para el análisis estadístico, tanto descriptivo como inferencial, se utilizó IBM SPSS Statistics®.

5.7. Resultados y discusión

5.7.1. Resultados de las preguntas abiertas de la encuesta.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de las preguntas abiertas se llevó a cabo mediante un proceso de interpretación cualitativa y categorización temática, el cual tuvo como objetivo de identificar los patrones, ideas principales y problemáticas recurrentes expresadas por los expertos participantes.

Al preguntar a los expertos sobre la condición actual de los cuerpos de agua y arroyos de la subcuenca, las respuestas reflejaron una percepción generalizada de deterioro en el estado de estos dentro del territorio de la subcuenca. La mayoría de los expertos mencionó una disminución progresiva del nivel de agua, la cual fue observada durante los últimos años y asociada, principalmente, a periodos de sequía prolongados, desviación de cauces naturales y sobreexplotación. El cuerpo de agua al cual la mayoría hacía referencia fue el vaso de captación de la presa Miguel Alemán, ubicada en el municipio de Valle de Bravo.

Existen autores que respaldan dicha información, como (Arias-Rodríguez et al., 2020) quien menciona que los efectos de las sequías de 2006 y 2009 sobre la calidad del agua se correlacionaron con un deterioro de esta, por su parte, (Figuerola-Serrano, 2020) refiere que comunidades mazahuas del Estado de México identifican una reducción en los caudales de los ríos Lerma y Cutzamala, así como la desaparición de manantiales y corrientes superficiales, producto de la sobreexplotación y los proyectos que extraen agua de la región y conducen hacia la zona metropolitana.

Entre las principales amenazas detectadas en la subcuenca destacaron el cambio de uso de suelo (principalmente hacia zonas urbanas o agrícolas), los incendios forestales recurrentes, la deforestación (por tala legal e ilegal), la contaminación de cuerpos de agua por descargas residuales y residuos sólidos, así como el manejo inadecuado del territorio y del recurso hídrico. Se subrayó la pérdida de cobertura forestal como un problema raíz, ya que incrementa la erosión, reduce la infiltración de agua y afecta la biodiversidad. Asimismo, se mencionó que otra gran

problemática de la región fue el crecimiento urbano sin control, junto con la ausencia de políticas efectivas de restauración ambiental

Autores como Pons et al.(2018) refieren la existencia de un cambio de uso de suelo dentro de la subcuenca, destacando que las áreas urbanas del municipio se duplicaron, alterando el rendimiento hídrico y modificando el equilibrio ecosistémico del bosque templado, a pesar de su persistencia en la región, los autores Deverdun-Reyna et al., (2016) afirman que el la creación de viviendas ha llevado al límite la capacidad de carga ambiental de la subcuenca, generando en consecuencia una disminución en el abasto de recursos hídricos y generando problemas a la población de la subcuenca.

No obstante, al preguntar a los expertos si esta disminución respondía a un problema de escasez o de gestión del recurso hídrico, estos respondieron que el origen principal de las problemáticas ambientales radicaba en la mala gestión institucional del recurso hídrico y forestal. Se señalaron la falta de planeación, la débil aplicación de la normatividad y la deficiencia en la coordinación interinstitucional, mientras que algunas respuestas expresaron que la problemática era estructural y estaba vinculada a una débil gobernanza ambiental. En general, se percibió una desarticulación entre los actores sociales e institucionales, situación que debería atenderse mediante una gestión integral de cuenca.

Al respecto; Banderas & González-Villela (2019) mencionan que impacto ambiental superó los esfuerzos por preservar la resiliencia del ecosistema acuático y plantea que la situación que se vive en la subcuenca exige un enfoque diferente en la gestión del agua y una legislación inclusiva que satisfaga a todos los actores involucrados.

Finalmente, al cuestionar a los expertos sobre la condición general del ecosistema, las respuestas reflejaron una evaluación negativa del estado general del mismo. Se describieron procesos de deterioro ambiental acumulado, vinculados a la pérdida de recursos naturales, deforestación, contaminación y una mala gestión del agua. Algunos expertos señalaron que la degradación ecológica afectaba tanto a los

ecosistemas como al bienestar social, debido a la pérdida de servicios ambientales (agua, suelo fértil, biodiversidad).

5.7.2. Resultado de la entrevista aplicadas y realización de las fichas de evaluación ecológicas

Enseguida se presentan los resultados obtenidos del análisis de respuestas estructuradas (cerradas). Se llevó a cabo mediante un proceso de codificación numérica (Escala de Likert), tratamiento estadístico y evaluación comparativa de los valores otorgados por los expertos, logrando identificar tendencias, percepciones y niveles de afectación o desempeño ambiental en la subcuenca de estudio.

Análisis de Correlación de Spearman (ρ) de las respuestas de la encuesta.

Para una análisis de las respuestas fue necesario codificaron las respuestas en escala Likert para construir una matriz de correlaciones (Figura 15) entre las percepciones de los expertos, el resultado se muestra en la siguiente tabla:

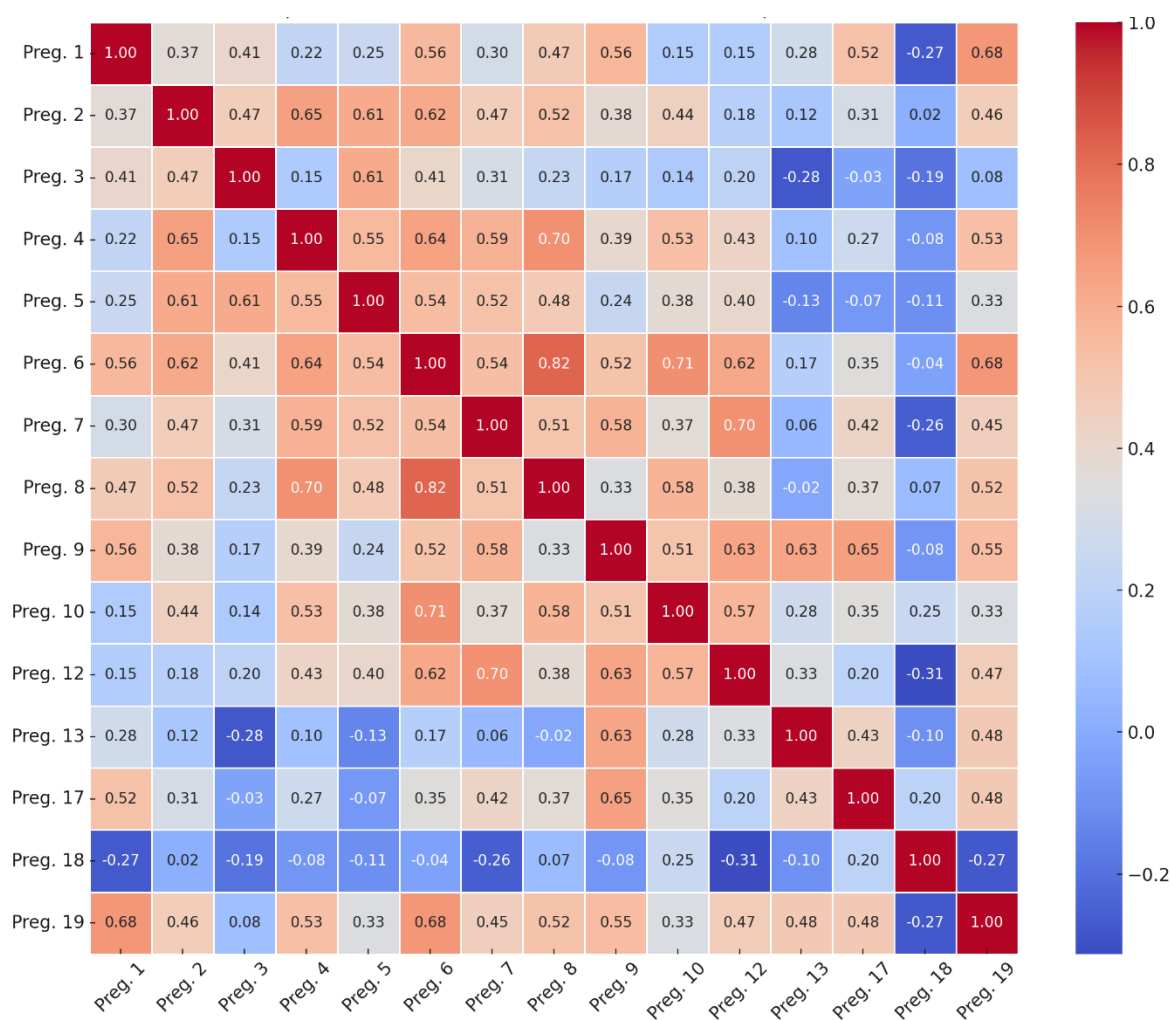


Figura. 15. Gráfico de calor del Análisis de Correlación de Spearman (r).

Los valores de correlación de las preguntas del instrumento se ubican dentro de una correlación fuerte esto de acuerdo con la Interpretación de la magnitud del coeficiente de correlación de Spearman (ρ) lo cual sugiere que los encuestados mantienen una consistencia en su juicio frente a los distintos aspectos ambientales de la subcuenca y valida el uso del instrumento en este tipo de estudios. En términos prácticos se infiere que los participantes quienes percibieron un alto nivel de afectación o deterioro en un aspecto, tienden a mantener esa valoración en otros componentes relacionados. Esto significa que, a medida que una variable refleja una condición negativa, cobertura forestal, por ejemplo, otras variables asociadas a

esta también tienden a evaluarse de forma negativa por ejemplo, hábitat o calidad de agua. Al respecto Gerez-Fernández & Pineda-López (2011) mencionan que los bosques fungen un papel como reguladores climáticos, fuentes de agua y hábitat de biodiversidad; su degradación afecta simultáneamente estos servicios, lo que refuerza la interdependencia ecosistémica. Esta relación sugiere que las percepciones de los participantes no fueron aleatorias ni independientes, sino que siguieron una lógica interna coherente. El patrón observado puede representarse de la siguiente manera (Figura 16):

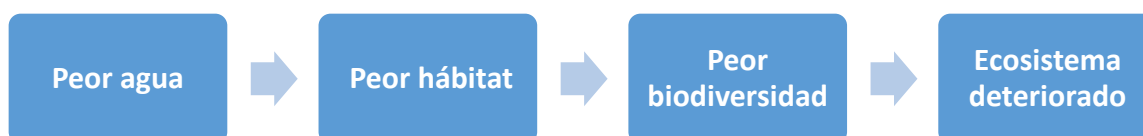


Figura. 16. Representación gráfica del razonamiento y pensamiento de los participantes.

Este razonamiento indica que los participantes percibieron los elementos del ecosistema como interconectados, es decir, el deterioro de un componente tiende a arrastrar efectos negativos sobre otros, como el hábitat y la biodiversidad. Dicho razonamiento es respaldado por los autores Requena-Lara et al., (2020) quienes afirman que los ecosistemas con menor degradación del hábitat presentan mayor biodiversidad y estabilidad ecológica, mientras que los factores antropogénicos (uso del suelo y fragmentación) reducen la calidad ambiental y arrastran la pérdida de especies de manera consecuente.

Los resultados de la correlación más fuertes entre las preguntas se describen a continuación en el cuadro 7; Interpretación de la correlación de las preguntas realizada.

Cuadro. 7. Interpretación de la correlación de las preguntas realizadas

Preguntas analizadas	Valor de (ρ)	Interpretación
P6 y P8 (Tendencias futura de los ecosistemas Tendencia sobre la calidad del hábitat a futuro)	0.821	Correlación positiva muy fuerte. Los participantes que perciben cambios en los ecosistemas también anticipan alteraciones en la calidad del hábitat.
P1 y P19 (Afectación del impacto humano ↔ Condición general del ecosistema)	0.679	Finalmente, estos incisos muestran una correlación fuerte y positiva: los impactos humanos percibidos en el agua se asocian a un deterioro general del ecosistema.

5.7.3. Índice de Consenso Delphi por pregunta

Posteriormente, se estimó el nivel de consenso entre los participantes mediante el cálculo de la mediana y el rango intercuartílico (IQR) (cuadro 8), para cada ítem de la escala tipo Likert. La mediana permitió identificar la tendencia central de las respuestas, mientras que el IQR funcionó como indicador de dispersión y, por tanto, de consenso.

Cuadro. 8. Índice de Consenso Delphi Intercuartílico

Número de pregunta.	Mediana	Rango Intercuartílico (IQR)	Nivel de consenso
Pregunta. 1	2	0	Muy Alto
Pregunta. 2	2	0.75	Alto
Pregunta. 3	2	0	Muy Alto
Pregunta. 4	2	1	Alto
Pregunta. 5	2	1	Alto
Pregunta. 6	2	1	Alto
Pregunta. 7	2	1	Alto
Pregunta. 8	2	0.75	Alto
Pregunta. 9	3	1	Alto
Pregunta. 10	2	0	Muy Alto
Pregunta. 12	2	1	Alto
Pregunta. 13	2	1.75	Bajo
Pregunta. 17	2	0	Muy Alto
Pregunta. 18	2	2	Bajo
Pregunta. 19	2	0.75	Alto

Al observar los resultados obtenidos, identificamos que la mediana general de los resultados recae la categoría 2, por lo que podemos inferir que la condición general de la subcuenca se percibe en una condición negativa, pero sin llegar a ser el peor escenario posible dentro de la escala planteada.

Los resultados evidencian un consenso describiendo una valoración negativa de las condiciones ambientales, existe controversia en relación con la pregunta 13 y Pregunta 18, la primera cuestiona a los participantes sobre cuál es su percepción sobre las tendencias futuras y factores que afectan la salud de los bosques mientras que la segunda abordó el tema relacionado a las acciones o estrategias a realizar en atención a los problemas que afectan a la subcuenca.

Al respecto del consenso al cual llegaron los participantes, algunos estudios como el realizado por Manley et al. (2022) concuerdan en que la región Hidrológica México-Lerma- Cutzamala (RHMC) sufrió un crecimiento de la cobertura de suelo urbano creció en más del 80% en contraste con el año de 1993. Mientras que con relación a la controversia sobre las tendencias futuras de la subcuenca de estudio, el estudio realizado por Martínez et al. (2015) menciona que ante la creciente urbanización y el cambio climático, es probable que la situación actual de la subcuenca empeore como consecuencia del cambio climático, además de ello se prevé una reducción del 10% al 17% en la disponibilidad de agua para 2050.

5.7.4. Análisis general del consenso

Con el propósito de evaluar el nivel de acuerdo entre las respuestas de los participantes respecto a las diferentes dimensiones ambientales analizadas en la encuesta, se aplicó la Prueba de Concordancia de Kendall (W). Este índice permite determinar el grado de consenso global entre los encuestados al valorar un conjunto común de ítems mediante una escala ordinal tipo Likert.

El análisis arrojó un valor de Kendall $W = 0.451$, con un estadístico Chi-cuadrado (χ^2) = 63.61 y un valor $p = 2.70 \times 10^{-8}$. Dado que el valor p es significativamente menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula de ausencia de concordancia,

concluyéndose que existe un nivel de acuerdo estadísticamente significativo entre las respuestas de los encuestados.

No obstante, la magnitud del coeficiente W (0.451) indica un consenso moderado. Este resultado sugiere que, aunque las percepciones tienden a seguir un patrón común, es decir, los participantes muestran coherencia general en la valoración de las condiciones ambientales, existe también variabilidad en las respuestas dependiendo del componente evaluado (agua, ecosistemas, biodiversidad o gestión).

Desde un punto de vista interpretativo, el valor puede explicarse por:

- La diversidad temática del cuestionario, que abarca dimensiones ecológicas, sociales y de gestión ambiental.
- Las diferencias en experiencia, conocimiento o exposición ambiental de los encuestados.
- La presencia de preguntas prospectivas (sobre tendencias futuras), que suelen generar mayor dispersión en las respuestas.

En conjunto, estos resultados permiten afirmar que, aunque las respuestas no son totalmente uniformes, existe un patrón de pensamiento ambiental compartido que denota una comprensión colectiva de los problemas de la subcuenca, acompañada de diferencias legítimas en la intensidad de la percepción y la valoración del impacto.

5.8. Conclusiones

El estudio demostró la utilidad de los enfoques de participación ciudadana en la evaluación de la condición ecológica de una subcuenca en México. El panel de expertos indica que la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco experimenta un deterioro ambiental debido a numerosas presiones antropogénicas (cambio de uso de suelo y crecimiento urbano).

Mediante el método Delphi, se identificó que los expertos comparten una visión sobre la pérdida de valor ecológico debido al cambio de uso de suelo, la deforestación, la expansión urbana no regulada y la contaminación que ha disminuido seriamente el estado funcional de los ecosistemas de la subcuenca.

Así mismo, describieron que los recursos hídricos estaban disminuyendo en calidad y cantidad a causa de la progresiva pérdida de cobertura forestal y biodiversidad.

El análisis estadístico correlacional mostró resultados significativos entre las percepciones de deterioro de los recursos hídricos y la condición ecológica general.

El coeficiente de Kendall W (0.451) señaló un grado de consenso moderado, esto asociado principalmente a las características heterogéneas de los participantes.

Este trabajo constituye una base científica para futuras investigaciones enfocadas en la valoración de la condición ecológica regional. Se recomienda profundizar en estudios orientados al análisis del impacto socioambiental del turismo, evaluar la eficacia de políticas públicas de restauración ecológica en la cuenca de trabajo e impulsar mecanismos participativos y monitoreo con comunidades locales para mejorar la gestión de los recursos naturales.

Particularmente se recomienda replicar el estudio aquí presentado con un número mayor de participantes provenientes de la región con vinculación directa condición ecológica actual de la subcuenca. De igual manera se plantea la necesidad de aplicar en su totalidad la metodología de fichas de evaluación ecológica para la región, ya que esto mejorará la capacidad de divulgación y comprensión de los resultados obtenidos.

5.9. Referencias

- Akins, R. B., Tolson, H., & Cole, B. R. (2005). Stability of response characteristics of a Delphi panel: application of bootstrap data expansion. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-5-37>
- Arias-Rodriguez, L. F., Duan, Z., Sepúlveda, R., Martinez-Martinez, S. I., & Disse, M. (2020). Monitoring water quality of valle de bravo reservoir, Mexico, using entire lifespan of meris data and machine learning approaches. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 1586, 12(10), 1586. <https://doi.org/10.3390/RS12101586>
- Bonfil, H., & Madrid, L. (2006). El pago por servicios ambientales en la cuenca de Amanalco-Valle de Bravo. *Gaceta Ecológica*, (80), 63-74.
- Banderas, A. G., & González-Villela, R. (2019). Evaluation of the sustainability of the Valle de Bravo reservoir, Mexico, as a water-supply source. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 239, 79–93. <https://doi.org/10.2495/WS190081>
- Cabrera-Palafox, H. (2022). Elaboración de un instrumento de investigación con el método Delphi: Analizando el estrés y malestar en docentes universitarios. *IE Revista de Investigación Educativa de La REDIECH*, ISSN-e 2448-8550, ISSN 2007-4336, Nº. 13, 2022, 13, 15. https://doi.org/10.33010/ie_rie_rediech.v13i0.1364
- Calderón-Cendejas, J. C., Ramírez, L. M., Zierold, J. R., Valenzuela, J. D., Ibarra, M. M., de Tagle, S. M. S., & Téllez, A. C. (2021, October). Evaluation of the impacts of land use in water quality and the role of nature-based solutions: A citizen science-based study. *Sustainability (Switzerland)*, 13. <https://doi.org/10.3390/su131910519>
- Colmenares, A. E. (2012). Investigación-acción participativa: una metodología integradora del conocimiento y la acción. *Revista Latinoamericana de Educación*, 3(1), 102–115.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2016. Fichas de evaluación ecológica de áreas naturales protegidas del noroeste de México. 240 pp. Disponible en línea: < <https://simec.conanp.gob.mx/evaluacion.php?menu=4>
- Comisión para la Cooperación Ambiental (2011). A guide to ecological scorecards for marine protected areas in North America. Commission for Environmental Cooperation.
- Corona-Martínez, J., & Esquivel-Ríos, S.,. (2022). Sustainability and alternative tourism: A retrospective reflection of residential tourism and its potential towards nature tourism in the municipality of Valle de Bravo. *International Journal of Science and Research*. <https://doi.org/10.21275/MR24222103934>
- De Villiers, M., De Villiers, P., & Kent, A. (2005). The delphi technique in health sciences education research. *Medical Teacher*, 27, 639–643. <https://doi.org/10.1080/13611260500069947>

- Dean, J. H., & Shih, C. S. (1973). Subjective decision-making for urban water resources development. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 9, 942–949. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1973.tb05820.x>
- Deverdun-Reyna, M. E., Osorio-Garcia, M., & Iracheta-Cenecorta, A. (2016). The residential tourism in Valle de Bravo, México. An interpretation of its life cycle.
- Dohale, V., Mustafee, N., & Nagarajan, M. (2024). Orange grower's perception of drought impacts and strategies for mitigation and adaptation: A study of the Vidarbha region in India. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104392>
- Fan, C., Chen, Y., Zhu, Y., Zhang, L., Wu, W., Ling, B., & Tang, S. (2022). Using fuzzy comprehensive evaluation to assess the competency of full-time water conservancy emergency rescue teams. *Mathematics*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/math10122111>
- Fatehpanah, A., Jahangiri, K., Seyedin, H., Kavousi, A., Malekinezhad, H., & Rostami, M. (2025). Water health in drought: a model integrating indigenous and modern knowledge. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 10(1), 2521 – 2532. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v10i1.18297>
- Field, A. P. (2005). *Discovering statistics using SPSS*, 2nd Edition, Sage, London.
- Figueroa-Serrano, D. . (2020). El agua en la percepción mazahua: Ecofilosofía y narrativa de la naturaleza / Water in Mazahua perception: Ecophilosophy and narrative of nature. *Trace*, 78, 154–178. <https://doi.org/10.22134/TRACE.78.2020.593>
- Fink-Hafner, D., Dagen, T., Doušak, M., Novak, M., & Hafner-Fink, M. (2019). Delphi method. *Advances in methodology and statistics*. <https://doi.org/10.51936/fcfm6982>
- Gerez-Fernández, P., & Pineda-López, M. del R. (2011). Los bosques de Veracruz en el contexto de una estrategia estatal REDD+. *Madera y Bosques*, 17(3), 7–27. <https://doi.org/10.21829/MYB.2011.1731140>
- Goodarzi, Z., Abbasi, E., & Farhadian, H. (2017). Achieving consensus deal with methodological issues in the Delphi technique. *International Journal of Agricultural Management and Development (IJAMAD)*, 8(2), 219-230.
- Gordon, T. J., & Hayward, H. (1968). Initial experiments with the cross impact matrix method of forecasting. *Futures*, 1(2), 100 – 116. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(68\)80003-5](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(68)80003-5)
- Humphrey-Murto, S., Wood, T., Gonsalves, C., Mascioli, K., & Varpio, L. (2020). The delphi method. *Academic medicine: Journal of the Association of American Medical Colleges*. <https://doi.org/10.1097/ACM.0000000000002887>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censo de Población y Vivienda (CPV) 2020 Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos_abiertos
- Jung, Yong & Minha Choi, 2012. Survey-based approach for hydrological vulnerability indicators due to climate change: case study of small-scale rivers. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 48(2): 256-265. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2011.00608.x

- Lalinde, J. D. H., Castro, F. E., Rodríguez, J. E., Rangel, J. G. C., Sierra, C. A. T., Torrado, M. K. A., ... & Pirela, V. J. B. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 587-595. Recuperado el 18 de noviembre de 2025; <https://www.redalyc.org/journal/559/55963207025/55963207025.pdf>
- Manley, E., Ogneva-Himmelberger, Y., Ruelle, M., Hanumantha, R., Mazari-Hiriart, M., & Downs, T. J. (2022). Land-cover change and urban growth in the Mexico-Lerma-Cutzamala Hydrological Region, 1993–2018. *Applied Geography*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102785>
- Martinez, S., Kralisch, S., Escolero, O., & Perevochtchikova, M. (2015). Vulnerability of Mexico city's water supply sources in the context of climate change. *Journal of Water and Climate Change*, 6(3), 518–533. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.083>
- Mukherjee, N., Hugé, J., Sutherland, W. J., McNeill, J., Van Opstal, M., Dahdouh-Guebas, F., & Koedam, N. (2015). The Delphi technique in ecology and biological conservation: applications and guidelines. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(9), 1097–1109. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12387>
- Navidad-Sánchez, A., Tamayo-Salcedo, A. L., & Guadarrama-tavira, e. (2024). Airbnb: is there collaborative lodging in this gentrified setting?. *Turismo y sociedad*, 34, 245–279. <https://doi.org/10.18601/01207555.n34.10>
- Panpakdee, C., Simaraks, S., & Sookcharoen, C. (2022). Using the Delphi method to develop the social-ecological resilience indicators of organic rice production in Thailand. *Forest and Society*, 6, 157–174. <https://doi.org/10.24259/fs.v6i1.14771>
- Pertiwi, I. G. A. I. M. Z. Y., Negara, K. P., Solimun, & A.W.M. (2025). Identification of green construction indicators and project performance in green construction-based project management using the Delphi method. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 539 LNCE, 429–440. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5910-1_33
- Pons, V. L., Aragón, I. E. R., Robles, J. S., & Lima, P. T. (2018). Evaluation of the service ecosystem of water yield from an analysis of the landscape in the municipality of Valle de Bravo, Mexico. *Papeles de Geografía*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:242086867>
- Reguant-Álvarez, M., & Torrado Fonseca, M. (2016). El método delphi. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 2016, vol. 9, num. 2, p. 87-102. <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/110707>
- Requena-Lara, G. N., Morales-Pacheco, J. F., Cámara-Artigas, R., & Zamora Tovar, C. (2020). Niveles de conservación y degradación de hábitat en los ecosistemas de una cuenca de alta biodiversidad en Tamaulipas (México). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 84. <https://doi.org/10.21138/bage.2768>
- Requena-Bolívar, Y. C. (2018). Investigación acción participativa y educación ambiental. *Revista Científica*, 3(7), 289–308. <https://doi.org/10.29394/Scientific.issn.2542-2987.2018.3.7.15.289-308>

- Reyes-García, F. A., Martínez-Tavera, E., Martínez-Gallegos, S., & Illescas, J. (2025). Physicochemical and statistical analysis of water and microplastics in a drinking water reservoir in México. *MRS Advances*, 1-9. <https://doi.org/10.1557/s43580-025-01240-9>
- Sablitzky, T. (2022). Delphi method. *Hypothesis*. <https://doi.org/10.18060/26224>
- Sadowska, B. (2024). Relevant information from the perspective of sustainable forest management – auditing socio-environmental information and data. *ZTR*, 48(3), 233-262. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7265>.
- Sankaran, S., Ang, K., & Hase, S. (2023). Delphi method. *Journal of Systems Thinking*. <https://doi.org/10.54120/jost.0000014>
- Shin, H., Lee, G., Lee, J., Kim, S., & Song, I. (2023). Assessment of agricultural drought vulnerability with focus on upland fields and identification of primary management areas. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032773>
- Tri, D. Q., Nhat, N. Van, Tuyet, Q.T. T., Pham, H.T. T., Duc, P. T., & Thanh Thuy, N. (2024). Applying an analytic hierarchy process and a geographic information system for assessment of land subsidence risk due to drought: a case study in ca mau peninsula, vietnam. *Sustainability (Switzerland)*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/su16072920>
- Sun, X., Ren, Q., & Hsu, W. L. (2020, October). Framework for evaluation index system of carrying water resource. In *2020 ieee eurasia conference on iot, Communication and Engineering (ECICE)* (pp. 349-352). IEEE. DOI: 10.1109/ECICE50847.2020.9302020
- Yackulic, C. B., Archdeacon, T. P., Valdez, R. A., Hobbs, M., Porter, M. D., Lusk, J., Tanner, A., Gonzales, E. J., Lee, D. Y., & Haggerty, G. M. (2022). Quantifying flow and nonflow management impacts on an endangered fish by integrating data, research, and expert opinion. *Ecosphere*, 13(9). <https://doi.org/10.1002/ecs2.4240>
- Zambrano-Pita, K.L., & León-Palma M.C., (2018). Observatorio turístico para el control de la gestión del destino turístico sucre-san Vicente-jama-pedernales. *Ciencia y docencia desde la universidad: II jornada científica bahía de Caráquez* (pp. 111-118). universidad laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM)

ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-AMANALCO, MÉXICO.

Este capítulo final presenta las conclusiones generales del estudio, integrando los principales hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación.

A partir de la revisión bibliográfica, la modelación hidrológica mediante el Modelo SWAT y la creación de las Fichas de evaluación ecológica mediante el Método participativo, método Delphi.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusión general

La investigación cumplió con el objetivo de analizar los cambios en la recarga de agua de la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco a través de la comparación de escenarios temporales generados por el Modelo SWAT, así como la evaluación de la percepción de expertos sobre la condición ecológica de la subcuenca, permitiendo conocer e identificar las causas y consecuencias e impactos que esto ha generado sobre el recurso hídrico.

En principio, el análisis realizado en el capítulo 3, Estado del arte de la modelación hidrológica con énfasis en el modelo SWAT demostró que el modelo propuesto era una herramienta eficaz y válida para simular balances hidrológicos en las cuencas hidrográficas. Sin embargo, la inclusión de dimensiones sociales tenía limitaciones por lo que se recomienda incorporar metodologías complementarias, como la investigación-acción participativa.

Posteriormente los resultados del modelo SWAT indican que la precipitación anual y la producción de agua han disminuido en comparación con el año 1981. Dicha situación se asocia principalmente a los cambios en el uso del suelo, la urbanización, fragmentación de ecosistemas y alteración de las áreas forestales. En los últimos años, el clima de la región ha acentuado la presión sobre los recursos hídricos, debido en gran medida al aumento de temperatura y reducción de la precipitación,

Finalmente, la aplicación del método Delphi identificó consenso entre los especialistas sobre el deterioro ecológico de la subcuenca, señalando que la deforestación, la urbanización no regulada y la contaminación son los principales factores causales de la degradación ambiental de la región.

Lo mencionado por los expertos coincide con los hallazgos del análisis cuantitativo realizado en el capítulo 4 del presente trabajo, respaldando las observaciones sobre la disminución de los recursos hídricos en cantidad y calidad. Al respecto del nivel de consenso de los participantes, se registró un coeficiente de concordancia de

Kendall W de 0.451, el cual refiere a un consenso moderado entre los expertos; sin embargo, esto puede tener origen en la variación de las experiencias laborales y técnicas de los participantes, por lo que se recomienda la participación de un mayor número de actores locales en futuras investigaciones.

En conjunto, el estudio encontró que los cambios en la producción de agua anual de la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco fueron mayormente negativos, debido a problemas concurrentes que amenazan la sostenibilidad total del agua en el territorio. En este sentido, se aconseja realizar las siguientes actividades clave para mitigar los impactos identificados; a) evaluar y mejorar los mecanismos de gobernanza participativa del agua, b) establecer programas de restauración ecológica en áreas prioritarias y c) la implementación de monitoreo comunitario de los recursos hídricos.

6.2. Conclusión sobre los fenómenos recientes de lluvia en la subcuenca

En los últimos años, la subcuenca Valle de Bravo–Amanalco ha experimentado una marcada variabilidad en los patrones de precipitación, caracterizada por episodios de lluvias intensas concentradas en cortos periodos y por prolongadas temporadas de sequía. El cambio climático y el aumento de la temperatura media regional han sido factores determinantes en estos fenómenos, impactando negativamente los recursos hídricos de la región, favoreciendo la erosión del suelo y en general abonando al desequilibrio del ecosistema.

Los resultados del modelo SWAT indican disminución en la producción de agua y en la precipitación media anual, lo que se traduce en una disminución de la infiltración y un incremento en los picos de escorrentía superficial, reduciendo la disponibilidad de agua durante los meses secos.

En 2025, después de las lluvias, el vaso de captación de la presa Miguel Alemán ubicado en la subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco alcanzó niveles de almacenamiento óptimo, favoreciendo a los habitantes de la región y zona

metropolitana de la Ciudad de México, sin embargo, tales episodios son fenómenos atípicos en la región.

Lo ocurrido en estos últimos 2 años ha dejado en evidencia la vulnerabilidad de los mecanismos de abasto de agua de los mexicanos e incentiva a reforzar las estrategias de gestión sostenible de los recursos hídricos y una gestión eficiente y responsable del agua.

6.3. Recomendaciones generales

Dados los hallazgos de la investigación, se recomienda mantener la generación de información espacial y temporal de calidad en la región con el fin de reforzar la comprensión del comportamiento del sistema hidrológico de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco y apoyar la toma de decisiones basada en evidencia científica y técnica.

De igual manera, resulta necesario integrar información climática actual en la planificación de la gestión de subcuencas que permita comprender de mejor manera los eventos extremos actuales. Se sugiere además, reforzar el monitoreo hidrometeorológico a nivel local.

En la misma línea, se recomienda incluir los resultados del modelo SWAT puntualmente las Unidades de Respuesta hidrológicas (HRU) en la zonificación ecológica de los programas de Ordenamiento ecológico de los Municipios de la Subcuenca, esto debido a que las Unidades HRU permitirán comprender mejor la dinámica del agua en la región y mantendrán cohesión lógica de trabajo y esfuerzos combinados entre los distintos municipios de la región.

Finalmente, se considera necesario el fortalecimiento de la gobernanza del agua e integración efectiva de los distintos actores locales e instituciones de gobierno involucradas en la toma de decisiones sobre el manejo del agua de la región.

ANEXO 1.

FICHAS DE EVALUACIÓN ECOLÓGICA DE LA SUBCUENCA VALLE DE BRAVO-AMANALCO SUBCUENCA VALLE DE BRAVO- AMANALCO.

PRESENTACIÓN.

Estimado(a) participante.

Mi nombre es José Ignacio Martínez Olaya y actualmente curso la Maestría en Ciencias Forestales y del Ambiente en la Universidad Autónoma Chapingo, México. La presente encuesta forma parte de un estudio de participación ciudadana que será integrado como parte de mi proyecto de investigación de tesis de Maestría. El objetivo principal es sistematizar la percepción que tienen los participantes sobre la Subcuenca Valle de Bravo–Amanalco con relación a la condición actual del recurso hídrico en esta región. Por ello, solicito atentamente su colaboración para responder el siguiente cuestionario, el cual consta de 20 preguntas de opción múltiple y abiertas.

La información proporcionada será utilizada únicamente con fines académicos, con el propósito de generar un diagnóstico general sobre la subcuenca y, posteriormente, contribuir a la elaboración de las Fichas de Evaluación Ecológica (FEE). Su participación es voluntaria y anónima. El tiempo estimado del ejercicio es de 10 minutos. Agradezco profundamente su colaboración y sinceridad, ya que su conocimiento y experiencia son fundamentales para lograr una evaluación integral y representativa del territorio.

Atentamente

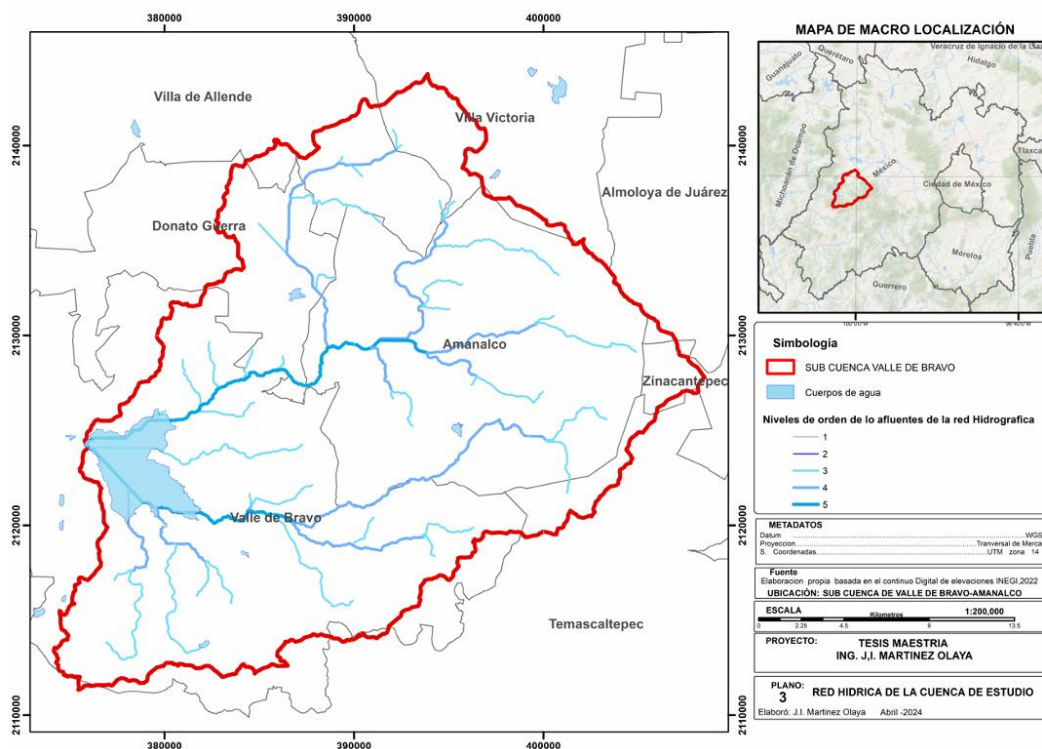
José Ignacio Martínez Olaya

Estudiante de Maestría en ciencias en ciencias forestales y del Ambiente

Universidad Autónoma Chapingo

Octubre de 2025

Con el fin de contextualizar el área de estudio presentamos los límites de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. En esta delimitación se consideró a los municipios: Amanalco, Valle de Bravo, Donato Guerra, Villa Victoria, Villa de Allende.



Datos generales Agradeceremos que proporcione la siguiente información general, la cual permitirá contextualizar sus respuestas dentro del estudio. Esta información será tratada con estricta confidencialidad y se utilizará únicamente con fines académicos.

DATOS PARA IDENTIFICACIÓN DEL ENTREVISTADO.

- ¿Cuál es el nombre de la institución u organización a la que perteneces?*
- ¿Cuál es tu profesión o formación académica? *
- ¿Cómo se identifica en términos de género? *
- ¿Cuál es su lugar de residencia actual?* (Por favor, indique localidad y municipio)
- ¿Conoces la subcuenca de estudio? *
- ¿Por cuáles motivos conoces la Subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco?*

SECCIÓN DE PREGUNTA ENFOCADA A: AFECTACIÓN DEL IMPACTO HUMANO EN EL AGUA DE LA SUBCUENCA.

- **Pregunta 1. ¿Considera que las actividades humanas, como la deforestación, el cambio de uso de suelo o la construcción de infraestructura, han afectado la cantidad de agua disponible en la subcuenca? Selecciona una opción.**

- 5. El impacto generado por actividades humanas es mínimo o prácticamente inexistente.
- 4. Las actividades humanas se han llevado a cabo, pero no han generado cambios perceptibles en la cantidad de agua.
- 3. Se observan efectos localizados en ciertas zonas de la subcuenca, aunque aún de forma moderada.
- 2. Las actividades humanas han causado afectaciones visibles y relevantes en la disponibilidad de agua
- 1. El impacto es severo; la cantidad de agua se ha reducido significativamente y requiere atención urgente
- 0. No tengo información suficiente y prefiero no responder

- **Pregunta 2. Afectaciones al suministro de agua por las actividades humanas ¿Cuál considera que es el nivel de afectación de las actividades sobre la cantidad de agua dentro de la subcuenca? Selecciona una opción.**

- 5. Las actividades humanas han tenido un efecto mínimo o nulo en el suministro de agua disponible para la población.
- 4. Las actividades humanas están presentes, pero no han provocado cambios perceptibles en el acceso al agua.
- 3. Se identifican afectaciones puntuales en algunas comunidades, aunque el suministro general se mantiene estable.
- 2. El impacto es evidente; varias zonas han experimentado reducciones en la disponibilidad de agua para consumo humano.
- 1. El suministro de agua se ha visto gravemente afectado; existen serias limitaciones para el acceso al agua en diversas áreas.
- 0. No tengo información suficiente y prefiero no responder

- **Pregunta 3. Estado actual de los escurrimientos naturales en la subcuenca * ¿Cuál considera que es la situación actual de los escurrimientos naturales (arroyos, riachuelos, corrientes intermitentes o permanentes) dentro de la subcuenca? Tomando en cuenta el impacto de las actividades humanas. Selecciona una opción.**

- 5. Los escurrimientos naturales mantienen su régimen y caudal original; el impacto de las actividades humanas es mínimo.
- 4. Aunque existen intervenciones humanas, no se observan alteraciones visibles en los escurrimientos.
- 3. Se han detectado cambios moderados en zonas específicas, atribuibles a actividades humanas.
- 2. Se evidencian alteraciones importantes en caudales, frecuencia o continuidad del flujo debido a intervención antrópica.
- 1. La modificación de los escurrimientos es grave y generalizada; requiere atención urgente.

0. No tengo información suficiente o prefiero no responder

- **Pregunta 4. Tendencias futuras sobre los efectos de las alteraciones del escurrimiento natural ¿Cómo consideras que evolucionará la condición de los escurrimientos naturales (arroyos, riachuelos, corrientes intermitentes o permanentes) en la subcuenca en los próximos años? Selecciona una opción.**

5. Mejorará significativamente: Se espera una recuperación notable del flujo y calidad del agua gracias al manejo integral de la subcuenca y la conservación del bosque.

4. Mejorará lentamente: Las acciones de restauración, reforestación y control de contaminación favorecerán la recuperación parcial de los caudales.

3. Permanecerá estable: No se prevén grandes cambios; los escurrimientos conservarán sus condiciones actuales, con variaciones estacionales normales.

2. Tendrá un deterioro gradual: Se observará menor caudal y calidad del agua en varios puntos, aunque algunos cuerpos de agua se mantendrán funcionales.

1. Empeorará significativamente: Los escurrimientos se reducirán o desaparecerán por pérdida de cobertura forestal, contaminación o sobreexplotación del agua.

0. No tengo información suficiente o prefiero no responder.

- **Pregunta 5. Condición actual de los ecosistemas de la subcuenca ¿Cuál considera que es actualmente la condición general de salud del ecosistema de la subcuenca ? Selecciona una opción.**

5. El ecosistema mantiene procesos ecológicos funcionales y estables, con alta cobertura vegetal y baja intervención humana.

4. El ecosistema presenta algunos signos de alteración, pero sus funciones ecológicas esenciales se mantienen activas.

3. Se observan desequilibrios moderados en el ecosistema, con fragmentación de hábitats y presión sobre los recursos naturales.

2. Hay evidencia clara de deterioro ecológico, pérdida de biodiversidad y alteración de los procesos naturales.

1. El ecosistema se encuentra gravemente afectado, con funciones ecológicas interrumpidas o colapsadas.

0. No tengo información suficiente o prefiero no responder

- **Pregunta 6. Tendencias futuras de los ecosistemas de la subcuenca ¿Cómo consideras que evolucionará la salud de los ecosistemas en la subcuenca en los próximos 10 años? Selecciona una opción.**

5. Mejorará notablemente: Se espera una recuperación ecológica significativa gracias a esfuerzos de conservación y mayor conciencia ambiental.

4. Mejorará lentamente: Las acciones de restauración, reforestación y manejo sostenible comenzarán a mostrar resultados.

3. Permanecerá estable: No se prevén grandes cambios; los ecosistemas conservarán sus condiciones actuales.

2. Tendrá un deterioro gradual: Algunos ecosistemas se mantendrán, pero la mayoría seguirán mostrando pérdida de funcionalidad y biodiversidad.

1. Empeorará significativamente: Continuará el deterioro de los ecosistemas debido a la deforestación, contaminación o sobreexplotación.

0. No tengo información suficiente y prefiero no responder

SECCIÓN DE PREGUNTA ENFOCADA A: HÁBITAT Y BIODIVERSIDAD.

- **Pregunta 7. Calidad de la condición del hábitat De acuerdo con tus experiencias, ¿Cómo describirías la condición actual de los hábitats de la subcuenca? Selecciona una opción.**

- 5. Excelente estado: Ecosistemas bien conservados, conectados y con diversidad alta; mínima intervención humana.
- 4. Buen estado: Los hábitats mantienen cobertura, conectividad y especies representativas; las perturbaciones son limitadas.
- 3. Condición intermedia: Existen hábitats naturales funcionales, aunque con presiones locales y pérdida parcial de estructura o especies.
- 2. Degradados: Presentan alteraciones visibles por tala, incendios o expansión agrícola; poca conectividad entre fragmentos.
- 1. Muy degradados: Los hábitats están fragmentados o casi desaparecidos; alta pérdida de cobertura natural y escaso refugio para fauna.
- 0. No lo sé, o prefiero no contestar

- **Pregunta 8. Tendencia sobre la calidad del hábitat a futuro Considerando el manejo actual, ¿Cómo consideras que evolucionará la condición de los hábitats en la subcuenca en los próximos 10 años? Selecciona una opción.**

- 5. Mejorará significativamente: Se espera una recuperación de los hábitats, mayor conectividad y aumento de especies nativas por manejo sostenible y reforestación.
- 4. Mejorará lentamente: Las acciones de restauración o conservación comenzarán a mejorar la conectividad y la cobertura vegetal.
- 3. Permanecerá estable: No se prevén grandes cambios; los hábitats conservarán sus condiciones actuales con presiones moderadas.
- 2. Tendrá un deterioro gradual: Algunos hábitats se mantendrán, pero la tendencia general será de fragmentación y pérdida de calidad ecológica.
- 1. Empeorará significativamente: Continuará la pérdida de hábitats por deforestación, expansión urbana o contaminación; disminución de la conectividad ecológica.
- 0. No lo sé, o prefiero no contestar

- **Pregunta 9. Condición actual de la biodiversidad. ¿Cómo percibes la conservación de la biodiversidad (flora, fauna y hábitats naturales) en la subcuenca actualmente? Selecciona una opción.**

- 1. Muy deficiente conservación: Ecosistemas degradados o sustituidos casi por completo; pérdida de especies locales y erosión evidente.
- 2. Deficiente conservación: Predominan zonas alteradas; poca fauna nativa y vegetación reemplazada por cultivos o pastizales.
- 3. Regular conservación: Pérdida moderada de especies y fragmentación del hábitat; menor presencia de fauna y vegetación nativa
- 4. Buena conservación: Alta diversidad con ligeras alteraciones; aún hay especies silvestres y parches de vegetación natural.

5. Muy buena conservación: Ecosistemas casi intactos, abundancia de flora y fauna nativa, buena conectividad y bajo impacto humano.
0. No lo sé o prefiero no contestar

• **Pregunta 10. Tendencias futuras sobre la biodiversidad ¿Cómo consideras que evolucionará la biodiversidad (flora, fauna y hábitats naturales) en la subcuenca en los próximos años. Selecciona una opción.**

5. Mejorará significativamente: Las estrategias de manejo sostenible y protección ecológica fortalecerán la recuperación de especies y ecosistemas.
4. Mejorará lentamente: Las acciones de reforestación o conservación empezarán a mostrar resultados en algunas zonas.
3. Permanecerá estable: No se prevén grandes cambios; la biodiversidad seguirá en condiciones similares a las actuales.
2. Tendrá un deterioro gradual: Se mantendrán algunas áreas naturales, pero la tendencia general será de disminución.
1. Empeorará rápidamente: Continuará la pérdida de especies y hábitats por deforestación, urbanización o contaminación.
0. No lo sé o prefiero no contestar

SECCIÓN DE PREGUNTA ENFOCADA A: CUERPOS DE AGUA Y BOSQUES.

• **Pregunta 11. Cuerpos de agua En la subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco, existen cuerpos de agua y arroyos los cuales son considerados importantes para el abastecimiento de la sociedad. ¿Has visto alguna disminución en los cuerpos de agua como en lagos o arroyos (Si o no)? ¿Cuántos centímetros has visto que ha disminuido?**

• **Pregunta 12. Estado actual sobre la salud de los bosques de la subcuenca Desde tu experiencia ¿Cuál consideras que es la condición de la salud de los bosques en la subcuenca? Selecciona una opción.**

5. Excelente salud: Ecosistemas equilibrados, alta vitalidad de árboles y diversidad estable; sin afectaciones significativas.
4. Buena salud: Vegetación vigorosa, regeneración natural presente y pocos signos de alteración o plagas.
3. Salud regular: Bosques parcialmente afectados, con algunos signos de estrés pero con capacidad de recuperación.
2. Salud deficiente: Se observan daños visibles por plagas, tala o incendios; regeneración baja y pérdida de cobertura.
1. Muy mala salud: Bosques con árboles secos o enfermos, poca regeneración y alto grado de deterioro ecológico.
0. No lo sé o prefiero no contestar

• **Pregunta 13. Tendencias futura y factores que afectan la salud de los bosques ¿Cuáles consideras que son los principales factores que están afectando la salud de los bosques en la subcuenca? Selecciona todos los que correspondan.**

5. Cambio de uso de suelo: Sustitución del bosque por agricultura, ganadería o zonas urbanas
4. Incendios forestales: Daños recurrentes que impiden la regeneración y afectan la estructura del bosque.
3. Plagas o enfermedades: Afectación visible en árboles o pérdida de vitalidad en ciertas especies.
2. Aprovechamiento no controlado: Tala, extracción o manejo inadecuado de recursos forestales.
1. Falta de manejo o abandono: Ausencia de acciones de restauración o mantenimiento forestal.
0. No lo sé o prefiero no contestar.

- **Pregunta 14. Problemáticas y amenazas presentes en la subcuenca. ¿Consideras que existen amenazas o problemáticas que afecten al agua dentro de la subcuenca? Si la respuesta fue si, Describe brevemente cuales. Por favor menciona 3 al menos.**
- **Pregunta 15. Origen de la problemática Considerando la pregunta 14. ¿Consideras que esto es un problemas de escasez o de gestión de recurso hídrico?**
- **Pregunta 16. Condición de la lluvia en la subcuenca. Considerando tu experiencia. ¿Considera que la precipitación dentro de la subcuenca ha disminuido o aumento en los últimos años?**
- **Pregunta 17. Gestión de las autoridades ambientales en la atención y manejo de los problemas ¿Cómo evalúas la gestión de las autoridades ambientales en la atención y manejo de los problemas que afectan los escurrimientos naturales y la salud de los ecosistemas en la subcuenca? Selecciona una opción.**
- 5. Excelente gestión: Las autoridades actúan con eficacia, promoviendo participación social, manejo integral y recuperación de ecosistemas.
- 4. Buena gestión: Se observan esfuerzos sostenidos, coordinación interinstitucional y mejoras tangibles en conservación o restauración.
- 3. Gestión regular: Las autoridades muestran interés y aplican programas, aunque con recursos limitados y resultados parciales.
- 2. Deficiente gestión: Se realizan algunas acciones aisladas, pero sin continuidad ni impacto significativo en la mejora ambiental.
- 1. Muy deficiente gestión: No existen acciones efectivas; hay poca vigilancia, descoordinación institucional y ausencia de resultados visibles.
- 0. No lo sé o prefiero no contestar
- **Pregunta 18. Propuestas de manejo de los problemas En tu opinión, ¿Qué acciones o estrategias podrían mejorar la gestión de las autoridades**

ambientales ante los problemas que afectan los ecosistemas y escurrimientos de la subcuenca? Selecciona una opción.

5. Fortalecer la coordinación interinstitucional: Mejorar la comunicación y trabajo conjunto entre dependencias locales, estatales y federales.
4. Aumentar la vigilancia y aplicación de la ley: Supervisar actividades ilegales (tala, contaminación, cambio de uso de suelo) y sancionar incumplimientos.
3. Impulsar la participación comunitaria: Involucrar a los habitantes en el monitoreo, reforestación y cuidado de los cuerpos de agua
2. Asignar mayores recursos y personal técnico: Incrementar presupuesto y capacidad operativa para programas ambientales.
1. Rediseñar planes integrales de manejo de cuencas: Basados en información científica y participación local.
0. No lo sé, o prefiero no contestar

- **19. Condición general del ecosistema De acuerdo con los antecedentes que conoces, ¿Cuál consideras que es la condición general del ecosistemas? Selecciona una opción.**

5. La condición es excelente y no existen problemas graves en la subcuenca.
4. La condición es buena, existen problemas pero no son graves
3. La condición no es ni buena ni mala
2. La condición es mala, y existen varios problemas en la subcuenca que están empeorando
1. La condición es pésima, existen problemas en toda la subcuenca que empeoran de manera alarmante
0. No lo sé o prefiero no contestar.

- **20. Condición general del ecosistema En tu experiencias y conocimiento. ¿Cuáles temas consideras serian importantes estudiar en futuras investigaciones?**

¡ Muchas gracias por tu participación !

Agradecemos profundamente tu tiempo, disposición y conocimientos compartidos al responder este cuestionario. Tu participación es fundamental para comprender la situación ecológica de la subcuenca Valle de Bravo– Amanalco desde una perspectiva de expertos de la región.