



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**Facultad de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería Química
Facultad de Biología**

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

“Modelación de la carga de nitrógeno total y de fósforo total en la subcuenca del río Cupatitzio, en la ciudad de Uruapan, Michoacán, mediante el programa QSWAT”

TESIS
que para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta:

Veronica Molina Rodriguez
Ingeniera Civil

Director de Tesis:

Dr. Ezequiel García Rodríguez

Co-director de Tesis:

M. en C. Ricardo Ruiz Chávez

Morelia, Michoacán, Enero 2025

Agradecimientos

Agradezco a:

Al Dr. Ezequiel García Rodríguez por su aporte en este trabajo, al M.C. Ricardo Ruiz Chávez por el apoyo que me brindo en mis proyectos profesionales, personales y por sus consejos, al Dr. Nelio Pastor Gómez por ser mi tutor y enseñarme a siempre tener un plan de acción, pero sobre todo por su valiosa amistad, a Juan Carlos López por apoyarme en los trámites administrativos de la maestría.

A Nandini Barbosa Cendejas por su amistad y apoyo, a mi madrina Yolanda Cendejas por brindarme palabras de aliento y un abrazo cuando lo necesito. A mis compañeras de la maestría Alondra, Estefany, Paola, quienes siempre hicieron amenas las clases y me ofrecieron su valiosa amistad.

A mis amigos incondicionales de la licenciatura Tariacuri, Ohdi, Carolina, Cristina, Leonardo, y a todos aquellos que han estado en mi formación académica y vida personal, que han aportado de manera directa o indirecta.

A Norma García y Mario Araiza, quienes me dieron ánimos durante el primer año de mi maestría y me ofrecieron su amistad sincera.

Esta tesis me permitió viajar y realizar una estancia en la CSU Fresno en donde conocí a maravillosas personas a quienes me gustaría agradecer, al profesor Zhi Wang por recibirme en el laboratorio de hidráulica, a Andre Guimaraes por ser un amigo maravilloso que me recordó que con Dios todo es posible y por presentarme a la comunidad brasileña de Fresno, a Marina Lima, Rocío Cabrera por apoyarme en momentos difíciles y darme palabras de aliento, a mis compañeros de trabajo, Erik, Cesar, Jorge, Melissa por el ejemplo y calidez que me brindan, a mis tíos por siempre estar al pendiente de mí y de mi hijo, a mi hermano Fernando Molina y a su esposa Florentina por recibirme en su casa durante la estancia y orillarme a superarme, a buscar nuevas oportunidades.

Quiero no solo agradecer sino dedicar este trabajo a Dios, a mi padre Fernando Molina Pérez por presionarme a dar lo mejor de mí cada día, demostrarme que los sacrificios valen la pena y a siempre decirme que es necesario terminar lo que se empieza, a mi madre Verónica Rodríguez por darme amor incondicional, apoyo, amistad, por ser mi confidente y paño de lágrimas , y de manera especial quiero dedicar este trabajo a mi hijo Manuel Molina quien me inspira a seguir adelante, me fortalece y por quien cualquier obstáculo valdrá la pena superar, agradezco su amor y su confianza en mí.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	4
RESUMEN	5
PALABRAS CLAVE.....	5
ABSTRACT	6
KEYWORDS	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. MARCO TEÓRICO.....	11
3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA DEL RÍO CUPATITZIO.	25
Generalidades	25
Ubicación geográfica	25
Gestión del recurso hídrico	25
Uso de suelo	27
Fisiografía y Geomorfología	28
Geología	35
4. ANTECEDENTES	36
5. JUSTIFICACIÓN.....	52
6. HIPÓTESIS.....	52
7. OBJETIVOS	53
Objetivo general	53
Objetivos particulares	53
8. METODOLOGÍA.....	54
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS	67
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
11. DOCUMENTOS CONSULTADOS	78

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
BANDAS	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales
CESVEM	Comité Estatal de Sanidad Vegetal Estado de Michoacán
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CIMMYT	Centro Internacional del Mejoramiento de Maíz y Trigo
CLICOM	Climate Computing Project
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología de Agua
INEGI	Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica
m.s.n.m.	Metros Sobre el Nivel del Mar
OSGeo	Open Source Geospatial Foundation
QSWAT	Programa SWAT empleando el sistema de información geográfica QGIS
SIG	Sistema de Información Geográfica
SWAT	Soil and Water Assesment Tool
USDA	United States Department of Agriculture

RESUMEN

El aporte de los nutrientes constituidos por nitrógeno total y fósforo total, a las corrientes de agua superficiales de una cuenca, es un factor determinante en su deterioro, por lo que es importante conocer la magnitud de su presencia mediante datos obtenidos en campo, y realizar comparativas relativas a su evolución en diferentes escenarios. En el presente trabajo se utilizará el modelo QSWAT para modelar la subcuenca del río Cupatitzio en la ciudad de Uruapan, Michoacán, para determinar la magnitud de la presencia de nitrógeno total y de fósforo total, analizar los resultados considerando diferentes escenarios y proponer las medidas de mitigación correspondientes.

PALABRAS CLAVE

Modelación, QSWAT, nitrógeno total, fósforo total, río Cupatitzio.

ABSTRACT

The contribution of nutrients consisting of total nitrogen and total phosphorus to the surface water of a basin is a determining factor in its deterioration, so it is relevant to know the magnitude of their presence through data obtained in the field and to make comparisons regarding their evolution in different scenarios. In this work, the QSWAT model will be used to model the basin of the Cupatitzio River in the city of Uruapan, Michoacán, to determine the magnitude of the presence of total nitrogen and total phosphorus, analyze the results considering different scenarios and propose the corresponding mitigation measures.

KEYWORDS

Model, QSWAT, total nitrogen, total phosphorus, Cupatitzio river.

1. INTRODUCCIÓN

Aproximadamente el 71% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua. El agua es uno de los recursos naturales más importantes y utilizados por el ser humano, y entre los usos más comunes se encuentran el consumo humano, las actividades agrícolas, las actividades recreativas, la producción de electricidad y el uso para conservación ecológica, entre otros, de ahí la importancia de conservar y tratar dicho líquido vital.

Según el artículo “El agua en un mundo en crisis” (Rey Santos, 2014), el 96.5% del agua existente en el planeta es salada y se concentra en mares y océanos, el 1.72% se encuentra en los glaciares, el 0.78% en los acuíferos, y únicamente el 1% proviene de fuentes superficiales y, por lo tanto, es de fácil acceso para consumo humano.

La subcuenca del río Cupatitzio (ilustración 1), se ubicada en el Estado de Michoacán, más específicamente se localiza en los municipios de Uruapan, Nuevo San Juan Parangaricutiro y Tingambato. Esta subcuenca forma parte de la región Hidrológica 18, denominada Balsas, y se considera una de las áreas de mayor interés hortícola y silvícola de la parte central del estado de Michoacán, la cual provee agua a 11 presas que derivan para el riego de aproximadamente 22,550 ha de cultivo, y a tres presas para generación de energía eléctrica gestionadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA), 2005). Sin embargo, esta subcuenca sufre de deterioro ambiental, debido a que recibe contaminantes de tres orígenes principales: de los asentamientos humanos, de las industrias y de las actividades agrícolas, que en los últimos años se ha acentuado, drásticamente, por el cultivo de aguacate. Por lo tanto, se ha incrementado la contaminación del agua con residuos sólidos y líquidos, los cuales son vertidos al caudal del río y retenidos tanto en el agua superficial como en el agua subterránea. (Villacrés, 2018)

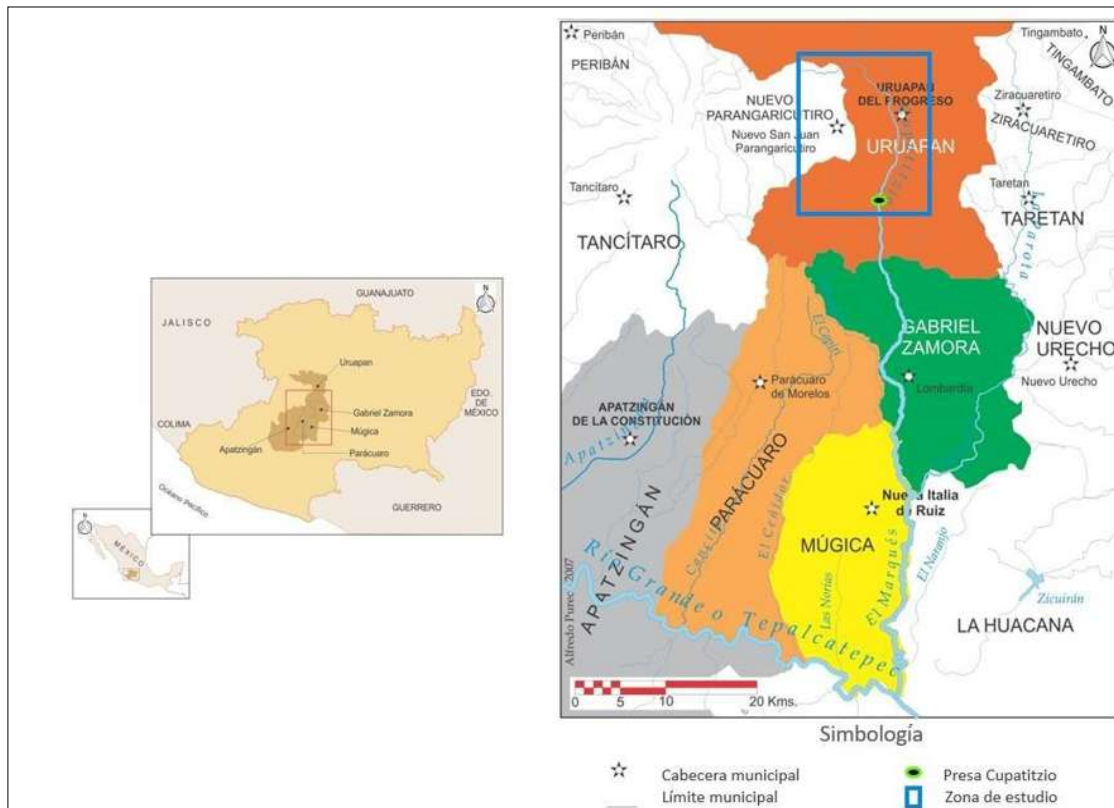


Ilustración 1. Localización de la zona en estudio (Pureco Ornelas, 2016)

La subcuenca en estudio se encuentra en el municipio de Uruapan, Michoacán y se emplearon las cartas topográficas E13B29, E13B49, E14A31, E14A41, E14A21, E13B59 del INEGI, en la ilustración 2 se muestra la cuenca del río Cupatitzio que se encuentra delineada con rojo, y la zona de estudio se encuentra en la misma, pero se puntualizará en los siguientes capítulos.

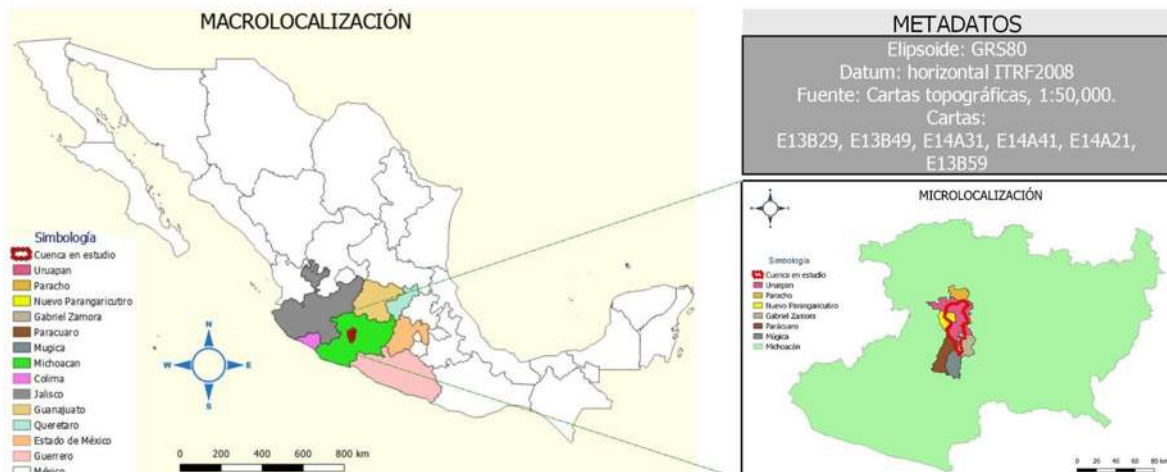


Ilustración 2. Localización de la cuenca del río Cupatitzio

El fósforo y el nitrógeno son dos nutrientes que se relacionan con la agricultura y la eutroficación de los cuerpos de agua, por lo tanto, se deben controlar sus descargas en las fuentes de agua superficiales.

El incremento en la cantidad de fósforo localizado en la biosfera terrestre, generado a partir del escurrimiento y lixiviación de campos agrícolas e instalaciones de producción animal, ha generado un desequilibrio ecológico, desencadenando proliferación de algas nocivas, cambios en la producción primaria de los ecosistemas y sus funciones, lo que a menudo conduce a una disminución de la biodiversidad y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. (Harrison *et al.*, 2019)

Es necesario implementar modelos que relacionen cuantitativamente el uso del suelo, crecimiento de la población, clima y los ciclos biogeoquímicos con el propósito de proporcionar una visión holística de las medidas de mitigación necesarias para disminuir los efectos negativos derivados de la producción excesiva de nutrientes como el fósforo total y el nitrógeno total.

En el presente trabajo se analizará información referente a la calidad del agua del río Cupatitzio, en el tramo comprendido entre el Parque Nacional Barranca del Cupatitzio y la Cortina de la Presa Cupatitzio, y su relación con el suelo de la subcuenca definida a partir de la cortina de la presa mencionada, con la finalidad de analizar la situación del tramo de río, con la ayuda del modelo QSWAT. Este modelo se utiliza, regularmente, para predecir y analizar los impactos debidos al aumento y/o disminución de las descargas contaminantes y, particularmente, a los cambios de uso de suelo, así como las respuestas hidrológicas debidas al manejo de la cuenca. Cabe mencionar que es importante seleccionar de manera cuidadosa los parámetros específicos del modelo, los cuales serán utilizados para definir las condiciones actuales, y con base en ellas, poder establecer las medidas que benefician el entorno ambiental del área en estudio.

El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), traducido al español como

“Herramienta de evaluación de suelo y agua”, es un modelo de simulación a escala, que se puede utilizar en cualquier cuenca hidrográfica, desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). El modelo SWAT se utiliza con frecuencia para predecir las respuestas hidrológicas, de calidad del agua y su interacción con los cambios en el uso del suelo, incluida la respuesta a la variación de la contaminación. (Neitsch *et al.*, 2005). Para emplear el modelo SWAT es necesario geolocalizar el área en estudio, de manera general, para dicho proceso se utilizan Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales por lo regular tienen un costo elevado, por lo que en la presente investigación se optó por el uso de una interfaz del SWAT conocida como QSWAT, el cual parte del software QGIS que es de libre uso y de código abierto, desarrollado a partir de un proyecto oficial de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), traducido al español como Fundación Geoespacial de Código Abierto. En la información subsiguiente, se referirá como QSWAT, al software que se pretende utilizar durante la investigación.

2. MARCO TEÓRICO

Una cuenca hidrográfica es el área de captación de donde proviene el recurso hídrico presente en los diferentes cuerpos de agua, como son los ríos, las lagunas, los humedales, manantiales, embalses, entre otros. También se puede considerar como una unidad básica para la gestión de los recursos hídricos, y como una cavidad natural en la que se acumula el agua. Antezana, J. N. (2022)

De acuerdo a lo escrito con anterioridad, es inevitable que el agua de nuestros hogares proceda de las cuencas hidrográficas, de ahí la importancia de mantener una buena calidad del líquido en dichas cuencas.

De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la diferencia entre una cuenca y una subcuenca es el territorio que abarca cada una de éstas, en otras palabras, una cuenca tiene una extensión mayor a 50,000 ha, mientras que una subcuenca puede tener entre 5,000 y 50,000 ha. Cabe mencionar que si el área es menor a las 5,000 ha, se considera como microcuenca. (IMTA, 2019)

El nitrógeno y el fósforo son elementos importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas ya que son nutrientes que existen en el aire, agua y suelo.

La productividad y dinámica de los ecosistemas está limitada a la disponibilidad de nutrientes. Para las plantas la disponibilidad de nitrógeno (N) es la principal limitante en la productividad de los cultivos, que junto con el fósforo (P) determinan el crecimiento vegetal. (Gutiérrez *et al.*, 2012)

La productividad vegetal de un suelo depende de la incorporación del nitrógeno a través de un proceso mediado principalmente por microorganismos del suelo, dicha dinámica consiste básicamente en la fijación de nitrógeno, mineralización, nitrificación y la oxidación anaeróbica del ion amonio. (Hu *et al.*, 2011)

El contenido total del nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. El contenido en nitrógeno orgánico se determina con el método Kjeldahl.

El nitrógeno (N_2) es el elemento que se encuentra en forma libre (estado gaseoso) y en mayor abundancia en la atmósfera (78%). Los seres vivos cuentan con una gran proporción de nitrógeno en su composición química. El ciclo del nitrógeno es un proceso a través del cual el nitrógeno se mueve de la atmósfera a la tierra,

liberándose nuevamente a la atmósfera.

En la ilustración 3, se muestran las relaciones orgánicas y minerales en el ciclo del nitrógeno. Los cuadros negros muestran las entradas al sistema; los procesos y factores se encuentran sin recuadro, y finalmente, las letras MO se refieren a la materia orgánica.

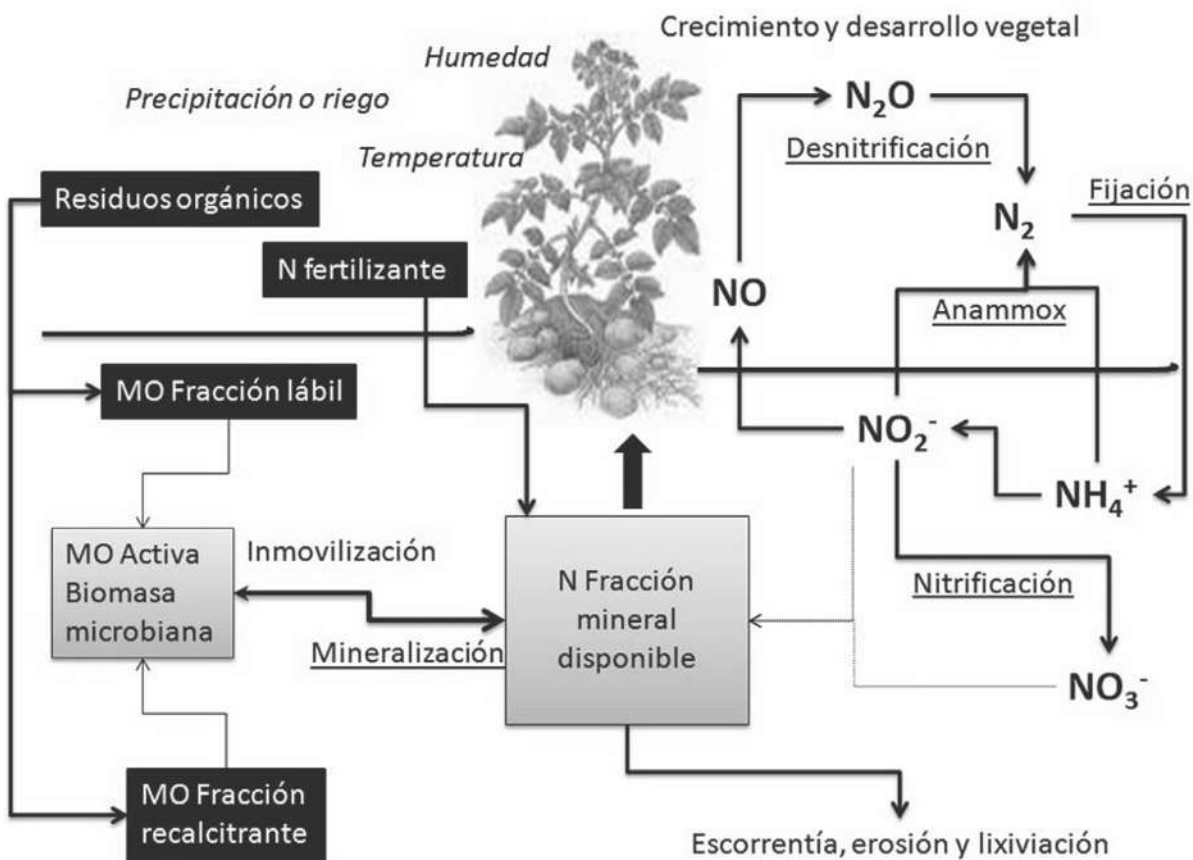


Ilustración 3 . Ciclo biogeoquímico del Nitrógeno (Gutierrez et al., 2012) Los cuadros negros muestran las entradas al sistema; los procesos y factores se encuentran sin recuadro, y finalmente, las letras MO se refieren a la materia orgánica.

El ciclo del nitrógeno, que se muestra en la ilustración 4, consta de 5 procesos.



Ilustración 4 . Ciclo del Nitrógeno

Los procesos del ciclo del Nitrógeno se explican brevemente a continuación:

- 1) Fijación: Se realiza mediante microorganismos fijadores principalmente bacterias (Cianobacterias) y fenómenos meteorológicos que incluyen descargas eléctricas.
- 2) Amonificación: Se realiza a través de bacterias (azotobacter, klebsiella, clostridium, rhizobium) y hongos. Los seres vivos (plantas y animales) comienzan a descomponerse con el tiempo cuando mueren, liberando materia orgánica que contiene nitrógeno y las bacterias al alimentarse de restos del nitrógeno lo transforman en forma de amoniaco (NH_3) o amonio (NH_4).
- 3) Nitrificación: El nitrógeno en forma de amoniaco (NH_3) o amonio (NH_4) se transforma en nitritos (NO_2^-) por las bacterias nitrosomonas oxidando en amoniaco y a su vez las bacterias nitrobacter oxidan los nitritos a nitratos (NO_3^-) esta acción se realiza por los microorganismos.

4) Asimilación: Las plantas pueden asimilar nitratos y amonios a través de sus raíces. Las células vegetales sintetizan aminoácidos que contienen una porción de nitrógeno. Los animales consumen plantas, asimilando el nitrógeno y cuando estos animales mueren se descomponen y, por lo tanto, se recircula a la etapa de amonificación realizando un ciclo interno, se debe tomar en cuenta que la urea y los desechos de animales también contienen nitrógeno y son descompuestos por las bacterias en el suelo y agua convirtiéndolos en amonio.

5) Desnitrificación: Una parte del nitrógeno no está presente en las plantas y animales, sigue presente en el suelo o agua, y su descomposición es llevada a cabo por las bacterias desnitrificantes (*pseudomonas*) revirtiendo la acción de fijadoras de nitrógeno regresándolo a la atmosfera en forma gaseosa.

El nitrógeno existe de manera inorgánica y orgánica en el agua. El nitrógeno inorgánico está presente como nitrito y nitrato (de manera oxidada), mientras que el nitrógeno orgánico se encuentra en formas complejas como ácidos húmicos, aminoácidos, proteínas y urea. Antes de ser nutriente, el nitrógeno orgánico se convierte en amoniaco. El nitrógeno total (NT) representa la suma de todas las formas de nitrógeno en una muestra de agua cualquiera. En los ecosistemas acuáticos todas las formas de nitrógeno son inofensivas para los organismos acuáticos, a excepción del amoniaco no ionizado y el nitrito, los cuales pueden ser tóxicos para los peces.

Es importante mencionar que los nitratos son una forma de nitrógeno que todas las plantas necesitan para crecer. Es común emplear los fertilizantes con nitrógeno para enriquecer el suelo. Desafortunadamente, los nitratos pueden contaminar las aguas subterráneas y superficiales (Universidad de Florida, 2005).

Como se mencionó anteriormente, la presencia del fósforo es clave para la productividad en cultivos, ya que dicho elemento se requiere para favorecer la formación de semillas, el desarrollo radicular, la fuerza de las pajas en los cereales y la maduración de los cultivos. (Gutiérrez *et al.*, 2012)

El fósforo (P) es un elemento que no existe en estado gaseoso, por tal motivo no se encuentra en la atmosfera, también es un elemento esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos, en las aguas superficiales existen proliferaciones incontroladas de algas por causa de las descargas de aguas residuales domésticas, industriales y a través de escorrentías naturales. El ciclo del fósforo es de fundamental importancia ya que describe el movimiento y transformación del fósforo dentro de algunas etapas de los ecosistemas. El fósforo se encuentra de manera abundante en sistemas rocosos en forma de fósforo inorgánico y en los seres vivos en forma de fósforo orgánico. El ciclo del fósforo se caracteriza por ser un ciclo lento. Sus etapas principales son la liberación de fósforo a través de la meteorización, encontrándose en la intemperie, efectos de lluvia, erosión, minería, fertilizantes, etc., absorción de las plantas, consumo por los organismos esto se realiza mediante la cadena trófica, descomposición y mineralización, sedimentación y liberación, dicho ciclo se muestra en la ilustración 5.

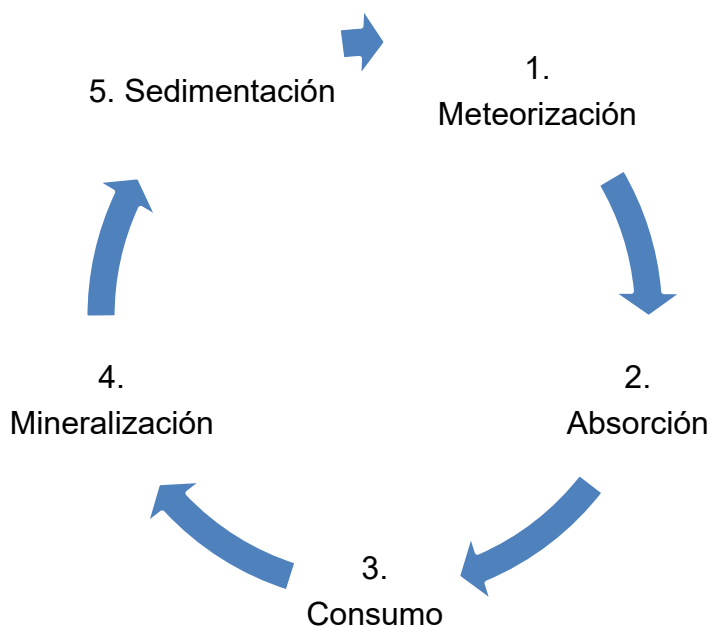


Ilustración 5 . Ciclo del fósforo

De acuerdo a Ibáñez, J. J. (2009), las etapas del ciclo del fósforo son las siguientes:

- 1) **Meteorización (liberación del fósforo).** Las rocas y minerales fosfatados se descomponen con la acción de agentes erosivos como el agua, temperatura y viento liberando fosfatos (PO_4^{3-}) y liberando el fósforo hacia el suelo.
- 2) **Absorción de las plantas:** Los fosfatos están presentes en el suelo y las plantas lo absorben a través de sus raíces.
- 3) **Consumo por los organismos:** Se realiza mediante la cadena trófica (productor, consumidor primario, consumidor secundario, consumidor terciario y descomponedores), algunos animales se alimentan de estas plantas o de otros animales que lo hayan obtenido y que contengan fosfatos en sus tejidos.
- 4) **Descomposición y mineralización:** Los microorganismos descomponedores actúan cuando mueren las plantas y los animales. Liberándose fosfatos de nuevo al suelo o al agua.
- 5) **Sedimentación y liberación:** Se realiza una formación de rocas fosfatadas debido a los fosfatos disueltos en el agua que pueden acumularse en los sedimentos del fondo de los cuerpos de agua, los sedimentos pueden comprimirse o solidificarse con el paso del tiempo formando rocas. Con el movimiento de las placas tectónicas pueden ser empujadas al interior de la tierra liberándose nuevamente durante alguna actividad volcánica en forma de gases o cenizas volcánicas.

El elemento del fósforo proviene de las apatitas (minerales localizados en piedras de origen volcánico), y en depósitos de fosfato natural, liberado a través de procesos de meteorización, lixiviación, erosión. Es posible obtener el fósforo a través de extracciones industriales en depósitos naturales de fosfato, una vez extraído, se emplea como fertilizante.

La industria es también una fuente de fósforo y nitrógeno, pero en menor proporción

que las aguas residuales municipales y agrícolas.

En la ilustración 6 se muestran las relaciones entre el ciclo biogeoquímico del fósforo y sus compartimientos orgánicos y minerales.

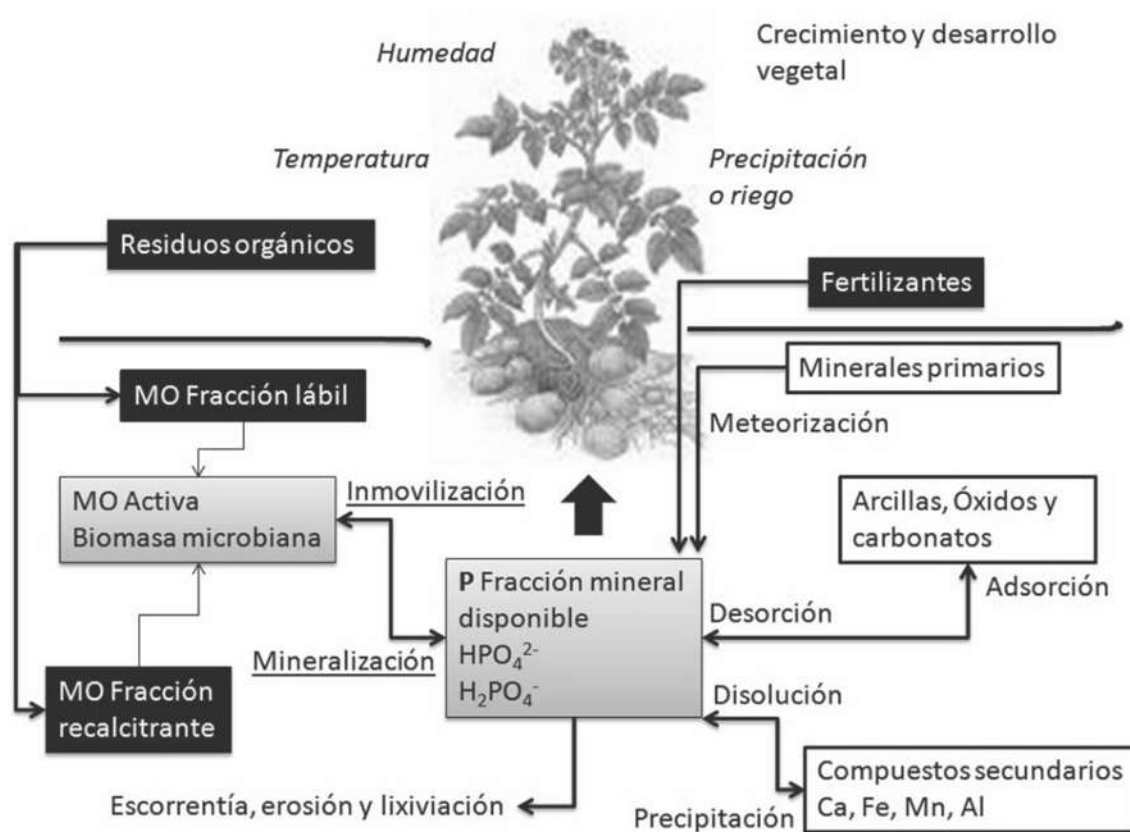


Ilustración 6. Ciclo biogeoquímico del Fósforo (Gutierrez et al., 2012) Los cuadros negros de la ilustración son las entradas al sistema, los cuadros sin color son los procesos y factores de influencia.

Los nutrientes de nitrógeno y fósforo son críticos para el buen desarrollo en los ecosistemas, ya que el nitrógeno contribuye a la producción de aminoácidos, ácidos nucleicos, vitaminas esenciales para los seres vivos, además de ser muy útil en la producción agrícola; por otro lado, el fósforo es necesario para la formación de los ácidos nucleicos, almacenamiento y transferencia de energía al ser un componente del ATP (Trifosfato de Adenosina), es esencial para la síntesis en la construcción de las membranas celulares y, a nivel industrial, se emplea en la fabricación de algunos detergentes y fertilizantes artificiales. El fósforo total (P) se determina en una muestra sin filtrar y es la suma de todos los fosfatos insolubles y disueltos

presentes.

Sin embargo, diversas actividades humanas, como el empleo excesivo de fertilizantes artificiales, perturban gravemente los ciclos biogeoquímicos del fósforo y del nitrógeno, provocando eutrofización en cuerpos de agua superficiales, este proceso se deriva de la lixiviación de los nutrientes mencionados. La eutrofización da lugar a la proliferación de algas en cuerpos de agua, reduciendo considerablemente la filtración de la luz solar y de esta manera reduciendo la producción de oxígeno por organismos fotosintéticos, ocasionando la muerte de la fauna acuática presente en el cuerpo de agua afectado.

La eutrofización es el crecimiento excesivo de algas en los cuerpos de agua debido al exceso de nutrientes, lo que es malo para los ecosistemas acuáticos y puede afectar la calidad del agua en las aguas superficiales, lo que puede suponer una amenaza para el bienestar humano. (Liu et al ,2021) Este problema mundial se produce principalmente por las actividades humanas, así como por la escorrentía agrícola, que libera nitrógeno (N) y fósforo (P) procedente de fertilizantes y pesticidas; otras fuentes contaminantes son los vertidos industriales y las aguas residuales urbanas. La mayoría de los contaminantes del agua que causan eutrofización son contaminantes de fuentes no puntuales, y puede resultar complicado definir su origen, así como proponer prácticas de mitigación.

Es importante entender que la eutrofización es un problema global que afecta a lagos y ríos, así como a importantes cuerpos de agua en China, América, Europa y África. (Xia et al, 2020) Este problema ha sido documentado y estudiado durante décadas, pero su impacto negativo ha sido mayor en los últimos años debido al aumento de la población humana, la intensificación agrícola y la industrialización.

La eutrofización también es un proceso natural, como el envejecimiento de los lagos que pasan de cuerpos de agua oligotróficos a eutróficos (Zhang et al, 2020); las actividades humanas aceleran este proceso. La carga de nutrientes proveniente de la escorrentía agrícola, la descarga de aguas residuales y la deposición atmosférica proveniente de las actividades industriales son los principales productores del proceso de eutrofización (Xia et al, 2020).

La eutrofización altera el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y provoca algunos

de los siguientes problemas: (Zhang et al, 2020). Floraciones de algas: el crecimiento excesivo de algas, en particular de cianobacterias, disminuye los niveles de oxígeno y crea condiciones hipóxicas que matan la vida acuática. Las floraciones de cianobacterias liberan toxinas nocivas para los seres humanos y la vida silvestre. (Kakade, A. et al, 2021)

La eutrofización crea áreas con bajos niveles de oxígeno, llamadas zonas muertas, donde la vida acuática no puede sobrevivir. (Akinlawo, S. O., 2023)

La eutrofización produce agua con mal olor que no es apta para beber, para la recreación ni para otros usos. (Akinlawo, S. O., 2023)

Los investigadores y los responsables políticos han creado estrategias para combatir la eutrofización con tres enfoques principales:

El primero es el control en la fuente para minimizar el aporte de nutrientes, reduciendo la liberación de N y P en la fuente, principalmente proveniente de actividades agrícolas, así como la labranza de conservación, prácticas como la labranza reducida y la labranza cero protegen el suelo de la erosión, mejoran la estructura del suelo y benefician la infiltración, reduciendo la escorrentía de nutrientes. El manejo de la fertilización, que optimiza la aplicación y colocación de fertilizantes, mejora los nutrientes y minimiza las pérdidas. (Xia et al, 2020)

El segundo es el control de procesos mediante la interceptación y filtrado de la escorrentía: esto significa capturar y tratar la escorrentía antes de que entre a los cuerpos de agua, zanjas ecológicas que están diseñadas para eliminar nutrientes de la escorrentía a través de una combinación de absorción por las plantas, actividad microbiana, sorción y sedimentación, las franjas de plantas a lo largo de los cursos de agua también atrapan y filtran los contaminantes de la escorrentía. (Xia et al, 2020)

Finalmente, el tercero es el tratamiento final, que consiste en eliminar los contaminantes de las aguas receptoras; esto significa tratar el agua después de que ha recibido la escorrentía. Los humedales artificiales también son una buena opción, ya que los sistemas de filtración natural eliminan los nutrientes y otros contaminantes; son rentables y respetuosos con el medio ambiente, pero pueden verse limitados por la disponibilidad de tierra porque necesitan mucho espacio.

(Kakade, A. et al, 2021) El tratamiento microbiano es un tratamiento final que utiliza microorganismos para descomponer los nutrientes. Esto es rentable y minimiza la contaminación secundaria. Se emplean muchos tipos de microorganismos, como bacterias, hongos y microalgas, y las microalgas tienen el beneficio adicional de producir biocombustibles. (Liu et al ,2021)

Las tecnologías y técnicas avanzadas como la electrocoagulación, los lodos activados y la separación por membranas también son eficaces, pero a menudo requieren un alto consumo de energía, equipos especializados y una gestión cuidadosa. (Xia et al, 2020)

La mejor opción para mitigar el problema de la eutrofización es integrar diferentes enfoques; ninguna tecnología puede resolverlo por sí sola. Para lograr resultados y éxito a largo plazo, es necesario contar con estrategias integradas que combinen el control de la fuente, el control del proceso y el tratamiento final. (Yang, C., et al, 2020) El control eficaz de la eutrofización requiere tecnologías adaptables a las condiciones locales y a la economía; lo más difícil es minimizar los costos. Encontrar soluciones que sean eficaces para reducir las cargas de nutrientes y promover la restauración ecológica y la sostenibilidad es crucial para proteger el medio ambiente y nuestro interés en la calidad del agua en los cuerpos de agua superficiales.

Para las perspectivas futuras, es esencial desarrollar tecnologías más rentables y sostenibles, mejorar la eficiencia de las tecnologías existentes, encontrar formas más efectivas de combinar diferentes tecnologías en sistemas de gestión integrales, obtener una mayor comprensión de los complejos procesos involucrados en el ciclo de nutrientes y la eutrofización, y es necesario que el gobierno produzca políticas sólidas, regulaciones y prácticas de gestión efectivas para abordar la eutrofización, esto significa: promover las mejores prácticas para el uso de fertilizantes y la aplicación de pesticidas en la agricultura, fomentar técnicas de riego que ahorren agua, invertir en investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles, aumentar la conciencia pública sobre la importancia del agua limpia y el papel de las acciones individuales en la reducción de la eutrofización.

La contaminación producida por el uso excesivo de agroquímicos se encuentra en la clasificación de contaminantes por fuentes difusas, que de acuerdo con

(Fernández Cirelli, A., 2012)., La contaminación de origen puntual es fácil de detectar y es posible limitarla. En cambio, no es posible afirmar lo mismo sobre la contaminación de origen no puntual, que proviene en gran parte de la agricultura. Los contaminantes agrícolas, con los sedimentos provenientes del suelo erosionado, el fósforo adsorbido a las partículas del suelo, las bacterias en suspensión, los nitratos disueltos y otros minerales y los plaguicidas en suspensión o soluciones no se pueden asociar fácilmente con una fuente u origen concreto. Tanto en un caso como en el otro, lo que se produce es una degradación del recurso. Normalmente se intenta primero solucionar el problema de las fuentes puntuales, para después establecer una estrategia de limitación de las fuentes no puntuales. El manejo de las fuentes de contaminación puntuales se soluciona con medidas estructurales, donde la limitante normalmente es económica. En el caso de las fuentes no puntuales, deben aplicarse medidas no estructurales de difusión y concientización.

El SWAT es un modelo de simulación que incluye componentes para simular el clima, la hidrología, los sedimentos, el suelo, los cultivos, los nutrientes, los pesticidas y la gestión agrícola. (Arnold *et al.*, 2013)

Para la implementación de dicho modelo es necesaria la recopilación de datos de entrada que se dividen de la siguiente manera:

Modelo digital de elevación (MDE) el cual provee datos topográficos del terreno, la fuente es la página del continuo de elevaciones mexicano (INEGI, 2016). El MDE es requerido por el programa SWAT para delimitar la cuenca hidrográfica, así como determinar los escurrimientos. De igual manera se pide un mapa de uso de suelo y vegetación, al igual que del tipo de suelo en archivos tipo ráster elaborados a partir de imágenes satelitales y mapas obtenidos de la página oficial del (INEGI, 2016). La imagen fue procesada mediante el programa QGIS (GDALSOFTWARE-SUITE, NETELER, & MITASOVA, 2016).

En el manejo del programa SWAT es importante conocer las ecuaciones que se emplean para la modelación.

El aporte de sedimentos transportados por el flujo superficial, en un periodo de tiempo determinado, se puede calcular mediante la ecuación 1:

$$SY_t = 11.8 * (H_t T_t^{peak} * A_{hru})^{0.56} * K_s * C * P * L * S * CFRG \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

SY_t es el aporte de sedimentos transportados por el flujo superficial en un día determinado (toneladas).

H_t es el volumen de esorrentía superficial diaria (mm).

T_t^{peak} es la tasa de esorrentía máxima (m^3/s).

A_{hru} es el área de la unidad de respuesta hidrológica por hectárea.

K_s es un factor de erosión.

C es el factor de cobertura y manejo del suelo.

P es el factor de prácticas de manejo de cultivo.

L es un factor topográfico de longitud.

S es un factor topográfico de pendiente.

$CFRG$ es el factor de fragmentos gruesos.

El $CFRG$ se calcula mediante la ecuación 2:

$$CFRG = \exp(-0.053 * rock) \quad (\text{Ecuación 2}).$$

Donde:

$rock$ es el porcentaje de partículas de suelo con un diámetro superior a 2 mm en la primera capa de suelo (%).

La carga total de sedimentos que llega a la corriente, ST_t , se calcula como se muestra en la ecuación 3:

$$ST_t = S_t^S + S_t^{LG} \quad (\text{Ecuación 3}).$$

Donde:

S_t^S es la esorrentía superficial.

S_t^{LG} es el flujo lateral y subterráneo.

El sedimento transportado por la escorrentía superficial, S_t^S , se calcula a partir de la ecuación 4:

$$S_t^S = (SY_t + SY_{t-1}) * \left(1 - \exp\left[-\frac{surlag}{T^{conc}}\right]\right) \quad (\text{Ecuación 4}).$$

Donde:

SY_t es el aporte total de sedimentos de la cuenca, suponiendo que una parte es retenida temporalmente en la cuenca por la vegetación o en estanques.

S_t^S es el sedimento que llega al cauce en el día t (toneladas).

SY_t es la cantidad de carga de sedimento generada en la unidad de respuesta hidrológica en un tiempo cualquiera (t). en toneladas.

SY_{t-1} es la cantidad de carga de sedimento generada en la unidad de respuesta hidrológica en un tiempo cualquiera (t-1) en toneladas.

T^{conc} es el tiempo de concentración de la unidad de respuesta hidrológica en horas.

$surlag$ es el coeficiente de retraso de la escorrentía superficial.

El modelo SWAT asume que el flujo lateral y subterráneo transporta sedimentos al cauce principal y estima esta carga mediante la ecuación 5:

$$S_t^{LG} = \frac{(L_t + G_t) * A_{hru} * SC}{1000} \quad (\text{Ecuación 5}).$$

Donde:

S_t^{LG} es la carga de sedimento en el flujo lateral y subterráneo en toneladas.

L_t es el flujo lateral para un día dado en mm.

G_t es el flujo subterráneo para un día dado en mm.

A_{hru} es el área de la unidad de respuesta hidrológica en km².

SC es la concentración de sedimento en el flujo lateral y subterráneo, especificada por el usuario, en mg/L.

El modelo SWAT considera dos formas inorgánicas de nitrógeno (nitrato (NO₃⁻) y nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) y tres formas orgánicas de nitrógeno (N activo, estable

y orgánico fresco), así como tres formas orgánicas de fósforo (P activo, estable y orgánico fresco), y tres formas inorgánicas de fósforo (P estable, activo y mineral en solución). (Mendonça dos Santos *et al.*, 2020)

3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA DEL RÍO CUPATITZIO.

Generalidades

La cuenca del río Cupatitzio tiene una gran relevancia en la región, ya que sus aguas actualmente se disponen para varios usos y aprovechamientos, destacando, principalmente, el uso urbano para la ciudad de Uruapan y el riego de aproximadamente 22,550 ha. de cultivo mediante 11 presas derivadoras y 3 presas para generación de energía eléctrica pertenecientes a la CFE (CONAGUA, 2015).

El tramo en estudio, de la cuenca, se focalizará en la ciudad de Uruapan debido a su importancia en la extracción de agua y manejo de la cuenca. De acuerdo a datos del INEGI (2020), la ciudad de Uruapan es la segunda ciudad con mayor población en el Estado de Michoacán de Ocampo, con 356,786 habitantes según el censo realizado en el año 2020.

Ubicación geográfica

La cuenca del río Cupatitzio pertenece a la Región Hidrológica No.18 (Río Balsas), se localiza al noroeste del estado de Michoacán, abarcando los municipios de Uruapan, Gabriel Zamora, Francisco. J. Múgica, Nuevo Parangaricutiro y Parácuaro, y se encuentra entre los paralelos 19°11' y 19°38' de latitud norte; los meridianos 101°56' y 102°24' de longitud oeste; a una altitud de entre 700 y 300 m, con una altura media de 1425 m, y con un área de 78,260 ha. (INEGI, 2010)

Gestión del recurso hídrico

Según datos del Registro Público de los Derechos de Agua (REPDa) de la CONAGUA, consultados en el Instituto Municipal de Planeación de Uruapan (IMPLAN, 2020), y contrastados con los volúmenes de extracción para diversas actividades económicas en el caso del municipio, se han otorgado 617 títulos de aprovechamiento, siendo el uso agrícola el que concentra la mayor cantidad, con un 64.67% de los mismos, y la generación de energía eléctrica el que menos concentra con el 0.49%. No obstante, en lo referente al volumen de extracción, la

generación de energía eléctrica es la actividad que utiliza el mayor volumen, con un 89.96%, seguida por el sector agrícola con un 6.38%.

El río Cupatitzio es la corriente superficial más importante del municipio, principal corriente aportadora del Río Márquez que finalmente descarga sus aguas al Río Tepalcatepec, a unos 45 Km. antes de la confluencia de este último con el Balsas. El Río Cupatitzio presenta un régimen intermitente desde su nacimiento, al noroeste de la ciudad de Uruapan, en el cerro El Pario a una altitud de 2750 m s. n. m., hasta el Parque Nacional Barranca del Cupatitzio, donde recibe aportaciones importantes de una serie de manantiales que, a partir de este sitio, proporcionan un carácter perenne a su régimen de escurrimientos; entre los principales manantiales se encuentran: “La Rodilla del Diablo”, “La Hierbabuena”, “El Pescadito”, “La Tamacua”, “El Padre”, “Gandarilla” y “El Gólgota”. Prosigue su cauce con una dirección hacia el sur, a través de una región boscosa de topografía accidentada, hasta la presa derivadora Zumpimito, donde se aprovechan sus aguas para generar electricidad en la planta del mismo nombre. (Pureco, 2016).

Uso de suelo

Empleando el sistema de información geográfica QGIS se realizó el mapa de uso de suelo de la ilustración 7, en donde se designó la nomenclatura mostrada que consiste en 4 letras mayúsculas para poder generar una base de datos que se introduce al programa SWAT, asignadas de acuerdo a las características del manejo de la cobertura y uso de suelo en la zona de estudio:

WATR = cuerpo de agua

AGRL = suelo destinado a agricultura

PAST = pastizales para consumo ganadero

FRST = bosques

URBN = zona urbana

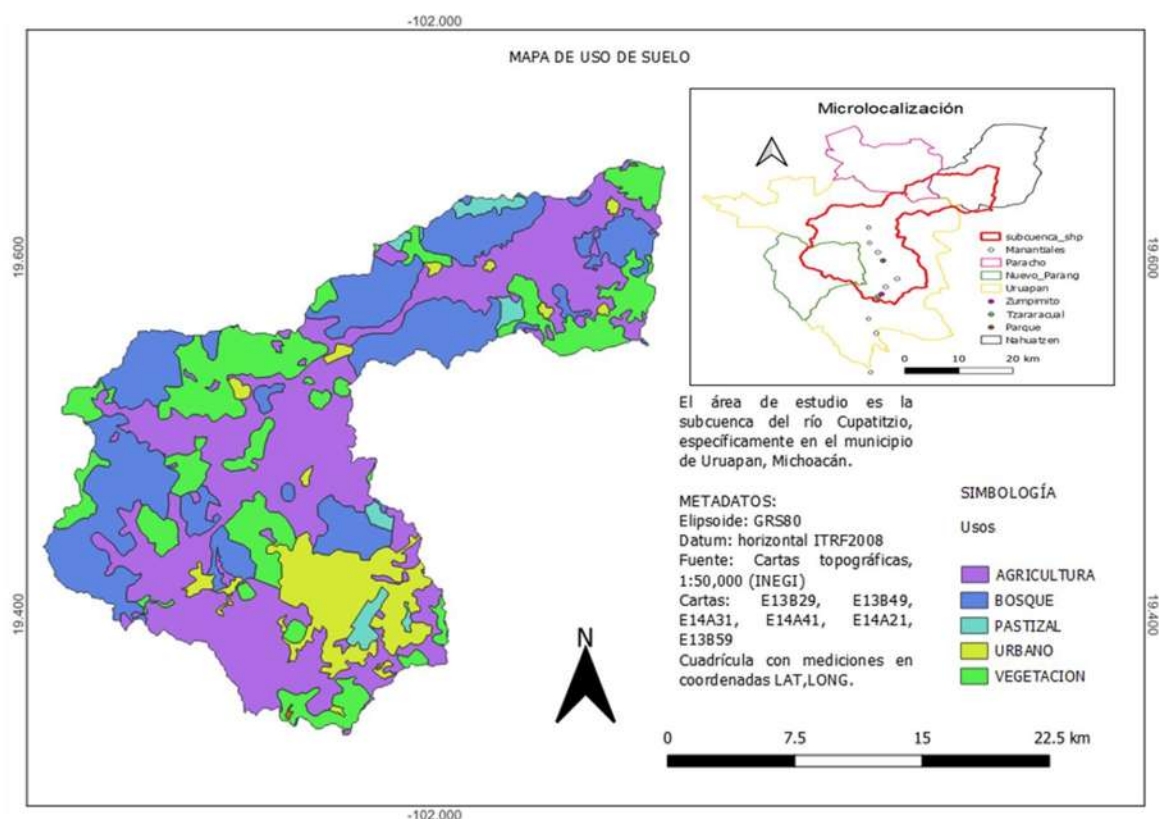


Ilustración 7. Mapa de uso de suelo de la zona en estudio

La zona boscosa en el área de estudio (FRST) corresponde principalmente a dos

tipos de bosques definidos como Bosque mixto y bosque siempre verde.

El bosque mixto tiene la peculiar característica de conformarse por la convivencia de especies del tipo pino y encino, algunas de estas especies pierden follaje en la temporada de climas fríos, pero otros no como el caso del pino.

El bosque siempre verde tiene la peculiar característica de conformarse por especies de coníferas, principalmente del tipo pino, siempre y en cualquier temporada del año presentarán follaje.

La agricultura en el municipio de Uruapan se divide en: mecanizada continua (14.43%), la de tracción animal continua (3.46%), la agricultura de tracción animal estacional (14.64%), la agricultura manual estacional (21.59%), las zonas no aptas para la agricultura (45.88%), INEGI (2010).

Los cuerpos de agua, asignados como WATR se encuentran dentro de la Región Hidrológica Río Balsas, dentro de la cuenca Río Tepalcatepec, y subcuenca Ríos Cupatitzio, La Parota y Paracho. Dentro del área de estudio se encuentran la Presa Derivadora de Zumpinito, donde se aprovechan sus aguas para la generación de energía eléctrica, Presa Cupatitzio (para generación de electricidad), Presas Derivadoras de Charapendo y Jicalán, para riego agrícola en el Municipio de Gabriel Zamora. CONAGUA. (2015).

Fisiografía y Geomorfología

Los principales rasgos fisiográficos del área referida se hallan representados por topoformas de carácter volcánico.

Los materiales aflorantes que conforman la zona montañosa más alta del estado, está representada principalmente por el cerro Tancítaro, el cual es un volcán, formado por emisiones alternantes de lava y cenizas volcánicas con grandes espesores; la mayor parte de los afloramientos en la zona son de origen cuaternario. Del Cerro San marcos provienen coladas basálticas, formando arcillas de color gris mezclado con bloques de basalto de color rojizo y grisáceo. Debido a la gran cantidad de gases que se combinaron con las lavas, se originaron una serie de cavernas que por acción de las aguas sufrieron disolución, logrando una circulación subterránea de las aguas meteóricas, fenómeno que se observa a simple vista por la presencia de los resumideros que conservan una forma ovalada y que varía de

diámetro. (CONAGUA, 2015).

Edafología

La palabra edafología proviene de las raíces edafos, suelo y logos, estudio, por lo tanto, es el estudio de los suelos. Podemos definir suelo como la capa más superficial de la corteza terrestre, en la cual encuentra soporte la cubierta vegetal natural y gran parte de las actividades humanas. Es necesario conocer las características de los suelos para el buen manejo agrícola, pecuario, forestal, artesanal o de ingeniería civil. El suelo es el resultado de la interacción de varios factores del ambiente y fundamentalmente de los siguientes: clima, material parental o tipo de roca a partir de la cual se originan los suelos, vegetación y uso del suelo, relieve y tiempo. El suelo está formado por horizontes y/o capas, las cuales se pueden apreciar en los cortes de las carreteras, pozos y zanjas. INEGI (2008)

Empleando el sistema de información geográfica, QGIS, y para lograr incorporar el mapa de uso de suelo, se realizó el mapa tipo SHP que se muestra en la ilustración 8, cada tipo de suelo se nombra con 2 letras, la primera mayúscula y la segunda minúscula en función de sus características.

Tm= Andosol de textura media

Tg= Andosol de textura gruesa

Rd= Regosol

Im= Litosol de textura media

Ig= Litosol de textura gruesa

Be= Cambisol

Lc= Luvisol Crómico

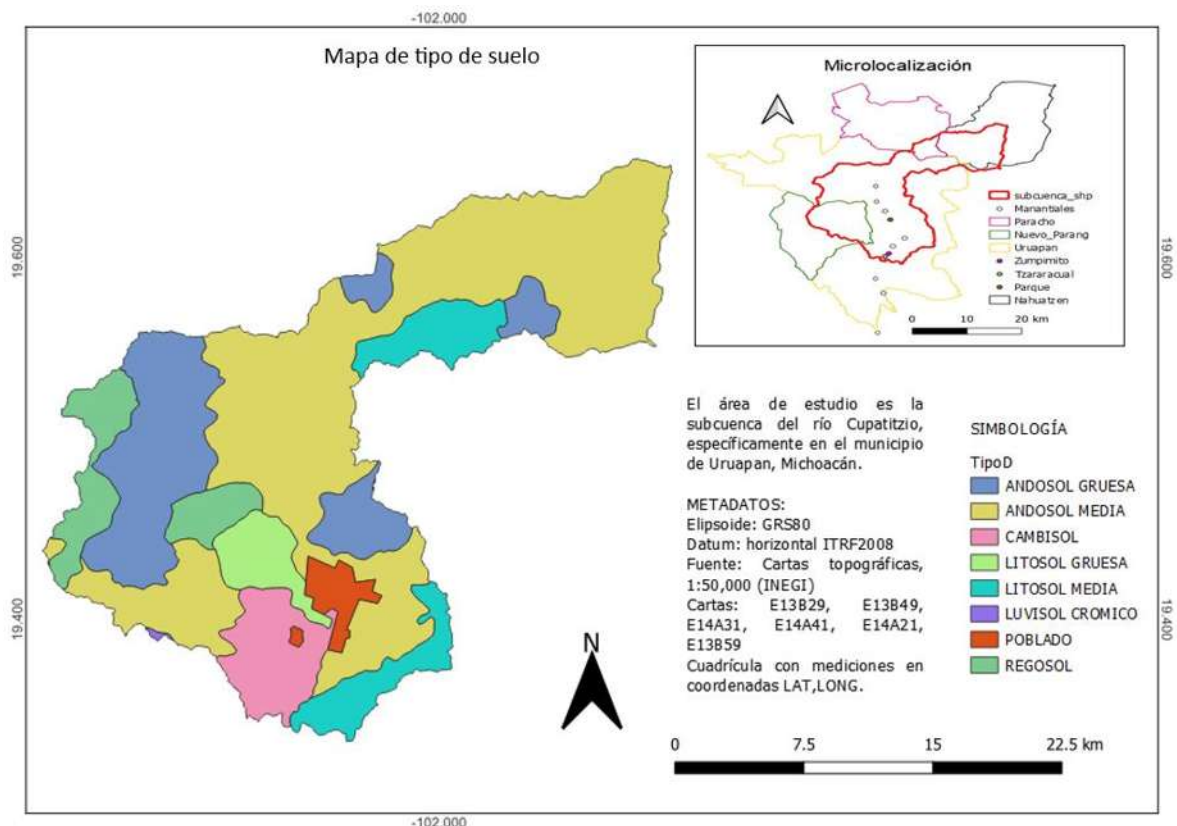


Ilustración 8. Mapa de tipo de suelo de la zona en estudio

Las capas de suelos para efectos de identificación se designan con letras mayúsculas, las cuales nos indican diferentes propiedades y características. Hay que tener presente que el suelo es un elemento dinámico, abierto al medio que lo rodea y que está en constante evolución, de aquí la dificultad de categorizarlo en casilleros determinados, que es lo que pretende hacer un sistema de clasificación. La clasificación usada por la DGG que más adelante se describe con mayor detalle, es una clasificación mundial natural, que reúne las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas de un suelo determinado y las clasifica de acuerdo con el grado de desarrollo del mismo. Al variar los factores formadores clima, vegetación, tipo de roca, etcétera- se obtienen suelos con distribución y características muy diversas INEGI (2008).

El suelo Andosol deriva de las palabras japonesas an: oscuro; y do: tierra. Literalmente, tierra negra. Suelos de origen volcánico, constituidos principalmente

de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo. Se extienden territorialmente en las regiones de Mil Cumbres y la Neovolcánica Tarasca, en el estado de Michoacán, en las Sierras Neovolcánicas Nayaritas, Sierra de los Tuxtlas en Veracruz y en la región de Lagos y Volcanes de Anahuac, en el centro del país. Son generalmente de colores oscuros y tienen alta capacidad de retención de humedad. En condiciones naturales presentan vegetación de bosque o selva. Tienen generalmente bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas. Sin embargo, con programas adecuados de fertilización, muchas regiones aguacateras de Michoacán, por ejemplo, consiguen rendimientos muy altos. Tienen también uso pecuario especialmente ovino; el uso más favorable para su conservación es el forestal. Son muy susceptibles a la erosión eólica y su símbolo es (T). INEGI (2008)

La nomenclatura del suelo tipo regosol proviene del griego reghos: manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca. Suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen. En México constituyen el segundo tipo de suelo más importante por su extensión (19.2%). Muchas veces están asociados con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad. Se incluyen en este grupo los suelos arenosos costeros y que son empleados para el cultivo de coco y sandía con buenos rendimientos. En Jalisco y otros estados del centro se cultivan granos con resultados de moderados a bajos. Para uso forestal y pecuario tienen rendimientos variables. El símbolo cartográfico para su representación es (R). INEGI (2008)

El suelo de tipo Litosol tiene su origen de nomenclatura del idioma griego lithos: piedra. Literalmente, suelo de piedra. Son los suelos más abundantes del país pues ocupan 22 de cada 100 hectáreas de suelo. Se encuentran en todos los climas y

con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras de México, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. En bosques y selvas su uso es forestal; cuando hay matorrales o pastizales se puede llevar a cabo un pastoreo más o menos limitado y en algunos casos se destinan a la agricultura, en especial al cultivo de maíz o el nopal, condicionado a la presencia de suficiente agua. No tiene subunidades y su símbolo es (I). INEGI (2008)

El nombre de Cambisol proviene del latín *cambiare*: cambiar. Literalmente, suelo que cambia. Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. También pertenecen a esta unidad algunos suelos muy delgados que están colocados directamente encima de un tepetate. Son muy abundantes, se destinan a muchos usos y sus rendimientos son variables pues dependen del clima donde se encuentre el suelo. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión. Su símbolo es (B). INEGI (2008)

Clima

De acuerdo con INEGI (2010), el clima en la ciudad de Uruapan, es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (27.95%), templado húmedo con abundantes lluvias en verano (21.96%), semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (14.44%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (13.51%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (11.93%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (6.01%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (4.20%)

Lo anterior se representa gráficamente en la ilustración 9, en donde se muestra la zona en estudio por completo.

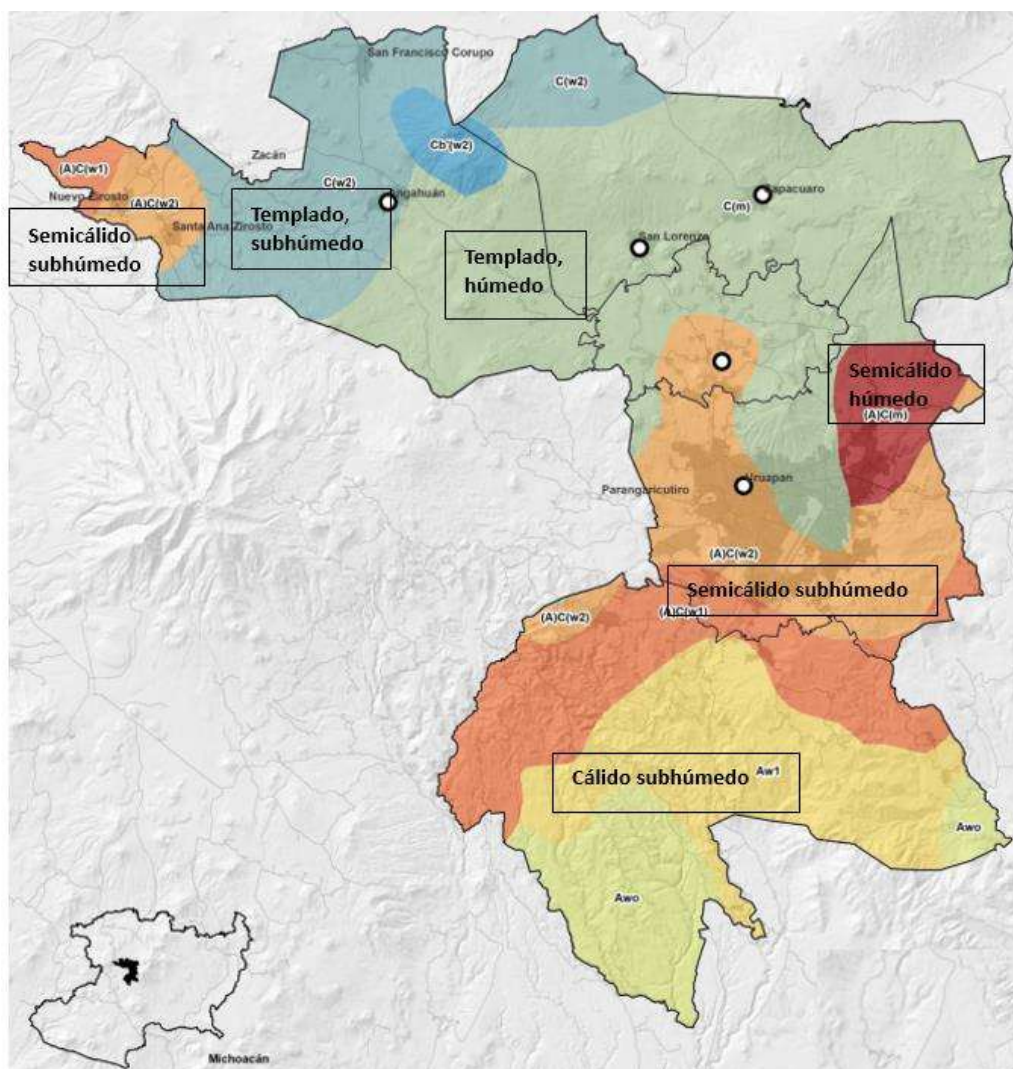


Ilustración 9. Mapa de tipos de Clima en el municipio de Uruapan. Elaborado por IMPLAN. (2020).

Hidrografía

El área en estudio corresponde a la región hidrológica número 18 denominada Río Balsas, mostrada en la ilustración 10 focalizando únicamente en una parte de la subcuenca del río Cupatitzio. En la subcuenca mencionada, se encuentran la Presa Derivadora de Zumpimito, donde se aprovechan sus aguas para la generación de energía eléctrica, Presa Cupatitzio (para generación de electricidad), Presas Derivadoras de Charapendo y Jicalán, para riego agrícola en el Municipio de Gabriel Zamora. CONAGUA. (2015).

El análisis del escurrimiento en la Región Hidrológica núm. 18 Balsas se ha integrado en quince cuencas hidrológicas, como se muestra en la figura 10. La división se realizó a partir de las condiciones físicas; es decir, el parteaguas que las define, y de las estructuras de control existentes, ya sean presas o estaciones hidrométricas; lo anterior, con excepción de las cuencas cerradas, definidas en exclusivo por sus límites físicos. Por otro lado, para fines de planeación y manejo administrativo, la Región Hidrológica núm. 18 Balsas se ha dividido, a su vez, en las subregiones hidrológicas Alto, Medio y Bajo Balsas. La precipitación media anual en la región es del orden de 991 milímetros; esta precipitación se determinó tomando en cuenta los datos obtenidos del registro de 587 estaciones meteorológicas con que cuenta la Conagua en la zona; en general, las precipitaciones se presentan principalmente durante los meses de mayo a octubre, lo que dificulta el aprovechamiento, dado el carácter torrencial en la mayoría de los casos. Valencia-Vargas, J. C. (2015).

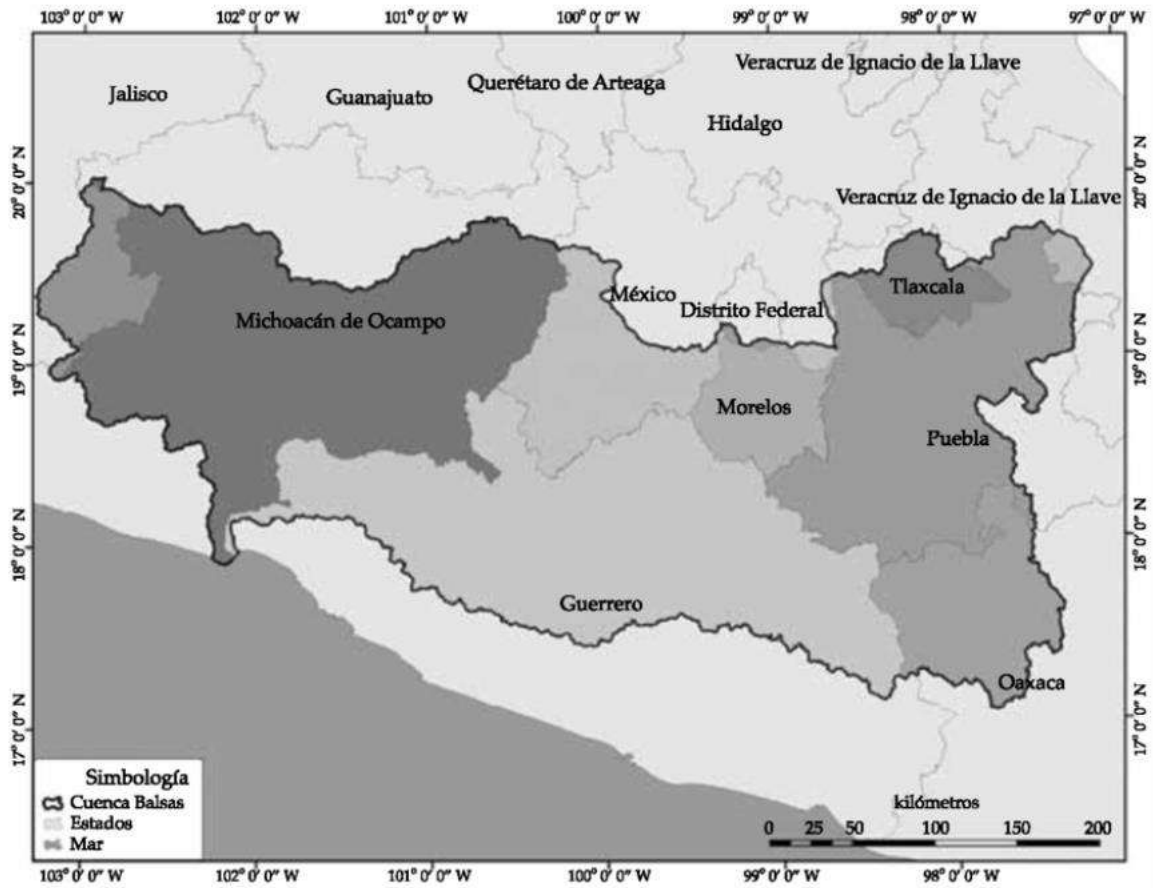


Ilustración 10. Mapa de la Región Hidrológica 18. Elaborado por Valencia-Vargas, J. C. (2015).

Geología

Las rocas que cubren toda esta zona son principalmente ígneas extrusivas basálticas, piroclásticos y brechas, y en menor extensión intrusivas gráficas hacia el sur del área de estudio. CONAGUA. (2015).

4. ANTECEDENTES

Las cuencas hidrográficas, además de ser fuente de agua dulce, regulan el flujo del agua previniendo peligros naturales como las inundaciones, regulan la calidad del agua por su comportamiento filtrante, pueden ser generadoras de energía eléctrica y forman parte del paisaje natural. (Adame, 2007).

El agua llega a los cuerpos hídricos a través de las cuencas hidrográficas. A través de los ríos el agua llega a los embalses desde donde una vez procesada, pasará a los hogares. Por eso es importante mantener las cuencas hidrográficas saludables para así garantizar una mejor calidad de agua en los ríos y embalses. (Forest Service Department of Agriculture, Bosque Nacional El Yunque E. U. 2023)

El área que rodea las cuencas suele estar poblada de plantas y árboles. Las plantas y árboles contribuyen a mantener las cuencas en buen estado, algunos de sus beneficios son:

La capa vegetal disminuye el impacto al suelo del agua de lluvia al caer.

Aumenta la infiltración y la evaporación.

La hojarasca absorbe energía de la escorrentía y reduce la erosión.

El suelo filtra el agua y la purifica.

Las rocas y los árboles caídos en el cauce del río, desaceleran la velocidad del agua y ayudan a retener los sedimentos.

Reducen las escorrentías.

Reducen la erosión y la sedimentación.

Cuando los árboles de un lugar han sido cortados, el agua de lluvia corre sobre el terreno en vez de ser absorbida por éste y la vegetación y los canales naturales que permiten la infiltración de agua se tapan con fango. Si el área tiene mucha pendiente, el agua corre con rapidez a través de los ríos llevándose con ella sedimentos y nutrientes. (Forest Service Department of Agriculture, Bosque Nacional El Yunque E. U. 2023)

La afectación de los procesos fisicoquímicos en una cuenca es descrita como vulnerabilidades, dichas amenazas son difíciles de ser cuantificadas, ya que son cualitativas y cuantitativas. (Adame, 2007). Sin embargo, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

Ecológicas: las cuales afectan la biodiversidad de la cuenca. Climáticas: causadas por sequías e inundaciones.

Afectaciones por falta de disponibilidad de agua, por la explotación de acuíferos, causando estrés hídrico.

Daños por contaminación del agua, producto del crecimiento urbano descontrolado, de la marginación social, y del cambio de uso de suelo en zonas agrícolas y forestales.

Políticas: por las disputas que se tienen sobre la gestión y gobernanza de los recursos hídricos.

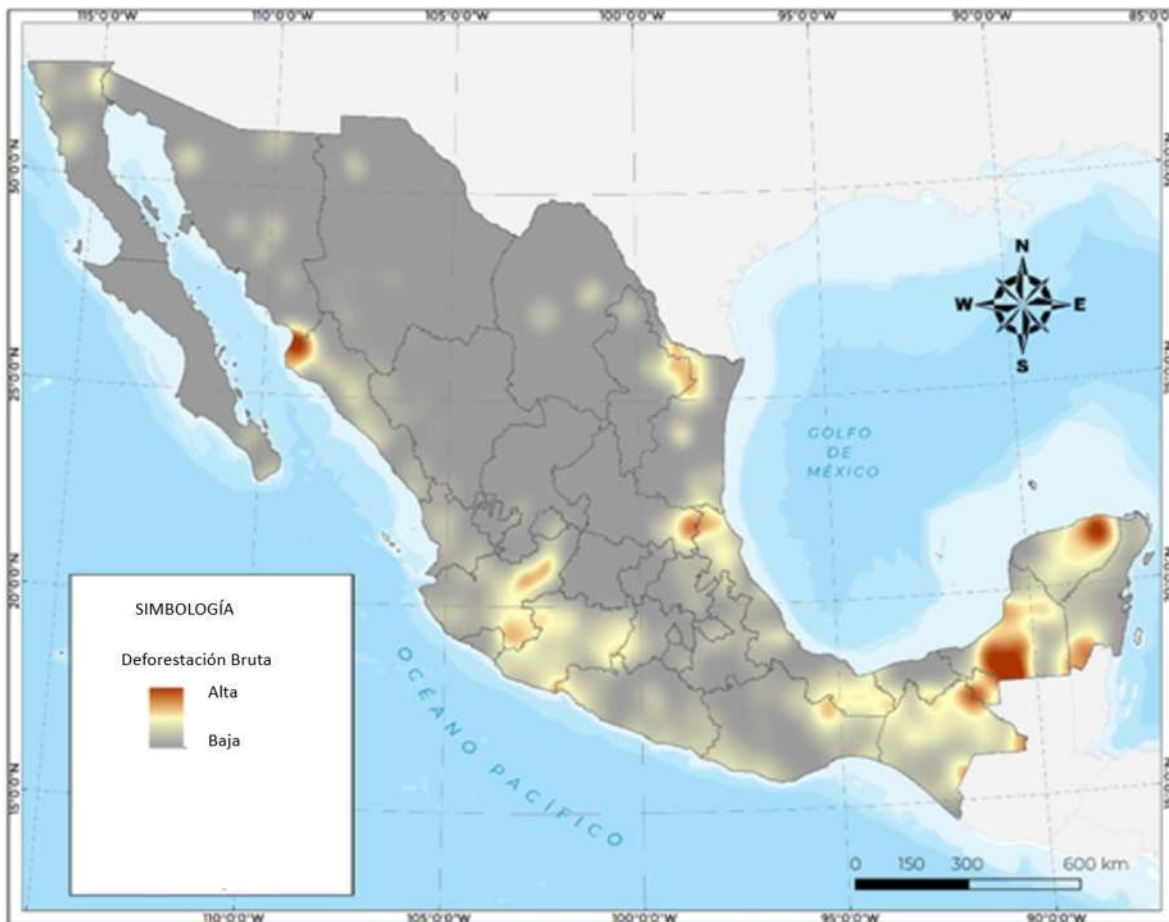
La vulnerabilidad es el proceso a través del cual la población humana y los ecosistemas están sujetos a un riesgo por daños o amenazas ocasionadas por factores biofísicos y sociales. Esto conduce a una situación de limitada o nula capacidad de respuesta frente a tal contingencia, y se presentan grandes dificultades para adaptarse al nuevo escenario generado por la materialización del riesgo. (Adame, 2007)

De acuerdo a lo anterior, se puede deducir la importancia de tener un monitoreo de la calidad del agua y de los factores de las cuencas hidrográficas que la afectan.

Para poder establecer las condiciones actuales y futuras de una cuenca, es necesaria la recolección y análisis de datos, al igual que su modelación; por lo anterior, se eligió la cuenca relativa al río Cupatitzio que por ser una fuente fundamental de abastecimiento de agua a la Ciudad de Uruapan, Michoacán, (*i.e.* abastece en promedio a 450,000 habitantes), suministra el riego de cultivos de los municipios de Gabriel Zamora, Nueva Italia y una parte de Parácuaro, asimismo sus aguas se aprovechan para generar energía eléctrica en las plantas hidroeléctricas de Zumpimito, Cupatitzio y el Cóbano y, también es considerada como una de las áreas de mayor interés silvícola de la parte centro-norte del estado de Michoacán.

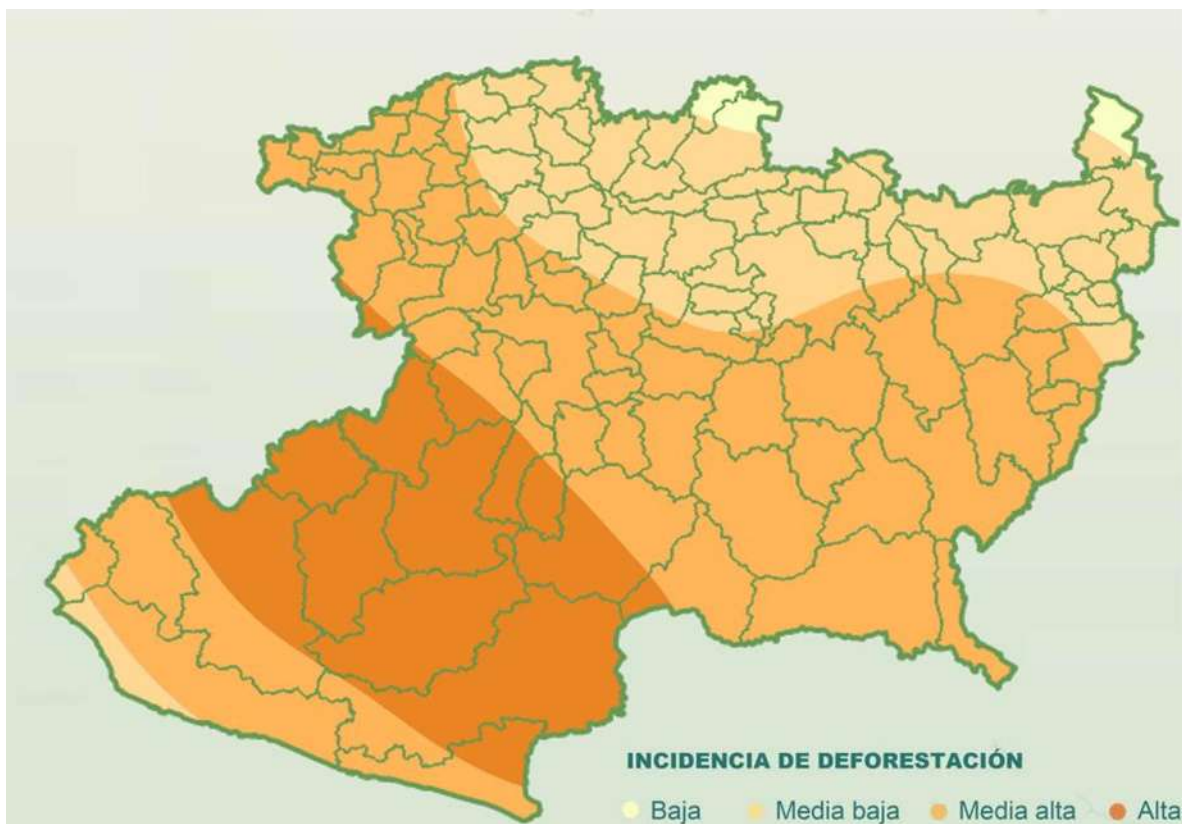
Sin embargo, el deterioro de la cuenca es cada vez más notorio al igual que los problemas ambientales en la zona, generados por una inadecuada gestión de los recursos hídricos y la contaminación del agua provocada, de manera importante, por el aporte de contaminantes ligados al crecimiento urbano. En el reporte, denominado " Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Barranca del Cupatitzio " (CONANP SEMARNAT, 2006), la Comisión Nacional de áreas Protegidas menciona el deterioro en los manantiales correspondientes. (Pérez *et al.*, 2006)

De acuerdo con el (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2021), la deforestación es la pérdida permanente de la vegetación forestal por causas inducidas o naturales, en otras palabras, el cambio de uso de tierra forestal a cualquier otro uso de la tierra, tales como el uso agrícola, praderas, asentamientos humanos, humedales u otras tierras. En México las principales causas de la pérdida de ecosistemas forestales son el cambio de uso de suelo de tierras forestales a pastizales en un 74%, y el cambio a tierras agrícolas en un 22%. En el estado de Michoacán, de 2001 al 2018 se deforestaron 269, 676 hectáreas equivalentes a 14,982 ha/año de tierras deforestadas. De acuerdo con COMISIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAFOR, 2020), el mapa de zonas críticas de deforestación nacional (hotspots) mostrado en la ilustración 11, permite analizar de manera exploratoria los patrones de incidencia de la deforestación en una o más zonas en particular.



*Ilustración 11. Mapa de zonas críticas de deforestación en México periodo 2001-2018.
Elaborado por CONAFOR (2020).*

De acuerdo con la COMISIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAFOR, 2020), en Michoacán, se observa una alta incidencia de deforestación en la parte centro-sur del estado, cabe señalar que esta zona coincide en parte con la conocida región aguacatera que comprende los municipios de Apatzingán y Uruapan, tal y como se muestra en la ilustración 12.



*Ilustración 12. Mapa de zonas críticas de deforestación en Michoacán periodo 2001-2018.
Elaborado por CONAFOR (2020).*

En la zona de estudio es notable el cambio de uso de suelo producto de la expansión urbana y el crecimiento de huertas de aguacate principalmente para exportación. De acuerdo con Medina, J. R. (2018), de 1996 al 2015, en el municipio de Uruapan se cuantificó un cambio de uso de suelo de un área de 55,000 hectáreas, representando un 24% del municipio, en el cual hubo pérdidas principalmente de bosque, áreas de cultivos de temporal como el maíz y el trigo, las cuales fueron reemplazadas por huertos de aguacate en su mayoría.

La principal razón del cambio de uso de suelo en la zona es debido a un modelo económico basado en la producción y exportación del aguacate, tanto para en el mercado local como internacional, la producción mundial del aguacate se ha incrementado en 550,000 toneladas anuales, de acuerdo con la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), y México cosecha anualmente 1,040,390 toneladas de aguacate, lo cual representa 102,467 hectáreas cosechadas, que equivale al 35% de la producción mundial. Téliz Daniel, A. M. (2019)

De la producción a nivel nacional, Michoacán produce el 88%, cultivando 135,000 hectáreas registradas. Estos números no contemplan las huertas ilegales que se estiman en 30,000 hectáreas.

Tan solo del 2005 al 2019 hubo un incremento de 42,000 hectáreas de huertas de aguacate en Michoacán de acuerdo con la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación).

La franja aguacatera del Estado de Michoacán está localizada en la sub-provincia fisiográfica Tarasca y representa 13% de la superficie estatal.

De acuerdo con el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2021) de México, la producción anual principal de aguacate en el estado de Michoacán, es en huertos menores a 10 hectáreas, por lo que la competitividad del producto beneficia directamente a más de 30 mil 387 productores, principalmente de pequeña y mediana escala, pero a su vez, significa que el sector productivo del fruto se encuentra fragmentado haciendo su control más difícil, esto considerando únicamente los 46 mil 516 huertos certificados en 43 municipios del Estado de Michoacán, una situación completamente diferente a la del resto del país, principalmente en los estados del norte.

El principal productor de aguacate en el estado de Michoacán es el Municipio de Uruapan con una superficie aproximada de 20,000 hectáreas de acuerdo con el CESVEM (Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Michoacán.) INIFAP, CIRPC, CEU, (2012).

En 1911 se prohibió la entrada de aguacate mexicano a los Estados Unidos de América por razones fitosanitarias. La exportación internacional del aguacate en

De acuerdo con Medina, J. R. (2018) la ciudad de Uruapan sufrió un cambio de uso de suelo del 24% de su extensión territorial, lo cual representa 55,000 hectáreas en su mayoría de bosque y cultivos de temporal como el maíz, reemplazados por huertos, en su mayoría de aguacate debido a un modelo económico basado en la producción y exportación de aguacate.

La mayoría de los cambios de uso de suelo correspondiente a los huertos de aguacate han sido no solo a costa de cultivos tradicionales como granos básicos, forrajes, sino también de pérdida de cubierta forestal, con los problemas ambientales que esto implica.

La deforestación y la degradación de los bosques contribuyen a la pérdida de biodiversidad, contaminación de los acuíferos y eutrofización de los cuerpos de agua.

La región de Uruapan es una de las principales zonas agrícolas del estado de Michoacán gracias a su ubicación geográfica y condiciones climáticas. Téliz Daniel, A. M. (2019)

De acuerdo con Chávez, L. G. (2012). el cambio de uso del suelo forestal para la producción de aguacate ha provocado un deterioro de los ecosistemas forestales del estado de Michoacán, que se manifiesta en un proceso de deforestación de 690 ha anuales. Lo anterior impacta directamente en el balance hídrico de las cuencas y el suministro de servicios a la sociedad, como son el abastecimiento de agua y la conservación del suelo.

Entre 1976 y 2000, más de 200,000 hectáreas de bosque templado y 300,000 de selva fueron desmontadas en Michoacán, 8,500 y 12,500 ha por año en promedio, lo que representa tasas de deforestación anuales de 0.47 y 0.65, respectivamente. Las plantaciones de aguacate están desplazando al bosque de coníferas mediante cambio de uso del suelo en terrenos forestales. En la ilustración 13 se muestra una imagen satelital del 10 de febrero de 1973, en donde las áreas claras corresponden a sitios dedicados a cultivos anuales de temporal, maíz, principalmente y de color rojo brillante se muestran las huertas de aguacate, la ilustración 14 con fecha del 21 de enero de 2011 muestra que los sitios de temporal fueron ocupados por huertas de aguacate.

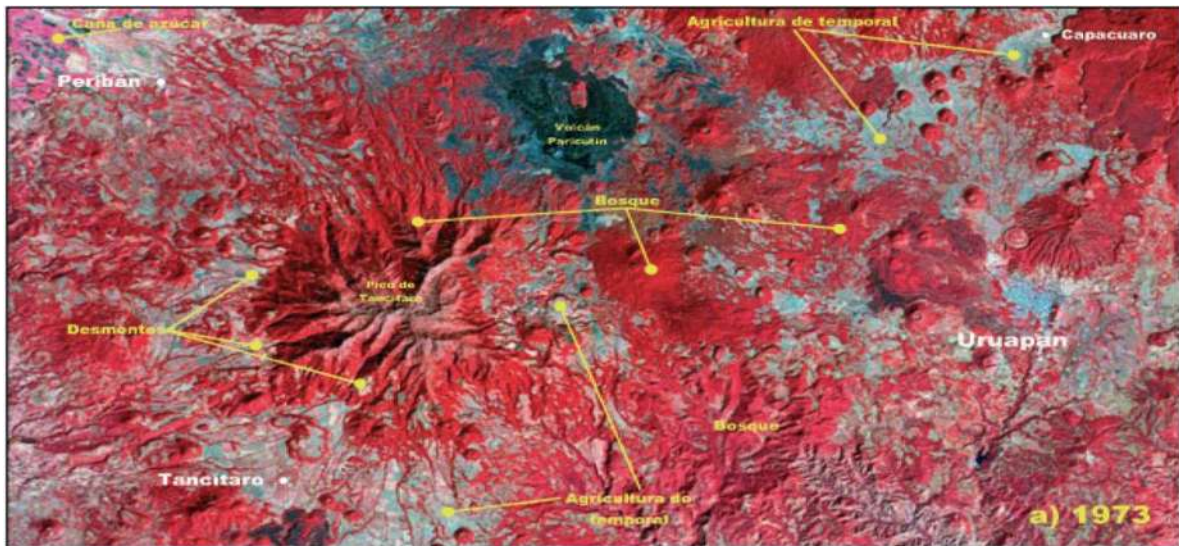


Ilustración 13. Imagen satelital que muestran la cobertura del suelo en la región Uruapan, Tancitaro Peribán, 10 febrero 1973 Elaboró: Chávez-León. Fuente: GLS U.S. Geological Survey y National Aeronautics and Space Administration (</earthexplorer.usgs.gov/>)

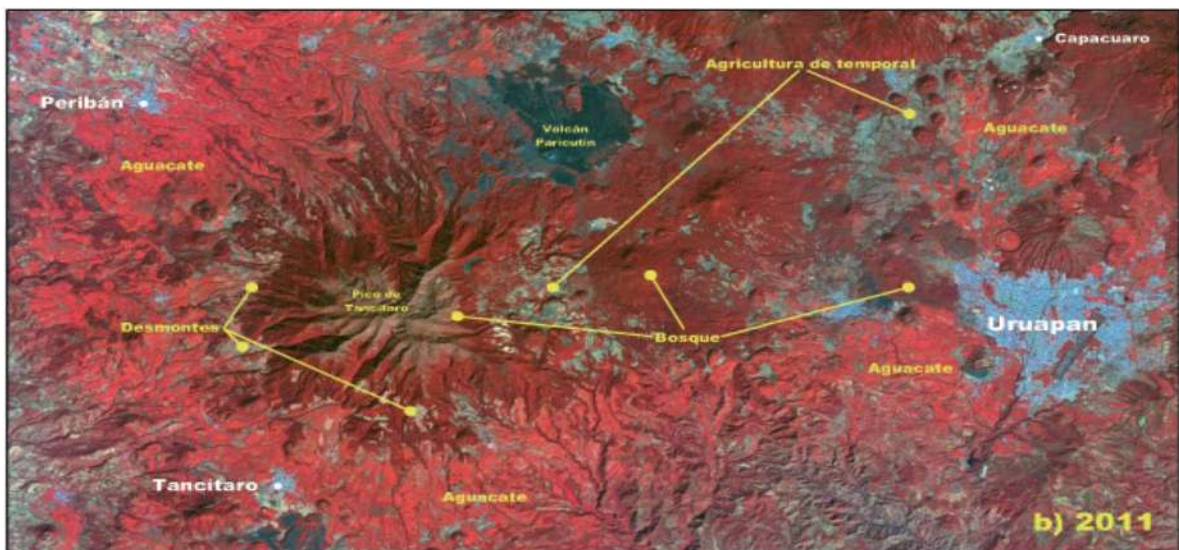


Ilustración 14. Imagen satelital que muestran la cobertura del suelo en la región Uruapan, Tancitaro Peribán, 21 de enero de 2011 Elaboró: Chávez-León. Fuente: GLS U.S. Geological Survey y National Aeronautics and Space Administration (</earthexplorer.usgs.gov/>)

El aguacate es nativo de América, se tienen restos fósiles de aguacate encontrados en el Valle de Tehuacán, en el estado de Puebla, México data de 10,000 años A. C.

En Michoacán, el licenciado Eduardo Ruiz (1839-1907) menciona vestigios de huertas de aguacate que existían en la barranca de Jicalán Viejo, municipio de Uruapan, en la región de Michoacán. Al árbol de aguacate se le conocía como Cupanda que proviene de la lengua purépecha y significa árbol del aguacatero. Téliz Daniel, A. M. (2019).

Los árboles de aguacate se adaptan de acuerdo a su raza. En el subtrópico su mayoría son de raza mexicana y guatemalteca.

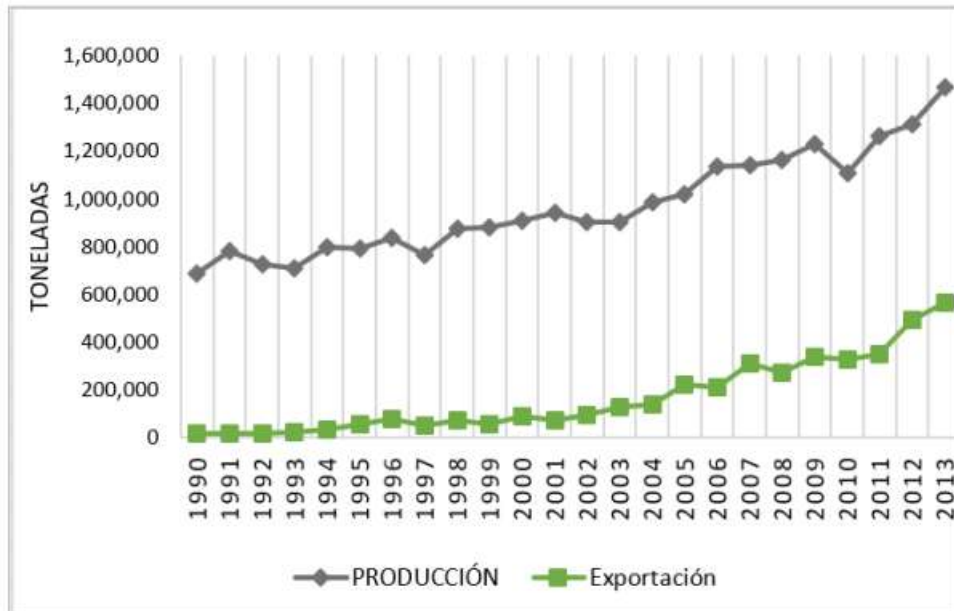
El aguacate Hass es el principal cultivo comercial de aguacate en el mundo, fue originado en California por Rudolph G. Hass a principios de la década de 1920, tiene de 10 a 15% de raza mexicana, y el resto de guatemalteca, para la adaptación de este cultivo en la zona de Uruapan.

El cultivo de cereales en la zona agrícola de Uruapan fue considerablemente disminuido en los últimos 20 años, provocando la desaparición casi por completo, lo anterior como resultado del incremento en la producción de aguacate, el cual se ha incrementado un 39% de 1996 a 2015. Téliz Daniel, A. M. (2019). En la ilustración 15 se muestra el incremento exponencial de la producción y exportación del

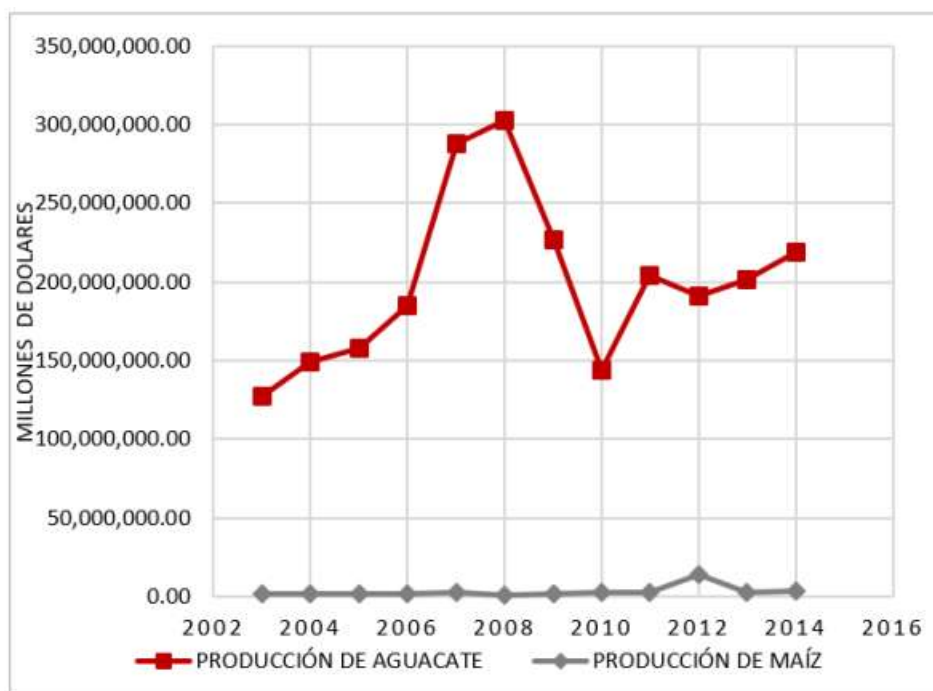
Ilustración 15 Gráfica de producción y exportación del aguacate en México. Elaborado por Medina, J. R. (2018)

aguacate desde 1990 hasta 2013 según datos del FAOSTAT (base de datos estadísticos corporativos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación). Medina, J. R. (2018).

A través de la observación en campo, lectura de proyectos académicos en la zona y pláticas con agricultores e ingenieros agrónomos de la zona, se determinó que los



principales cultivos de la región son el aguacate y el maíz, por lo que se realizó la modelación con base en los datos de dichos productos. En la ilustración 16 se muestra el valor monetario de los cultivos anteriormente mencionados, lo que justificaría económicamente el cambio de uso de suelo de 1,617 hectáreas que anteriormente eran destinadas para cultivo de temporal, específicamente del maíz, y que ahora son destinados para la producción de aguacate.



*Ilustración 16 Gráfica de Valor monetario de producción de cultivos de aguacate y maíz en el periodo 2003-2014..
Elaborado por Medina, J. R. (2018)*

El impacto de las huertas de aguacate no solamente reside en los pesticidas y fertilizantes empleados en dicho cultivo, sino en la infraestructura hidráulica asociada a los huertos de aguacate conocidas como ollas de captación de agua con las cuales se logra un espacio de control en el que el agua proveniente de escurrimientos superficiales no se infiltra y se almacena para su uso en el riego del cultivo.

Con los datos obtenidos en campo mediante entrevistas a agricultores de aguacate, se concluyó que la producción de aguacate básicamente es todo el año, esto debido a que la primera floración empieza en Octubre y continua hasta mediados de Febrero o principios de Marzo, y cada floración pasa por un proceso de maduración, el cual culmina en un periodo aproximado de cinco meses, por lo que la floración de Octubre daría fruto hasta febrero, pero en lugares templados o fríos, como es el caso de Uruapan, el fruto se puede conservar en el árbol hasta tres meses, por lo que la cosecha podría ser de febrero hasta mayo, y las cosechas se pueden llegar a juntar a conveniencia del agricultor y generar 3 o 4 cortes de fruta al año.

Los procesos del ciclo de vida de la fruta del aguacate son los siguientes:

Botones florales.

Floración.

Fruto cuajado.

Fruto tierno.

Fruto 50% del tamaño final.

Fruto tamaño definitivo.

Recolección.

Y cada etapa del proceso anteriormente mencionado, dura en promedio 1 mes.

De acuerdo con Campos Aranda, D. F. (1998) El ciclo hidrológico se define como la “Sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o agua continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y re-evaporación”, tal como se muestra en la ilustración 17. Para la recarga del ciclo hidrológico es necesaria la infiltración de este vital líquido, la cual se ve interrumpida por la captación de agua en ollas, lo cual provoca un desequilibrio en la distribución del agua, provocando afectaciones en las poblaciones que habitan en la cuenca, ya sea para el uso urbano, ganadero, industrial o agrícola, siendo la agricultura el sustento económico de la población de la ciudad de Uruapan.

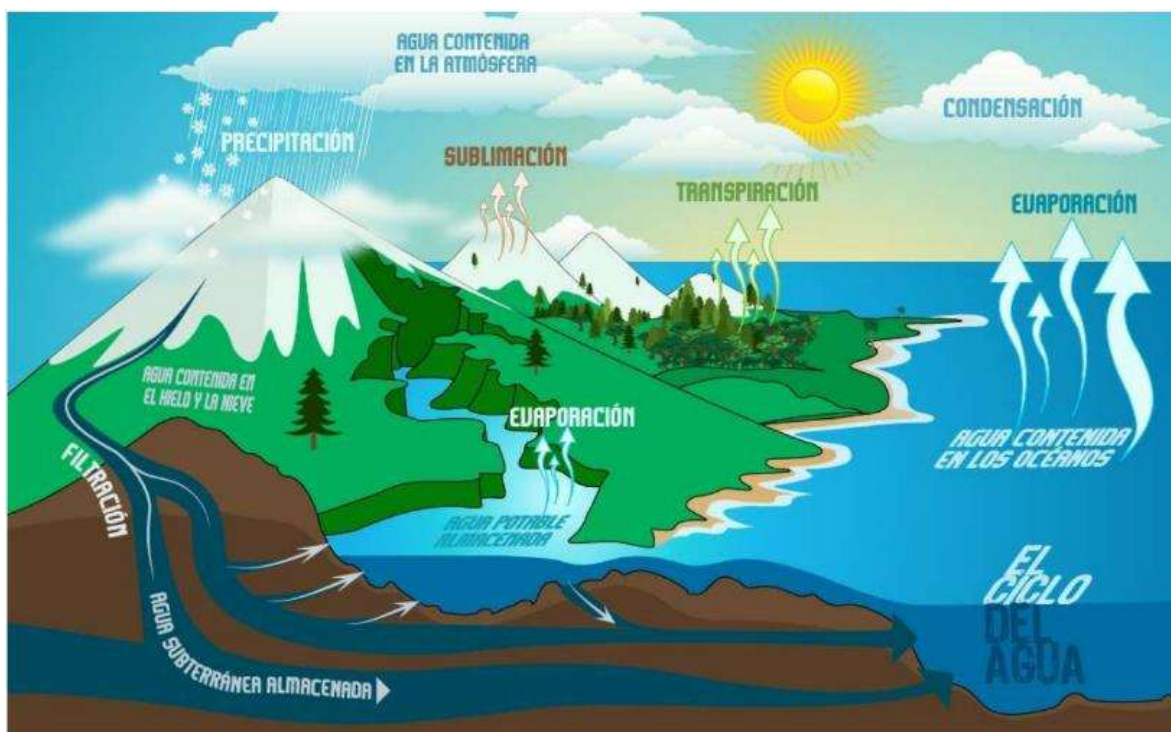


Ilustración 17 Ciclo hidrológico Obtenido de Ruiz Chávez, G. A. (2020). Elaborado por <http://agua.org.mx>

El segundo cultivo más importante de la región, como se menciona anteriormente, es el maíz, el cual está considerado por la Ley de Desarrollo Rural Sustentable como el alimento básico y estratégico de México por su versatilidad.

El maíz a diferencia de otros cereales, se puede cultivar en casi todos los climas, casi todas las altitudes y casi todos los suelos. Se cultiva pronto, se almacena con facilidad y se conserva por largo tiempo; se prepara con sencillez y no requiere de equipos complejos para consumirse.

El Estado de Michoacán forma parte del centro de origen y domesticación del maíz, en el área donde convergen la cuenca del Río Balsas, el eje volcánico transversal y la cuenca de los ríos Lerma-Santiago a partir del Teocintle anual hace aproximadamente 10 mil años debido a un solo evento evolutivo. A partir del centro de domesticación, las migraciones humanas étnicas llevaron el maíz a todo México, dando como resultado una enorme diversidad genética en esta especie, que actualmente se ha caracterizado en 61 razas de maíz. Haciendo que exista una amplia diversidad del maíz y sus parientes silvestres. A la fecha después de 67 años

la fecha no se ha realizado el estudio general y sistemático que permita conocer el estado actual que guardan los maíces criollos y sus parientes silvestres, no obstante que ya algunas razas están en peligro de extinción y si en breve, se suspende la moratoria al uso de maíces genéticamente modificados podrían alterar el equilibrio genético de los agroecosistemas. Márquez, S. R. (2014)

El maíz de la especie *Zea mays* L., es originario de México y América Central, su periodo vegetativo varia de 80 a 140 días dependiendo del clima, en lugares con temperaturas menores a 20°C tiene la duración máxima mencionadas.

De acuerdo con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, 2013), las etapas de crecimiento del maíz son:

- Crecimiento de las plántulas (9 días)
- Crecimiento vegetativo (54 días)
- Floración y fecundación (59 días)
- Llenado de grano y madurez (112 días).

En la ilustración 18 se muestran las etapas de siembra y cosecha del maíz en el estado de Michoacán.



Ilustración 18 Calendario de la producción de maíz en Michoacán fuente: Magaña, A. L. (2014)

Como se puede observar, la viabilidad de cultivos de maíz es mayor a la del aguacate si se considera que el único fertilizante que se requiere es la urea, aplicado solo una vez por temporada y los cuidados que se requieren son mínimos ya que es un cultivo prácticamente nativo de la región, sin embargo, la principal limitante financiera del sector resulta ser la concepción de la producción de maíz como cultivo de baja rentabilidad, esto sin mencionar que de acuerdo con Magaña, A. L. (2014), el ambiente de inseguridad que rodea al estado ya afecta al sector agrícola. Las extorsiones a productores tienen efectos inflacionarios en los productos básicos y

merman los ingresos y ganancias de los agricultores; si bien este caso ha sido más bien denunciado por los limoneros y aguacateros en el estado, esta es una situación que no exime a los demás productores y habitantes de Michoacán, por lo que el control sobre la cantidad de hectáreas sembradas y la selección del tipo de cultivo no depende únicamente de los campesinos, lo cual también explicaría el incremento en las huertas de aguacate, el cual produce mayor ganancias monetarias en comparación con otros cultivos.

RESPECTO A LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA ZONA

En 2014, mediante una caracterización fisicoquímica realizada en la subcuenca del río Cupatitzio, se hizo notable la presencia de aguas cálidas, de baja salinidad, bien oxigenadas, neutras, con baja reserva alcalina. La composición iónica contiene poca mineralización, mayormente de bicarbonatos, los cuales en lluvias se conforman por Calcio y en secas por Magnesio. Con respecto a los nutrientes, se determinó una limitación por nitrógeno, ya que la concentración de fósforo muestra que el ion se encuentra biodisponible en todo el periodo de muestreo. Las formas de nitrógeno en orden de concentración son: amonio, nitratos y nitritos, encontrándose este último de forma ocasional. La carga orgánica evidencia que el agua presenta condiciones saprobias, de bajas a moderadas, lo que permite distinguir periodos en donde la mineralización de la materia orgánica es completa. (Ortega *et al.*, 2014)

Una de las posibilidades de la modelación es que se pueden modificar las condiciones actuales para poder establecer escenarios futuros de la subcuenca, determinando así las estrategias y áreas de oportunidad para lograr un desarrollo sostenible en la región, conservando y haciendo buen uso del recurso hídrico. (Noopur, A., y Munendra, K., 2021).

Actualmente se cuenta con varios programas que permiten el modelado de las cuencas para su análisis, entre los que destacan QSWAT (Soil and Water Assessment Tool) y GWLF (Generalized Watershed Loading Function), ambos permiten realizar modelos precisos de cuencas hidrográficas, determinando

parámetros importantes para su estudio, como son: el caudal mensual simulado, la contaminación, la cantidad de sedimentos y nutrientes, entre otros.

El modelo QSWAT realiza representaciones más detalladas y con mayor precisión, en comparación con el modelo GWLF; otra de las ventajas del modelo QSWAT, que vale la pena mencionar, es que se puede realizar una modelación a futuro con una menor cantidad de datos, en comparación con las requeridas para el modelo GWLF. Otro de los beneficios que cabe mencionar es que el software QSWAT es de uso gratuito, de fácil acceso y forma parte del inventario de los programas recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA), por lo que se considera una opción adecuada para ser empleado como herramienta en el trabajo que se pretende realizar. Mendonça *et al.* (2020)

La página oficial de SWAT (<https://swat.tamu.edu/>), permite a los usuarios descargar diferentes versiones del programa. La selección de la versión depende de la interfaz gráfica del usuario, las más utilizadas para SWAT a través de un sistema de información geográfico son ArcSWAT, el cual funciona con el programa ArcGIS, y QSWAT, que función con el programa QGIS.

La diferencia más notable entre los programas mencionados, es que QGIS se puede descargar de manera gratuita, por otro lado, para descargar el programa ArcGIS, es necesario comprar una licencia al ESRI, traducido como el Instituto de Investigación de Sistemas Medioambientales por sus siglas en inglés. Actualmente, ESRI es una compañía a nivel mundial, dedicada a la venta de programas de sistemas de información geográfica, inteligencia de localización y cartografía.

El funcionamiento adecuado de cualquier extensión de SWAT no depende del sistema de información geográfica seleccionado, por lo que para el presente trabajo se decidió emplear el programa QGIS, el cual es gratuito y no necesita de licencias adicionales.

De acuerdo con Bieger *et al.* (2017), en cualquier programa, ya sea QGIS o ArcGIS, se puede instalar la extensión de SWAT o SWAT+, la diferencia es que SWAT+ es una versión completamente revisada del modelo SWAT y proporciona una representación espacial más flexible de las interacciones y procesos dentro de una cuenca hidrográfica.

5. JUSTIFICACIÓN

El aprovechamiento principal del agua de la subcuenca del río Cupatitzio es el uso urbano para abastecer a la ciudad de Uruapan, abastece además 11 presas para riego, siendo la agricultura la actividad económica de mayor influencia en la región, por lo que es importante analizar la calidad del agua y su relación con las características del suelo en la subcuenca, así como su comportamiento ante diferentes escenarios. La modelación proporciona un contexto para comprender donde se sitúa la cuenca en términos de afectación de su carga de fósforo total y nitrógeno total, actuales y potenciales, de esta manera es posible proponer medidas de gestión y mitigación factibles de acuerdo a las necesidades particulares de la cuenca. Para poder realizar un análisis completo de la zona mencionada, es necesario emplear herramientas que permitan presentar la información de manera precisa y modelar diferentes escenarios a partir de los datos básicos y factibles de obtener, por lo anterior se eligió emplear el software QSWAT, que tiene las ventajas adicionales de ser un programa gratuito y de manejo accesible a nivel especializado.

6. HIPÓTESIS

La modelación de la subcuenca del río Cupatitzio, en la ciudad de Uruapan, Michoacán, permite evaluar la magnitud de las cantidades de nitrógeno total y de fósforo total presentes en la misma subcuenca, analizar posibles escenarios y proponer las correspondientes medidas de mitigación.

7. OBJETIVOS

Objetivo general

Modelar la subcuenca del río Cupatitzio, en la ciudad de Uruapan, Michoacán, y proponer medidas que permitan disminuir los efectos de los nutrientes constituidos por el nitrógeno total y el fósforo total.

Objetivos particulares

- Analizar la subcuenca del río Cupatitzio, en la ciudad de Uruapan, Michoacán, utilizando un sistema de información geográfica (SIG).
- Modelar la carga de nitrógeno total y de fósforo total de la subcuenca del río Cupatitzio en ciudad de Uruapan, Michoacán.
- A partir de las modelaciones, generar escenarios para establecer las medidas de mitigación que propicien la reducción de la carga de nitrógeno total y de fósforo total.

8. METODOLOGÍA

- Revisión del estado del arte del tema, incluyendo la aplicación del modelo QSWAT para modelaciones de cuencas hidrográficas.
- Delimitación del área de estudio mediante el sistema de información geográfica QGIS.
- Recopilación de los datos necesarios para la implementación del modelo QSWAT, como son: modelo digital de elevaciones (MDE), mapas de uso de suelo, mapas de tipos de suelo, mapa de la subcuenca en estudio, mapa de cauces o ríos, tablas de usos de suelo, tipos de suelo, climatología (precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa) en relación a la subcuenca del río Cupatitzio en la ciudad de Uruapan, Michoacán.
- Recopilación de datos de carga de nitrógeno total y fósforo total.
- Establecimiento de los criterios de modelado (carga de nitrógeno total y fósforo total) y análisis de los datos.
- Simulación de las condiciones de la subcuenca.
- Simulación de escenarios.
- Análisis de resultados.
- Conclusiones y recomendaciones.

8.2 Materiales:

Un estudio comparativo de diferentes escenarios basados en los cambios de uso de suelo y por ende en el arrastre de nutrientes a lo largo del tiempo, requiere insumos espaciales tales como cartas topográficas, un modelo digital de elevaciones, el uso de un sistema de información geográfica para ingresar, modificar y analizar la información, las características de los cultivos en la zona basados en investigación de campo y fotografías satelitales, producción agrícola, dinámicas de exportación, para posteriormente realizar el análisis en el programa SWAT.

Para la aplicación del modelo SWAT+ es necesaria la recopilación de información, al igual que su procesamiento, ya sea en un Sistema de Información Geográfica o en una base de datos.

Los elementos preliminares que se requieren para que el programa funcione adecuadamente se dividen en datos tabulares y espaciales.

En los elementos tabulares es necesario tener la información climatológica, así como tipo y uso de suelo.

El modelo SWAT+ requiere precipitaciones, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa como parte de la información climatológica, es importante mencionar que, en el caso de México, dicha información se puede obtener del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), CLICOM por sus siglas en inglés (CLimate COMputing project), BANDAS (Banco Nacional de Aguas Superficiales), y de estudios en campo realizados por universidades o particulares.

Para la información climatológica se emplearon las estaciones climatológicas mencionadas en la ilustración 19.

NAME	ELEVATION (M) ↕	LATITUDE ↕	LONGITUDE ↕
 Charapendo	1,013.00	19.27	-102.07
 Jicalan	1,610.00	19.39	-102.07
 Uruapan	1,611.00	19.39	-102.05

Ilustración 19 Estaciones climatológicas empleadas en la zona de estudio

Para la selección de las estaciones climatológicas, se tomó el criterio de menor cantidad de vacíos (menor al 25% de vacíos) en los datos y que tuvieran un mínimo de 25 años con datos de servicio y que estuvieran a no más de 30km del centroide de la cuenca en estudio para garantizar que tuvieran influencia en la zona de estudio, posteriormente se realizaron las pruebas de consistencia, en los que se debe de cumplir con las condiciones de aleatoriedad, homogeneidad e independencia.

En la ilustración 20 se muestra la localización de las 3 estaciones seleccionadas con respecto a la zona de estudio después de realizar polígonos de Thiessen para observar cuales estaciones tienen mayor influencia en la cuenca de estudio.

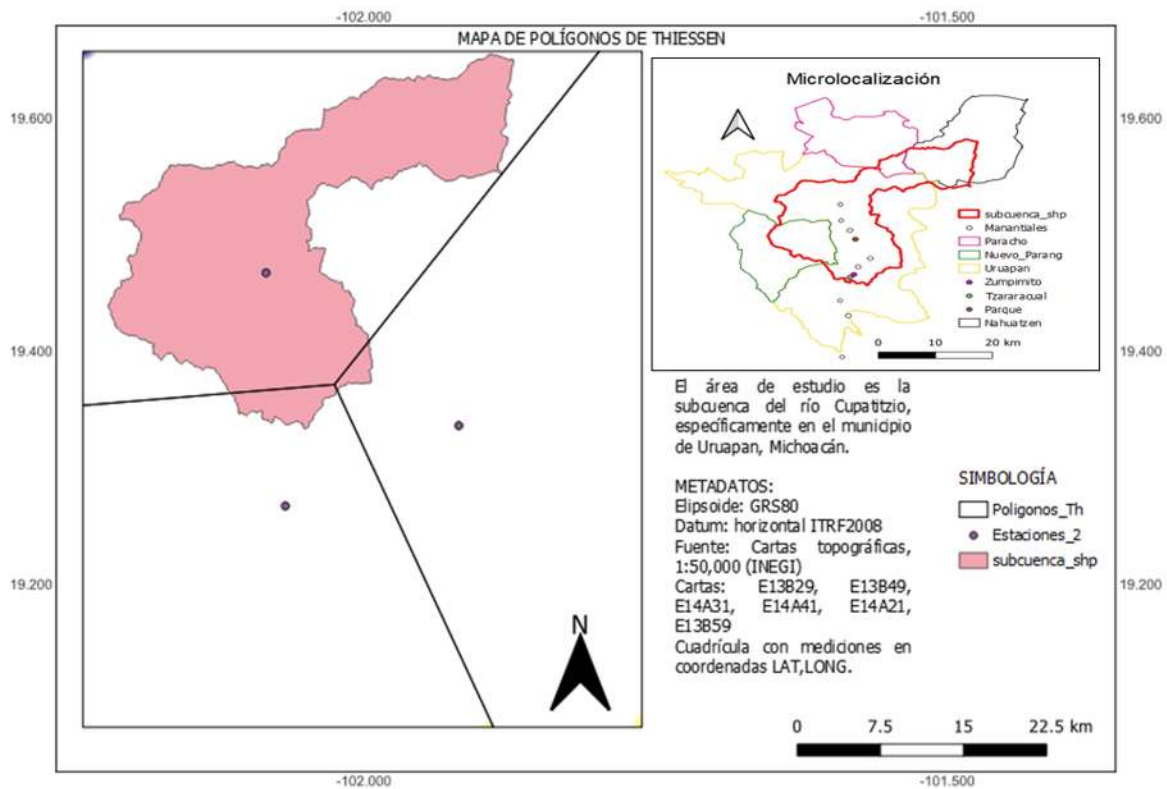


Ilustración 20 Polígono de Thiessen en las estaciones climatológicas empleadas en la zona de estudio

Las pruebas de homogeneidad que se emplearon fueron: prueba de secuencias, test de Helmert y Wald-Wolfowitz. Para comprobar la independencia de los datos se utilizaron los límites de Anderson.

De acuerdo con (Campos Aranda, 1998), la homogeneidad se cumple si todos los valores que cumplen la muestra provienen estadísticamente de una misma población; mientras que la independencia implica que cualquier dato no dependa de la ocurrencia de algún otro valor precedente.

Prueba de Secuencias

El procedimiento consiste en definir la mediana de la serie que se analiza, para lo cual los datos se ordenan según la magnitud, si el número de los valores (n) es impar, la mediana es el valor central; si n es par corresponde a la media aritmética de las dos magnitudes centrales. Con base en la mediana se marca la serie original con A si el dato es mayor y con B si es menor; las secuencias o sucesión (u) de los valores de A o B son contabilizadas y se concluye que la serie es homogénea si u está en el intervalo que marca la ilustración 21 de acuerdo con el tamaño de la muestra (n). Si se obtiene un alto valor de u la no homogeneidad se puede deber a un exceso de la oscilación de la serie, en cambio si u es reducido puede haber tendencia o cambio en la media (Campos Aranda, 1998).

n	u	n	u	n	u	n	u
12	5 a 8	22	9 a 14	32	13 a 20	50	22 a 30
14	5 a 10	24	9 a 16	34	14 a 21	60	26 a 36
16	6 a 11	26	10 a 17	36	15 a 22	70	31 a 42
18	7 a 12	28	11 a 18	38	16 a 23	80	35 a 47
20	8 a 13	30	12 a 19	40	16 a 25	100	45 a 57

Ilustración 21 Rangos de cambios permitidos para la prueba de Secuencias, de acuerdo al número de datos obtenido de (Campos Aranda, 1998).

Prueba de Helmert

Permite comprobar la homogeneidad de los datos mediante un procedimiento sencillo que consiste en ordenar la serie cronológicamente y analizar el signo de las desviaciones

con respecto a la media de cada dato. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, entonces se dice que forma una secuencia S, de lo contrario se considera un cambio: C (Campos Aranda, 1998).

Para comprobar que la serie es homogénea se aplica la ecuación 6.

$$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1} \quad (\text{Ecuación 6}).$$

Prueba Estadística Wald-Wolfowitz

Esta prueba permite determinar si existe alguna diferencia entre las dos series que se analizan, se deba tal diferencia a tendencia central, variabilidad, oblicuidad o cualquier cosa, es decir, que esta prueba descubre cualquier clase de discrepancia entre las series que se analizan (Campos Aranda, 1998).

Los procedimientos estadísticos paramétricos consisten en la aplicación de ecuaciones matemáticas que tienen como condición necesaria la existencia de una particular y reconocida distribución de la población.

Para probar la aleatoriedad, la hipótesis nula es:

H0: El proceso que genera el conjunto de datos numéricos es aleatorio.

La hipótesis alternativa:

H1: El proceso que genera el conjunto de datos numéricos no es aleatorio.

Procedimiento de la prueba:

-Dividir la muestra en dos partes, tomando como valor de referencia la media.

-Determinar el estadístico Z:

Teniendo la ecuación 7 para determinar la prueba estadística de Wald-Wolfowitz.

$$Z = \frac{R - \mu_R}{\sigma^2 R} \quad (\text{Ecuación 7}).$$

Donde μ_R se define en la ecuación 8:

$$\mu_R = \frac{2 * n1 * n1}{n} + 1 \quad (\text{Ecuación 8}).$$

La desviación estándar de R se representa con la ecuación 9:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{(\mu_R - 1)(\mu_R - 2)}{n - 1}} \quad (\text{Ecuación 9}).$$

En la comprobación de la independencia de los datos se emplearon los límites de Anderson.

Límites de Anderson

Para una serie independiente la población del correlograma es igual a cero para $K \neq 0$. Sin embargo, series temporales independientes, presentan variabilidad de la muestra, conteniendo fluctuaciones de alrededor de cero, pero estos no son necesariamente cero. Salas *et al.*, (1980).

Para calcular el correlograma, se debe considerar que a partir de la serie original (X) se genera una serie modificada (Y) que depende del desfase (k) que se esté aplicando; de esta forma, para un mismo k, se tiene una serie X y una serie Y Salas *et al.*, (1980).

Entonces, según el número de desfases, será el número de valores que se tiene en el correlograma (ρ), donde σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de las series X y Y, respectivamente y n representa el número de datos de la serie. Teniendo la ecuación 10 para determinarlos.

$$\rho = \beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (\text{Ecuación 10}).$$

Donde β se determina con la ecuación 11:

$$\beta = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (\text{Ecuación 11}).$$

Para determinar los límites de probabilidad de series independientes, se utilizan los límites de Anderson para un 90% de nivel de confianza, como se muestra en la ecuación 12.

$$r_{k(90\%)} = \frac{-1 \pm 1.90 \sqrt{nj-k-1}}{nj-k} \quad (\text{Ecuación 12}).$$

Al realizar las pruebas anteriormente mencionadas, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 1.

Nombre de la estación	Resultados de las pruebas de Consistencia			
	Secuencias	Helmert	WaldWolfowitz	Límites de Anderson
Charapendo	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
Jicalán	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
Uruapan	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

Tabla 1. Tabla de resultados de pruebas de consistencia en estaciones elegidas.

Como se muestra en los resultados, las estaciones seleccionadas cumplen con los criterios de homogeneidad e independencia, lo que indica que pueden dar datos acertados de precipitación y temperatura necesarios para la implementación del programa SWAT.

En el caso de los datos de uso de suelo también es necesario realizar una tabla de consulta con características similares a la empleada para el tipo de suelo, con códigos específicos para cada tipo de planta considerando que se encuentran en condiciones óptimas para su desarrollo, la nomenclatura propuesta es tan extensa, alrededor de 80 variedades de plantas son consideradas, que se decidió omitir la tabulación de la misma, sin embargo, dicha caracterización se encuentra disponible en la página web oficial del programa SWAT. (Bieger *et al.* 2017)

En la zona de estudio se cargó la información referente a los tipos y usos de suelo y el programa realizó la tabla de datos que se muestra en la ilustración 22.

NAME	HYD_GRP	DP_TOT	ANION_EXCL	PERC_CRK	TEXTURE
Be	B	600	0.500	0.500	LS
Ig	D	200	0.500	0.500	LS
Im	D	200	0.500	0.500	LS
Lc	C	600	0.500	0.500	SL
Pe	C	1000	0.500	0.500	SICL
Rd	B	600	0.500	0.500	LS
Tg	C	1000	0.500	0.500	SICL
Tm	C	1000	0.500	0.500	LS

Ilustración 22 Información sobre el tipo de suelo en la zona de estudio

En donde se incluye el nombre, grupo hidrológico, profundidad, Fracción de porosidad (espacio vacío) de la que se excluyen los aniones, percolación en los suelos y la textura. Después de obtener, clasificar y guardar en los formatos correspondientes la información necesaria de los datos tabulares de entrada que se requieren para desarrollar un modelo en el programa QSWAT+, es importante continuar con los datos espaciales, los cuales son: el modelo digital de elevaciones (MDE) y la red de drenaje correspondiente. (Bieger *et al.* 2017).

Al ingresar los datos, se puede completar la primera etapa del modelo, la cual se conoce como delimitación de la cuenca o área de estudio.

En la ilustración 23 se muestra el modelo digital de elevaciones (MDE) empleado, al igual que la región hidrológica 18 a la cual pertenece la subcuenca en estudio, dicha área se

encuentra delimitada por el contorno amarillo en la ilustración, mientras que de color rojo se encuentran las unidades de respuesta hidrológicas propuestas por el programa, de color azul las corrientes generadas por el programa a partir del MDE.

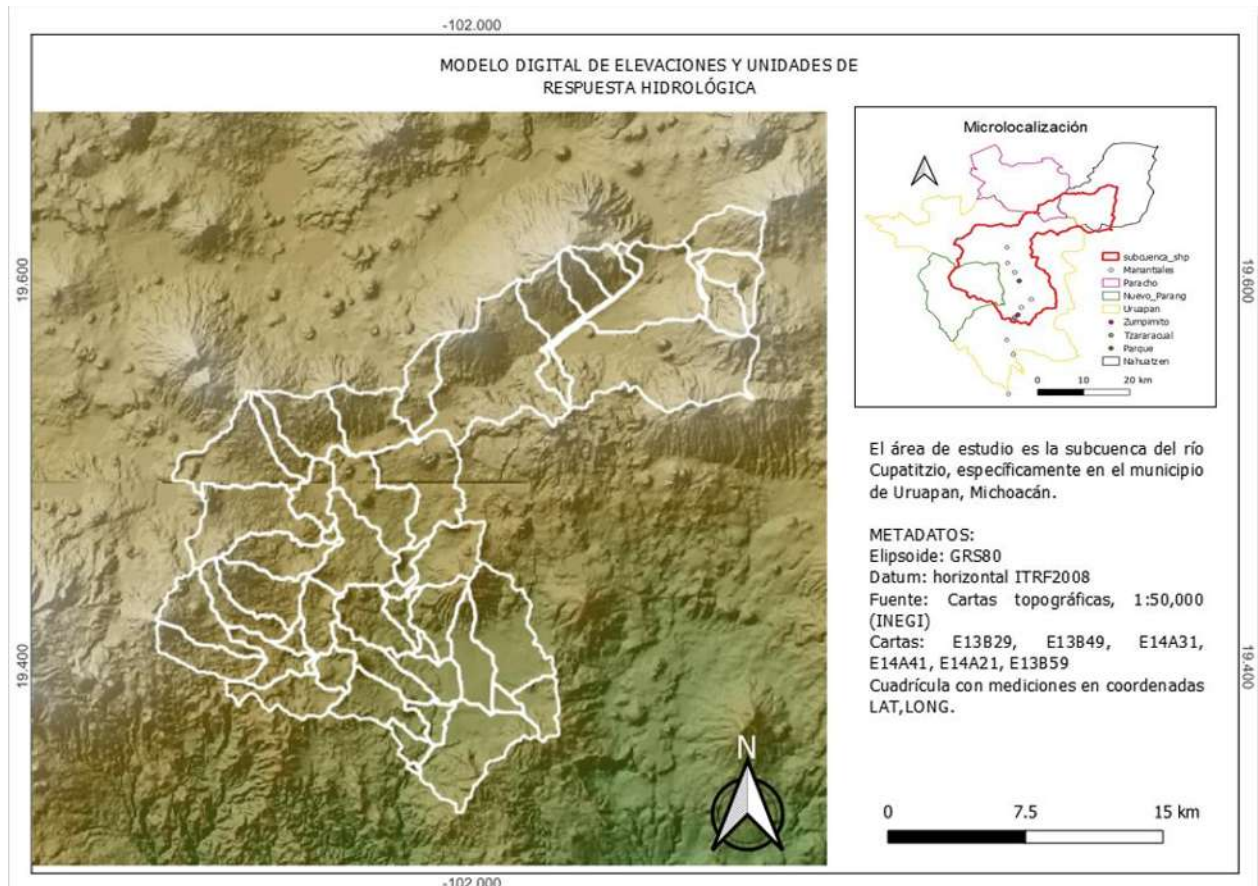


Ilustración 23 Modelo digital de elevaciones de la zona en estudio

En la ilustración 24 se muestra la red de drenaje generada por el programa a partir del MDE, de rojo se delimita la zona en estudio y se pueden observar las divisiones de las unidades de respuesta hidrológica (HRU).

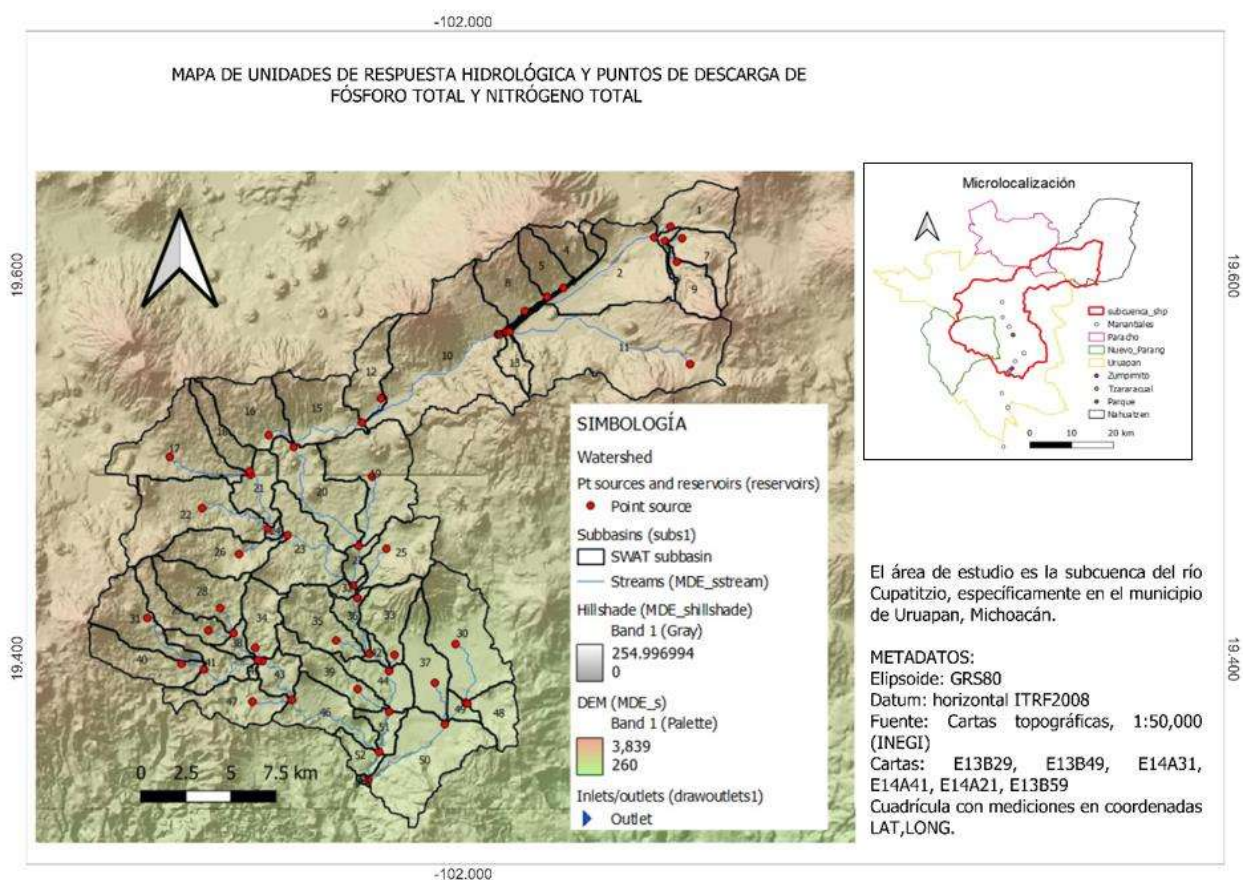


Ilustración 24 red de drenaje en la zona de estudio

Al terminar de ingresar los datos necesarios para la implementación del programa SWAT, se obtienen datos parciales, los cuales es necesario corroborar mediante la calibración del modelo, como menciona (Moriasi et al., 2007). La calibración de un modelo es el proceso de estimar los parámetros del modelo mediante comparaciones de las predicciones del modelo para un conjunto dado de condiciones supuestas con datos observados bajo las mismas condiciones. La validación del modelo implica ejecutar un modelo que utiliza los parámetros de entrada determinados durante el proceso de calibración.

El proceso para la obtención de resultados que se puedan validar será el mostrado en la ilustración 25.

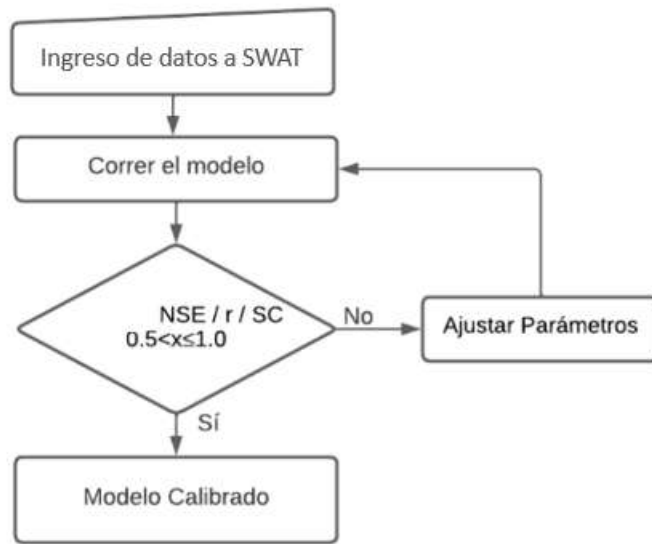


Ilustración 25 Proceso de calibración.

Para el proceso de calibración se tomará como base el caudal registrado en la estación hidrométrica de la Tzararacua, en la primera calibración mostrada en la ilustración 23 se puede observar la diferencia entre los volúmenes de caudal registrados en la estación hidrométrica y en la corrida del programa SWAT al ingresar los datos.

Para comprobar que la calibración es buena, se emplean los siguientes indicadores de ajuste:

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

Es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual, comparada con la varianza de los datos mostrados. La eficiencia de Nash-Sutcliffe indica que tan bien se ajusta la gráfica de datos observados contra la gráfica de los datos simulados (Moriasi et al., 2007).

Se calcula como muestra en la ecuación 13

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Qsim(t) - Qobs(t))^2}{\sum_{i=1}^N (Qsim(t) - \bar{Qobs(t)})^2} \right] \quad (\text{Ecuación 13}).$$

Donde QObs(t) son los datos observados, Qsim(t) son los datos simulados, $\bar{Q}_{obs}(t)$ es el promedio de los datos de observados para el periodo de tiempo estudiado.

Coeficiente de Correlación de Pearson (r)

Describe el grado de colinealidad entre los datos simulados y los datos observados, teniendo valores entre -1 a 1. Si $r=0$, la relación lineal no existe, sin embargo, si r se encuentra entre 1 o -1, una perfecta relación lineal positiva o negativa existe (Moriasi et al., 2007). La ecuación 14 determina el Coeficiente de Pearson.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Qsim(t) - \bar{Qsim}) * Qobs(t) - \bar{Qobs}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Qsim(t) - \bar{Qsim})^2 * \sum_{i=1}^N (obs(t) - \bar{Qobs})^2}} \quad (\text{Ecuación 14}).$$

Coeficiente de Simetría (CS)

Es una medida de la simetría del ajuste entre la simulación y la observación medias; esta característica, aunque simple, es importante preservarla en modelaciones de periodos largos. Si el valor de CS es 1, quiere decir que la serie observada y a serie simulada tiene la misma media, estando representada por la ecuación 15.

$$CS = 1 - [\max\left(\frac{\bar{Qsim}}{\bar{Qobs}}; \frac{\bar{Qobs}}{\bar{Qsim}}\right) - 1]^2 \quad (\text{Ecuación 15}).$$

En la tabla 2 se muestran los valores esperados de una buena calibración de acuerdo con los indicadores de ajuste mencionados, mientras que en la ilustración 23 se muestra la tabla de resultados obtenidos de la calibración realizada, por lo que los resultados se toman como buenos para continuar con la modelación de la cuenca.

Calidad	NSE / r / SC
Muy Buena	$0.75 < \text{Coeficiente} \leq 1.00$
Buena	$0.65 < \text{Coeficiente} \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.5 < \text{Coeficiente} \leq 0.65$
No Satisfactoria	$\text{Coeficiente} \leq 0.50$

Tabla 2 Calidad de los indicadores de bondad de ajuste (Moriassi et al., 2007).

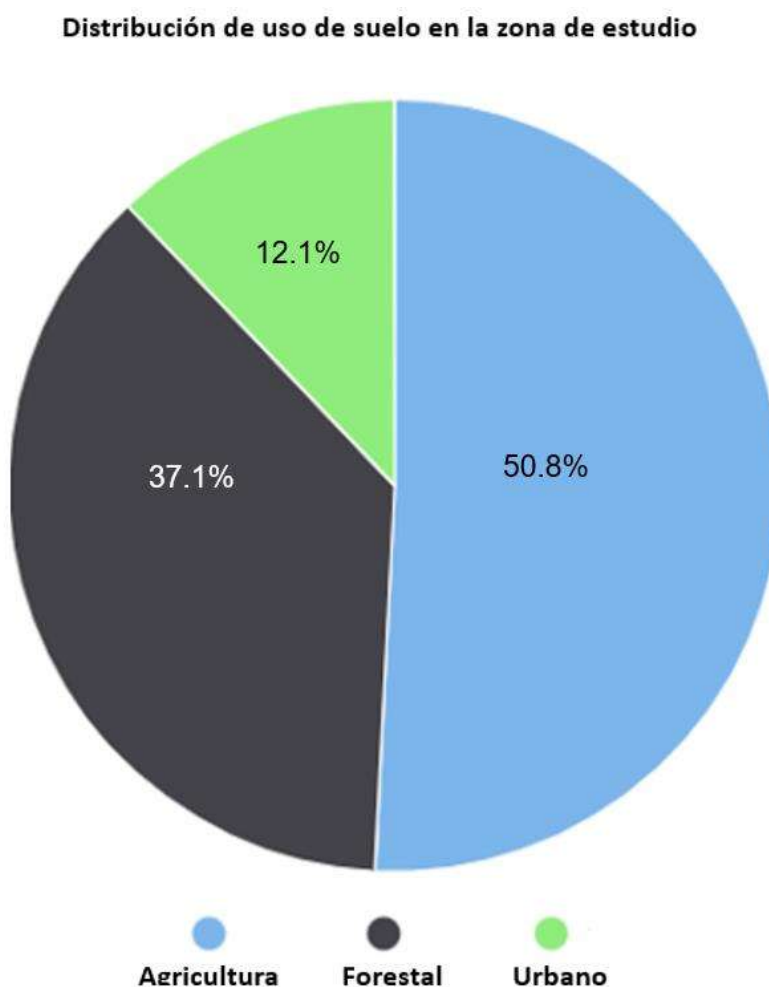
Los resultados obtenidos con las simulaciones se comprobaron con el uso de los indicadores de ajuste de bondad, al realizar la comparativa se comprobó que las modelaciones son confiables para simular las condiciones precedentes y actuales de la cuenca. En la tabla 3 se muestra la tabla que enlista los resultados obtenidos por los indicadores de ajuste de bondad.

INDICADORES DE BONDAD DE AJUSTE
NASH SUTCLIFFE 0.5040
LN NASH SUTCLIFFE 0.6242
PEARSON 0.7235
COEF. SIMETRÍA 0.9345

Tabla 3 Tabla de resultados de calidad de los indicadores de bondad de ajuste.

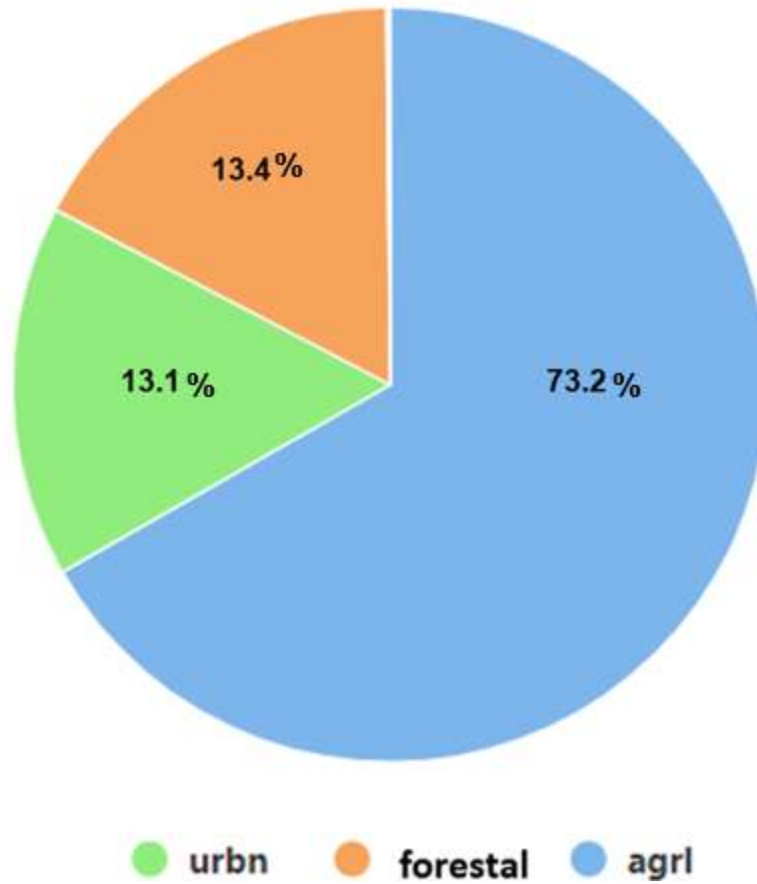
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El programa brinda datos relacionados a la superficie de la cuenca una vez que se realiza la modelación. En la gráfica 1 se observa el uso de suelo en la zona de estudio en el año 2016, mientras que en la gráfica 2 se muestra el uso de suelo en el año 2020, estos resultados nos ayudan a verificar el cambio de uso de suelo en la región en el cual el más del 22% de la superficie de la cuenca tuvo un cambio de uso de suelo de forestal y urbano a zona agrícola.



Gráfica 1 Gráfica de usos de suelo en la zona de estudio en el año 2016

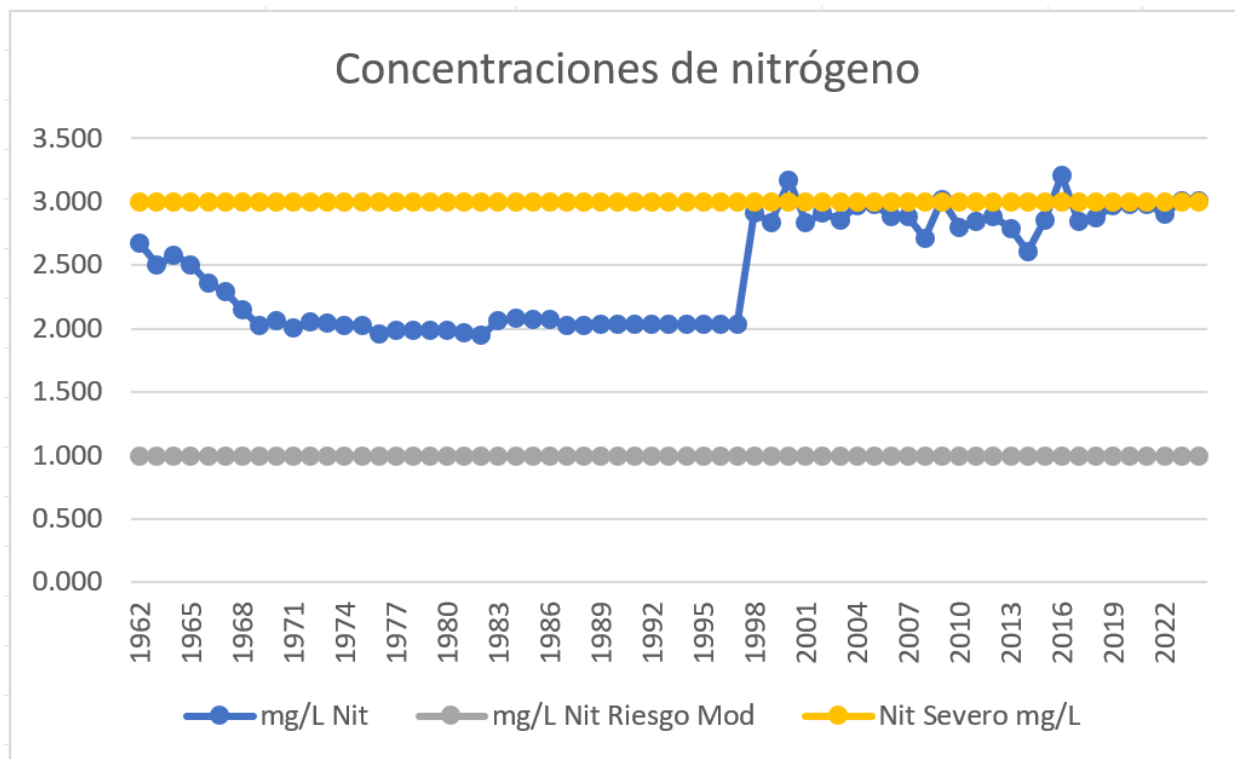
Distribución de uso de suelo en la zona de estudio



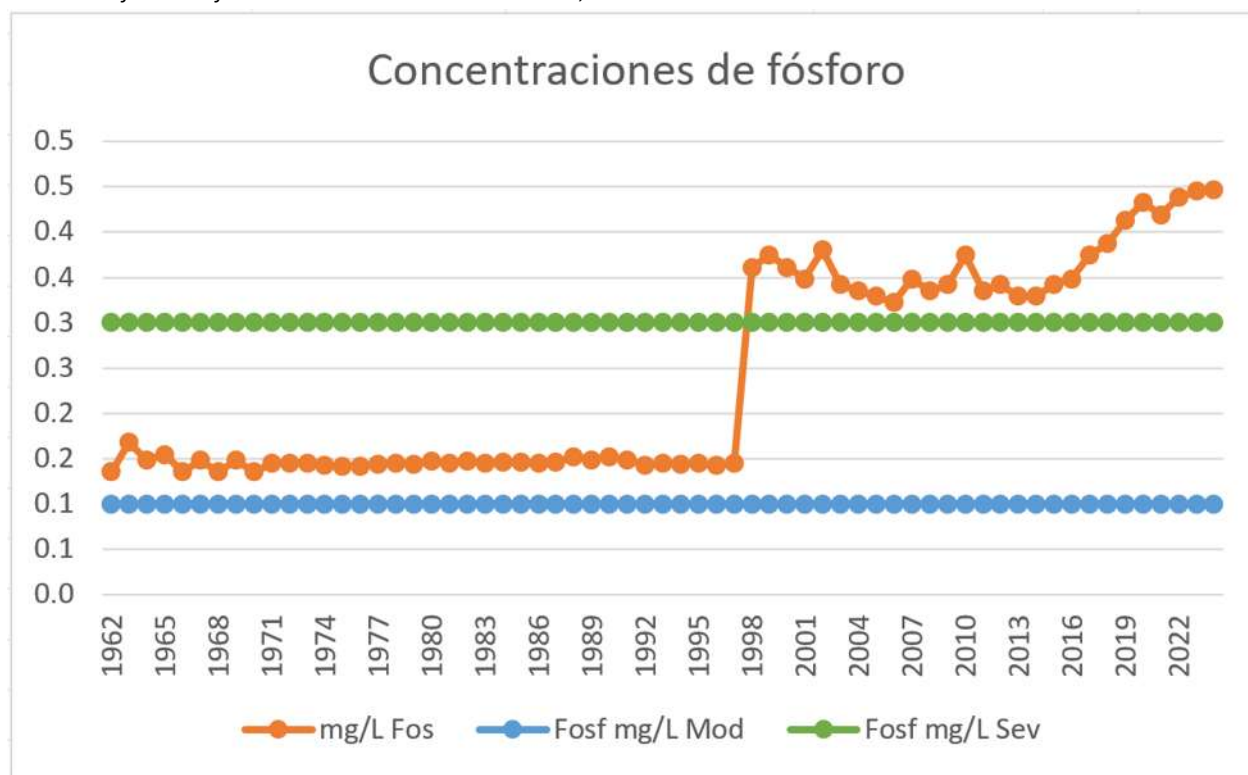
Gráfica 2 Gráfica de usos de suelo en la zona de estudio en el año 2024 según la simulación en el programa SWAT

A partir de los datos obtenidos se realizaron 2 escenarios, en los dos se tomaron en cuenta los mismos años de estudio (1962 a 2016) realizando proyecciones hasta el 2022. En las gráficas 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos en SWAT con respecto a las concentraciones en la cuenca en la situación actual, mientras que las gráficas 5 y 6 se muestra el escenario sin huertas de aguacate, las concentraciones se muestran como un promedio de los valores obtenidos en campo y los calculados por el programa a partir de la modelación de las condiciones de la cuenca.

Las gráficas 3 y 4 muestran los valores de eutroficación en cuerpos de agua superficiales, considerados por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.) mostrando en amarillo los valores en donde el riesgo de eutroficación en el cuerpo de agua es severo en el caso del nitrógeno y verde en el fosforo, mientras que el rango delimitado por la franja horizontal gris en el nitrato y azul en el fosforo representan los valores en donde el nivel de eutroficación es de riesgo moderado.



Gráfica 3 Gráfica de resultados de concentraciones, obtenidos en SWAT en la cuenca en la situación actual



Gráfica 4 Gráfica de resultados de concentraciones, obtenidos en SWAT en la cuenca en la situación actual

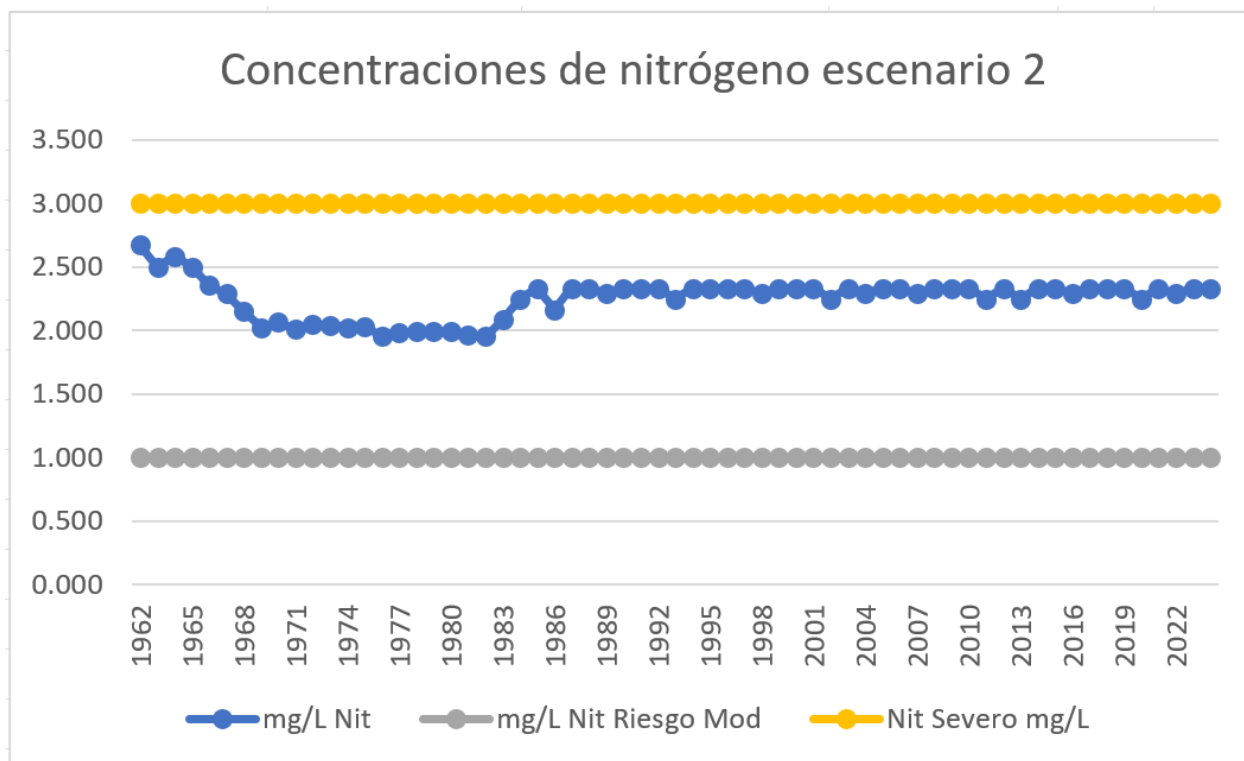
En las gráficas 3 y 4 se observa la situación actual de la cuenca en términos de

concentración de fósforo y nitrógeno. Las concentraciones son medidas en masa sobre área, sin embargo, el modelo realiza la simulación tomando en cuenta el tiempo, por lo que lo convierte a tasa de flujo de masa sobre área, teniendo un comportamiento de difusión en el cual el contaminante se desplaza a través de las moléculas del agua, pero empleando la definición de un mecanismo mecánico ya que lo emplea en una gran escala.

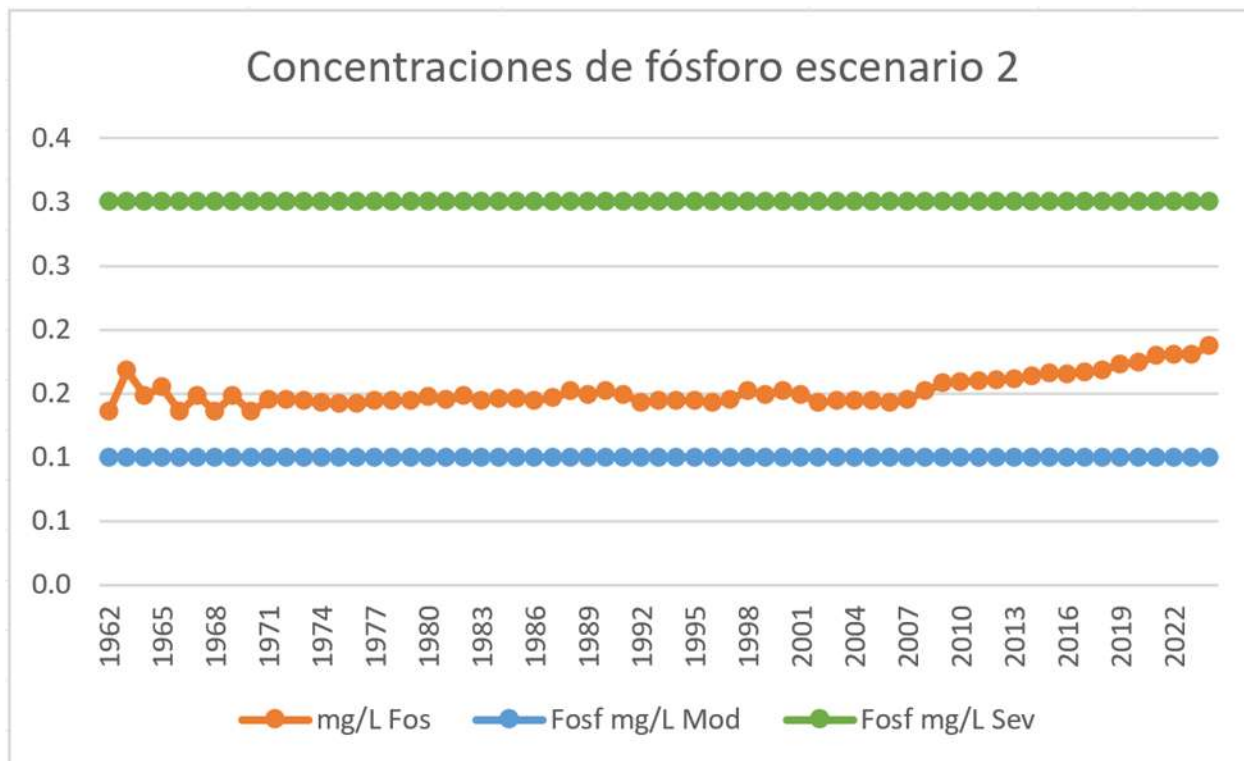
Como se puede observar en las gráficas, la situación actual de la cuenca supone un problema severo de eutroficación tomando en cuenta los parámetros propuestos por la agencia EPA, U.S. Environmental Protection Agency. (2000). representados en la gráfica como las líneas amarillas y verdes en las gráficas 3 y 4 respectivamente.

Para emplear el modelo es necesario un mínimo de 12 años de registro de datos para observar el comportamiento de la cuenca y realizar proyecciones. Como se observa en el modelo actual, hay una mayor cantidad de contaminantes en el año 1998, lo cual coincide con la implementación del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), dicho tratado entró oficialmente en vigor en el año de 1994, pero recordando que la producción de aguacate en las huertas puede tardar hasta 3 años en producir el fruto para exportación, coincide con el incremento que se observa en la gráfica.

En las gráficas 5 y 6 se observan los resultados de las modelaciones considerando un escenario en el cual el uso de suelo del aguacate es controlado y se priorizan los plantíos de especies nativas, lo que quiere decir que se ignoran el 22% de cambio de uso de suelo de la cuenca que se explica con anterioridad, sin embargo, el modelo realiza la modelación con todos los datos de las estaciones meteorológicas por lo que se toman en cuenta todos los años de los que se tienen datos, y realiza un cálculo que considera una función normal del comportamiento de la cuenca, por ello se ve una disminución en la cuantificación de los contaminantes incluso antes del año 2016, que es de donde se consideró el cambio de uso de suelo siendo estos los datos más actualizados hasta la fecha.



Gráfica 5 Gráfica de resultados de concentraciones, obtenidos en SWAT en la cuenca escenario 2



Gráfica 6 Gráfica de resultados de concentraciones, obtenidos en SWAT en la cuenca escenario 2

En la ilustración 26 se puede observar la interacción en el ciclo del agua en la situación actual en la cuenca, ya que es el escenario que se toma como base para las propuestas de mitigación y el que se tomará en cuenta para las ilustraciones siguientes, con resultados expresados en mm por unidad de área. En el presente trabajo se emplearon hectáreas, siendo los mismos promedios diarios, en el caso de la precipitación son mm/hr. En la imagen se puede observar que la cantidad de precipitación es menor a la que es necesaria para el área de irrigación, por lo que se obtiene agua subterránea de la cuenca del río Cupatitzio.



Ilustración 26 Ciclo del agua en la zona de estudio, unidades en mm/ha.

En la ilustración 27 se puede observar el aporte de sedimentos en la cuenca de acuerdo a los datos ingresados en el programa. Los sedimentos que se ven en la corriente derivados de fuentes puntuales, son los que se ingresan en el programa como aportaciones de nitrógeno y de fósforo total, y la escorrentía toma en cuenta los sedimentos producidos por el proceso de decaimiento de las partículas de los nutrientes en la corriente.



Ilustración 27 Aporte de sedimentos en la cuenca de estudio.

En la ilustración 28 se observa el ciclo biogeoquímico del nitrógeno obtenido a partir de la modelación en el programa SWAT. En la ilustración se puede observar el proceso de los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes fosforo y nitrógeno, pero principalmente del proceso del nitrógeno ya que también menciona el proceso de nitrificación, el cual es el primer paso del proceso donde las bacterias, conocidas como Nitrosomonas, oxidan el ión amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-) importante en la contaminación en subsuelo y nocivos para la salud.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través de la presente investigación se realizó la modelación de la subcuenca del río Cupatitzio, en la ciudad de Uruapan, Michoacán, lo cual permitió evaluar la magnitud de las cantidades de nitrógeno total y de fósforo total presentes en la misma subcuenca, mostrando que el contaminante principal de la subcuenca es el nitrógeno en forma de nitratos en la zona de la presa Zumpimito, y al comparar sus concentraciones con la norma CE-CCA-001 (1989), se comprobó que no es apta para consumo humano. Tras analizar posibles escenarios y comparativas con la modelación de datos obtenidos en campo desde 1962 a 2016, y comparando con los resultados de la modelación última que es el estado actual de la cuenca en 2022, se llegaron a las siguientes conclusiones:

Tanto en la investigación en campo como en la modelación se pudo observar que el cambio de uso de suelo en la región de Uruapan es el principal factor de afectación en las fuentes de contaminación difusa, afectando principalmente áreas de bosques y plantíos de temporal.

Se observó que los principales fertilizantes y pesticidas empleados en el cultivo se administran de manera foliar y con un exceso del 50% en la aplicación por la volatilidad del producto, mientras que, en plantíos de temporada, en este caso el maíz, la aplicación del fertilizante es desmesurada.

Las cantidades más elevadas de nitratos y fósforo total se encuentran en la zona baja de estudio en la presa del Zumpimito continuando con el arrastre de contaminantes el cual disminuye notablemente en la presa del río Cupatitzio, en dicha presa abunda el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), que de acuerdo con Martelo & Borrero (2012) las plantas macrófitas, como el Jacinto, ayudan a absorber metales pesados y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

Recomendaciones:

Utilizar mejores medidas de manejo (Best Management Practices) orientadas a la prevención, control y remediación del proceso de eutroficación en los cuerpos de agua, en las condiciones actuales de la cuenca se recomienda:

- 1) Cultivos de cobertura para maximizar la productividad del suelo sin insumos químicos, prevenir la erosión y la escorrentía, estimulando el suelo para retener más agua, por lo que los plantíos tendrían más agua disponible durante las sequías y serían más resistentes a plagas y enfermedades.
- 2) Uso controlado de los nutrientes, se recomienda realizar análisis de suelo para preparar las mezclas de acuerdo a los déficits que se tienen de nutrientes y emplear la cantidad necesaria, evitando concentraciones excesivas de nitrógeno y fosforo que pueden percolarse a mantos acuíferos o a cuerpos de agua superficiales
- 3) La colocación de fertilizante en bandas, lo que significa colocar fertilizante en una banda concentrada cerca de la semilla durante la siembra, esta práctica puede realizarse durante la siembra de maíz.
- 4) Implementación de las zonas de amortiguamiento integradas (IBZ, por sus siglas en inglés), diseñadas para disminuir la carga de nitrógeno (N). En un IBZ, el agua de drenaje fluye hacia un estanque con superficie de agua libre, seguida de un lecho filtrante inundado y con vegetación.

11. DOCUMENTOS CONSULTADOS

- Adame, P. (2007). Las cuencas hidrológicas de México y su vulnerabilidad socioambiental por el agua. Sustentabilidad Desarrollo ambiental.
- Aguilar, J., C. Illsley y C. Marielle. 2003. Los sistemas agrícolas de maíz y sus procesos técnicos. pp. 83-122. In: G. Esteva y C. Marielle (eds.). Sin maíz no hay país. CONACULTA. Ciudad de México
- Antezana, J. N. (2022). *Red Mexicana de Cuencas*.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2013). SWAT 2012 Input/Output Documentation. Texas Water Resources Institute.
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., ... & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 53(1), 115-130.
- Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis Potosí: Editorial Universidad Potosina.
- Chávez, L. G. (2012). Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate. Centro de investigación regional pacífico centro.
- COMISION NACIONAL DEL AGUA (CNA). (2005). Delimitación de acuíferos. Gerencia de Aguas subterráneas.
- CONAGUA. (2015). Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Uruapan, estado de Michoacán. Subdirección general técnica gerencia de aguas subterráneas. Obtenido de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/michoacan/DR_1614.pdf
- CONANP- SEMARNAT. (2006). Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Barranca del Cupatitzio. México.
- De Estadística Geografía E Informática, I. N. (2008). Guía para la interpretación de cartografía: edafología.
- Ebel, R., Pozas Cárdenas, J. G., Soria Miranda, F., & Cruz González, J. (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. Terra Latinoamericana: organo científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C, 35(2), 149. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i2.166>
- Fernández Cirelli, A., (2012). El agua: un recurso esencial. Química Viva, 11(3),147-170, Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002>
- Forest Service Department of Agriculture, Bosque Nacional El Yunque E. U. (2023). Cuencas hidrográficas. https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5338930.pdf
- Gutiérrez, F. A. A., & Rincón, L. E. C. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. Revista colombiana de biotecnología, 14(1), 285-295.
- Harrison, J. A., Beusen, A. H., Fink, G., Tang, T., Strokal, M., Bouwman, A. F., Metson, G. S., & Vilmin, L. (2019). Modeling phosphorus in rivers at the global scale: Recent successes, remaining challenges, and near-

- term opportunities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, 68-77.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.10.010>
- Hu, B. L., Shen, L. D., Xu, X. Y., & Zheng, P. (2011). Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in different natural ecosystems. *Biochemical Society Transactions*, 39(6), 1811-1816.
- Ibáñez, J. J. (2009). Ciclo del fósforo en agroecosistemas y reacción de los fertilizantes fosfatados en el suelo. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid.
- IMTA. (2019). ¿Qué es una cuenca? Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- IMPLAN. Instituto Municipal de Planeación de Uruapan. (2020). Sistema hídrico. Obtenido de <https://implanuruapan.gob.mx/wp-content/uploads/2020/10/II.D3.308-Sistema-Hidrico.pdf>
- INIFAP, CIRPC, CEU, (2012). Impactos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate. Libro técnico núm., 13, ISBN: 978-607-425-825-7.
- INEGI (2008) Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000.
- INEGI (2010). INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Uruapan, Michoacán de Ocampo.
- INEGI (2020). Estadísticas Nacionales. Recuperado de Censo Población y Vivienda 2020 (inegi.org.mx)
- Iverson, A. L., L. E Marín, K. K. Ennis, D. J. Gonthier, B. T. Connor, J. L. Remfert, J. Cardinale, and I. Perfecto. 2014. Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis. *J. Appl. Ecol.* 51: 1593-1602. doi: 10.1111/1365-2664.12334.
- Liu, L., Zheng, X., Wei, X., Kai, Z., & Xu, Y. (2021). Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication. *Scientific Reports*, 11(1), 23015. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02521-7>
- Magaña, A. L. (2014). EVALUACIÓN INTEGRAL DE LOS IMPACTOS DE LA VARIABILIDAD Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AGRICULTURA DE MAÍZ EN EL ESTADO DE MICHOACÁN. Colegio de la frontera del norte.
- Márquez, S. R. (2014). UN IMPULSO A LA PRODUCCIÓN Y CONSERVACIÓN DE MAÍZ CRIOLLO EN EL ESTADO DE MICHOACÁN, A TRAVÉS DE UNA PROPUESTA DE POLÍTICA PÚBLICA. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Martelo, J., & Borrero, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería Y Ciencia*, 8, 221-243.
- Medina, J. R. (2018). Procesos del cambio de cobertura y uso del suelo como indicadores del crecimiento urbano en ciudades medias del estado de Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Mendonça dos Santos, F., Proença de Oliveira, R., & Mauad, F. F. (2020). Evaluating a parsimonious watershed model versus SWAT to estimate streamflow, soil loss and river contamination in two case studies in Tietê river basin, São Paulo, Brazil.
- Mendoza Mora, F. (2017). CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO CUPATITZIO, MICHOACÁN. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., y Van Liew, M. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Neitsch, S. L., Arnold, J., Kinry, J. R., & Williams, J. R. (2005). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation.
- Noopur, A., & Munendra, K. (2021). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Modelling: A Review. International Journal of Innovative Science and Research Technology, 1084-1087.
- Ortega, M., Aguilera, M., Hernández, R., & Díaz, N. (2014). El perifitón de la subcuenca del río Cupatitzio Michoacán México. Revista Biológicas No. 16.
- Pérez, R., Aguilera, M., & Mora, J. (2006). Monitoreo ambiental del río “Cupatitzio” en la cabecera de la microcuenca y dentro del Parque Nacional “Barranca del Cupatitzio” en la Ciudad de Uruapan Michoacán. 18-30.
- Postma, J. A. and J. P. Lynch. 2012. Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. Ann. Bot. 110: 521-534. doi: 10.1093/aob/mcs082
- Pureco Ornelas, J. A. (2016). El agua del río Cupatitzio: la vertebración de una comarca socioeconómica en el centro de Michoacán. región y sociedad. doi:<https://doi.org/10.22198/rys.2016.67.a198>
- Rey Santos, O. (2014). El agua en un mundo en crisis. Revista de Estudios Estratégicos no. 1.
- Ruiz Chávez, G. A. (2020). Tema 1 El ciclo hidrológico y fuentes de abastecimiento. En APUNTES DE LA MATERIA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.
- Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V., y Lane, W. (1980). Applied modeling of hydrologic time series. Colorado: Water Resources Publications.
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (27/Mayo/2021). Aguacate michoacano, oro verde para los pequeños productores. <https://www.gob.mx/senasica/articulos/aguacate-michoacano-oro-verde-para-los-pequenos-producto>
- Téliz Daniel, A. M. (2019). El aguacate y su manejo integrado. Biblioteca básica de agricultura.
- UNIVERSIDAD DE FLORIDA, EEUU. Plant Management in Florida Waters, 2005. p 31-45.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Nutrient criteria technical guidance manual: Rivers and streams*. Obtenido de <https://www.epa.gov/nutrient-criteria>
- Valencia-Vargas, J. C. (2015). Desarrollo de la región hidrológica del Balsas mediante la modificación de su veda. Tecnología y Ciencias del Agua, 6(1), 81–97.
- Villacrés, V. C. (2018). DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN QUE GUARDA LA OPERACIÓN, CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA DE LOS MANANTIALES EN LA CUENCA DEL RÍO CUPATITZIO, MICHOACÁN, MÉXICO. Instituto Politécnico Nacional de México.
- Xia, Y., Zhang, M., Tsang, D. C. W., Geng, N., Lu, D., Zhu, L., Igalavithana, A. D., Dissanayake, P. D., Rinklebe, J., Yang, X., & Ok, Y. S. (2020). Recent advances in control technologies for non-point source pollution with

nitrogen and phosphorous from agricultural runoff: current practices and future prospects. *Applied Biological Chemistry*, 63(1). <https://doi.org/10.1186/s13765-020-0493-6>

Zhang, C., J. A. Postma, L. M. York, and J. P. Lynch. 2014. Root foraging elicits niche complementarity-dependent yield advantage in the ancient 'three sisters' (maize/bean/squash) polyculture. *Ann. Bot.* 191: 1719-1733. doi: 10.1093/aob/mcu191

Zhang, Y., Luo, P., Zhao, S., Kang, S., Wang, P., Zhou, M., & Lyu, J. (2020). Control and remediation methods for eutrophic lakes in the past 30 years. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 81(6), 1099–1113. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.218>

Verónica Molina Rodríguez

Modelación de la carga de nitrógeno total y de fósforo total en la subcuenca del río Cupatitzio, en

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:401857331

Fecha de entrega

4 nov 2024, 12:35 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

4 nov 2024, 12:39 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

Modelación de la carga de nitrógeno total y de fósforo total en la subcuenca del río Cupatitzio, e....pdf

Tamaño de archivo

3.1 MB

81 Páginas

17,341 Palabras

93,661 Caracteres

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental	
Título del trabajo	Modelación de la carga de nitrógeno total y de fósforo total en la subcuenca del río Cupatitzio, en la ciudad de Uruapan, Michoacán, mediante el programa QSWAT	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Verónica Molina Rodríguez	1612618k@umich.mx
Director	Ezequiel García Rodríguez	ezequiel.garcia@umich.mx
Codirector	Ricardo Ruiz Chávez	ricardo.ruiz@umich.mx
Coordinador del programa	Hugo Luis Chávez García	luis.chavez@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Veronica Molina 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán 27 de Enero de 2025