



**UNIVERSIDAD MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



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

Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Tesis

**“Modelación Hidrológica Superficial del Transporte de
Nitrógeno en la Subcuenca de la Presa de Cointzio”**

Presenta

**Estefany Durán Rojas
Ingeniera en Biotecnología**

**Para obtener el grado de
Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental**

**Asesor de Tesis
Dr. Julio César Orantes Ávalos**

**Coasesor de Tesis
Dr. Jesús Pardo Loaiza**

Morelia, Michoacán. Enero, 2025

Agradecimientos

La gratitud además de ser un sentimiento, es una llave que nos abre las puertas a la alegría y a la satisfacción en nuestro día a día, que no solo está presente en los buenos momentos, sino también en aquellos desafíos que nos presenta la vida. Es por ello que quiero expresar mi más profunda gratitud a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de tesis.

En primer lugar, a Dios, por darme la sabiduría, la fuerza y la perseverancia necesaria para culminar una meta más en mi vida, porque de su mano y con Fe, todo es posible.

A mi familia, por su apoyo y comprensión, su paciencia en días difíciles. Y por estar siempre dándome ánimos.

Al programa CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías) por la beca proporcionada en el Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental durante estos dos años.

A mis asesores de Tesis; el Dr. Julio César Orantes Ávalos por aceptarme como parte de su equipo de investigación, brindarme su apoyo y conocimiento compartido. El Dr. Jesús Pardo Loaiza por el conocimiento compartido, su paciencia y apoyo en un tema nuevo para mí.

A quienes formaron parte de mi mesa sinodal: la Dra. Liliana García Romero, la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe y la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva. Quienes me han guiado y acompañado durante estos dos años y que con su experiencia, observaciones y sugerencias se iba enriqueciendo este proyecto.

Al Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) por el apoyo para la realización de los análisis de calidad del agua, en especial a la jefa del mismo departamento, la MCIA. Carmen Cano Correa por sus constantes ánimos, conocimiento compartido y su apoyo incondicional para la realización del muestreo y su posterior análisis.

Al laboratorio UKUA LAB, por su apoyo para la realización de los análisis de sedimentos.

Índice

Agradecimientos.....	2
Resumen	10
Abstract.....	12
I. Marco Conceptual	14
1.1 Introducción.....	14
1.2 Planteamiento del problema	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Hipótesis	18
1.5 Justificación	19
1.6 Antecedentes.....	21
II. Marco Teórico.....	25
2.1 Contaminación del agua: natural y antropogénica	26
2.2 Contaminación del agua por fuentes puntuales y difusas	29
2.2.1 Fuentes puntuales	29
2.2.2 Fuentes no puntuales o difusas	29
2.3 Ciclo del Nitrógeno	30
2.3.1 Etapas del ciclo del nitrógeno	31
2.3.2 El Nitrógeno en sus diferentes formas	33
2.4 Efectos por la contaminación con nitrógeno en el agua y riesgos a la salud	35
2.5 Caracterización de la Subcuenca de Cointzio	
2.5.1 Localización de la zona de estudio	37
2.5.2 Clima y Geomorfología.....	39
2.5.3 Cobertura vegetal	40
2.5.4 Tipo de suelo.....	40
2.5.5 Usos de suelo.....	42
2.5.6 Prácticas agrícolas	43

2.5.7 Uso de fertilizantes.....	46
2.6 Problemática de contaminación en la zona.....	47
2.7 Modelación hidrológica.....	52
2.7.1 Modelos de transporte.....	52
2.7.2 Modelo SWAT	54
2.7.3 Modelación del nitrógeno en SWAT	57
III. Metodología.....	60
3.1 Caracterización de la zona de estudio	61
3.2 Recopilación de la información.....	61
3.3 Modelo Digital de Elevaciones (MDE).....	61
3.4 Mapas de uso y tipo de suelo.....	62
3.5 Procesamiento de información en QGIS.....	62
3.6 Reclasificación de los mapas	63
3.7 Estaciones climatológicas	64
3.8 Estaciones hidrométricas	64
3.9. Análisis estadístico de la información	65
3.10 Muestreo en la presa de Cointzio para la determinación de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniaco.....	69
3.11 Calibración y validación del modelo	74
IV. Resultados y Discusión	81
V. Conclusiones	97
VI. Recomendaciones.....	98
VII. Referencias	99
Anexo A.- Resultados del análisis de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniaco en agua	110
Anexo B.- Resultados del análisis de nitrógeno amoniaco en sedimentos.	116

Índice de Figuras

Figura 2.1 Esquema ilustrativo de la contaminación del agua debido a fuentes y fuentes antropogénicas, sus vías, receptores y otros tipos de contaminación. Editado a partir de (Akhtar, Syakir, Bhawani y Umar, 2021)	27
Figura 2.2. Actividades que originan la contaminación antropogénica.....	28
Figura 2.3. Ciclo del Nitrógeno. Fuente: Comisión Europea.....	33
Figura 2.4. Formas del nitrógeno en el agua. Fuente: Hernández Batis, 2016.....	34
Figura 2.5. Ubicación geográfica de la subcuenca de Cointzio. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 2.6. Ubicación de municipios dentro de la Subcuenca de Cointzio. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 2.7. Tipos de suelos en la subcuenca de la Presa de Cointzio. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 2.8. Uso de suelos en la subcuenca de la Presa de Cointzio. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 2.9. Principales factores políticos, de manejo, socioeconómicos y ambientales de degradación del suelo en Cointzio. Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México.....	49
Figura 2.10. Eutrofización en la presa de Cointzio.....	50
Figura 2.11 Ubicación del predio destinado para la construcción de la planta tratadora de aguas residuales, en la localidad de Santiago Undameo, municipio de Morelia, Mich. Fuente: Dirección general de impacto y riesgo ambiental.....	51
Figura 2.12 Planta tratadora de aguas residuales en Santiago Undameo. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 2.13 Diagrama de la configuración del proyecto en SWAT. Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de SWAT, 2021.....	57
Figura 2.14.- Principales componentes del ciclo del nitrógeno en SWAT. Fuente: Manual SWAT, 2005.....	58

Figura 2.15.- División del nitrógeno en SWAT. Fuente: Manual SWAT, 2021.....	58
Figura 3.1.- Diagrama general de la metodología empleada para la modelación. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 3.2.- Red de corrientes y ubicación de la estación hidrométrica 12347. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 3.3.- Puntos de muestreo en la Presa de Cointzio. Fuente: elaboración propia.....	70
Figura 3.4.- Muestreo de agua en la Presa de Cointzio. Fuente: elaboración propia.....	72
Figura 3.5.- Muestreo de sedimentos en la Presa de Cointzio. Fuente: elaboración propia.....	73
Figura 4.1.- Estaciones climatológicas que cumplen con las pruebas de homogeneidad y su ubicación. Fuente: Elaboración propia.....	83
Figura 4.2.- Polígonos de Thiesen y estaciones climatológicas que cumplen con las pruebas de homogeneidad. Fuente: Elaboración propia.....	84
Figura 4.3.- a) Sitio de muestreo de sedimentos. B) Descarga residual que desemboca a la Presa. Uruapilla Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 4.4.- Unidades de respuesta hidrológica (HRU). Fuente: Elaboración propia en SWAT.....	87
Figura 4.5. Serie de gastos históricos y modelados (calibración) de la estación hidrométrica Santiago Undameo en SWAT de 1961-1970.....	88
Figura 4.6.- Serie de gastos históricos y modelados (validación) de la estación hidrométrica Santiago Undameo en SWAT de 1971-1980.....	89
Figura 4.7.- Mapa de la distribución de nitrógeno en la subcuenca de la Presa de Cointzio. Escenario 1. Sin aplicación de fertilizantes.....	91
Figura 4.8.- Mapa de la distribución de nitrógeno en la subcuenca de la Presa de Cointzio. Escenario 2. Con aplicación de fertilizantes.....	92
Figura 4.9.- Transporte de nitrógeno amoniacal en las principales corrientes de la subcuenca de la Presa de Cointzio. Temporada de lluvia.....	92

Figura 4.10.- Transporte de nitrógeno amoniacal en las principales corrientes de la subcuenca de la Presa de Cointzio. Temporada de estiaje..... 93

Figura 4.11.- Meses donde se tiene una mayor presencia de nitrógeno amoniacal la subcuenca de la Presa de Cointzio. Elaboración propia..... 93

Figura 4.12.- Comparación de la concentración de nitrógeno amoniacal con datos proporcionados OOAPAS y estudios anteriores. Elaboración propia..... 94

Índice de tablas

Tabla 2.1. Generalidades de las formas de nitrógeno en el agua Hernández Batis, 2016.....	34
Tabla 2.2. Valores máximos permisibles de Nitrógeno en diferentes formas.....	37
Tabla 2.3. Productos agrícolas y superficie sembrada por municipio. Fuente: elaboración propia a partir de estadísticas del SIAP, 2023.....	44
Tabla 2.4. Aguacate y superficie sembrada en los municipios de Acuitzio, Villa Madero y Morelia. Fuente: elaboración propia a partir de datos proporcionados por la Junta de Sanidad Vegetal de Acuitzio, 2024.....	45
Tabla 2.5. Principales fertilizantes nitrogenados utilizados en los cultivos de la subcuenca de Cointzio.....	47
Tabla 3.1.- Información de uso de suelo.....	63
Tabla 3.2.- Características del tipo de suelo.....	64
Tabla 3.3.- Puntos de toma de muestra de agua.....	71
Tabla 3.4.- Puntos de toma de muestra de sedimentos.....	71
Tabla 3.5.- Parámetros a evaluar, técnicas de preservación y metodología a emplear.....	73
Tabla 3.6.- Parámetros calibrados del modelo para tipo de suelo. Fuente: Elaboración propia.....	75
Tabla 3.7.- Interpretación de resultados del coeficiente de determinación.....	78
Tabla 3.8.- Clasificación general de los resultados de los métodos estadísticos del ajuste del modelo. (D.N. Moriasi <i>et al.</i> , 2007; Deng <i>et al.</i> , 2020)	79
Tabla 4.1.- Evaluación de estaciones.....	81
Tabla 4.2.- Evaluación de estaciones: pruebas de homogeneidad e independencia.....	82
Tabla 4.3.- Resultados de la determinación de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal.....	85

Tabla 4.4 Resultados de la determinación de nitrógeno amoniacal en sedimentos.....	86
Tabla 4.5.- Resultados de la calibración del modelo. Índices de eficiencia y rendimiento.....	88
Tabla 4.6.- Resultados de la validación del modelo. Índices de eficiencia y rendimiento.....	89

Resumen

En las últimas décadas ha crecido tanto la demanda de agua, la urbanización y la contaminación de los cuerpos de agua superficiales, lo que ha hecho que la contaminación del agua se convierta en un problema ambiental y social cada vez más importante. En este contexto, surgen los modelos de calidad del agua, que contribuyen a una gestión más eficiente de los recursos hídricos, ya que son herramientas efectivas para la simulación y predicción del comportamiento de contaminantes. La Presa de Cointzio es una fuente de abastecimiento de agua muy importante, esta es utilizada para actividades como el riego agrícola y el suministro de agua potable para los habitantes de la ciudad de Morelia; tiene una capacidad máxima de 80 millones de metros cúbicos, donde su principal ingreso es el agua de lluvia. La subcuenca donde se ubica, se ha visto afectada por el crecimiento poblacional y el cambio de uso de suelo, lo cual altera su calidad del agua. Con el objetivo de simular el transporte superficial del nitrógeno en la subcuenca de la presa de Cointzio, se empleó la modelación hidrológica mediante el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que nos permite conocer el comportamiento superficial de los recursos hídricos, al evaluar diferentes fenómenos hidrológicos como la precipitación, la escorrentía, la infiltración, entre otros. Se utilizó la cartografía de uso y tipo de suelo de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) a escala 1: 250,000 e información hidrométrica del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) y climatológica de Climate Computing Project (CLICOM). Los indicadores de evaluación de eficiencia y rendimiento que se usaron para evaluar el modelo fueron: el coeficiente de determinación (R^2), el sesgo porcentual (PBIAS) y el Índice de Nash- Sutcliffe (NSE). Los resultados de la etapa de calibración del escurrimiento superficial fueron $R^2= 0.86$, PBIAS = 6.38 y NSE = 0.63. Mientras que en la fase de validación los resultados fueron $R^2 = 0.78$, PBIAS = 11.21 y NSE = 0.50. Dados estos resultados, se concluye que el modelo es confiable para simular el escurrimiento superficial y el transporte de nitrógeno. Con los escenarios evaluados (con aplicación y sin aplicación de fertilizantes) se pudieron identificar las zonas donde se presenta mayor concentración de nitrógeno en la subcuenca,

originadas debido al uso excesivo de fertilizantes. Por otro lado, se pudo determinar la presencia del nitrógeno amoniacal en las corrientes de agua superficiales en la temporada de lluvias. El nitrógeno amoniacal es un contaminante de especial interés dado que, por sus características puede fácilmente ingresar a la planta potabilizadora de la ciudad de Morelia, donde se deberá remover, para garantizar el cumplimiento de la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad del agua".

Palabras clave: transporte de nitrógeno / modelación / simulación hidrológica / SWAT / fertilizantes

Abstract

In recent decades, the demand for water, urbanization, and pollution of surface water bodies have grown, which has made water pollution an increasingly important environmental and social problem. In this context, water quality models emerge, which contribute to a more efficient management of water resources, since they are effective tools for the simulation and prediction of the behavior of pollutants. The Cointzio Dam is a very important source of water supply, it is used for activities such as agricultural irrigation and the supply of drinking water for the inhabitants of the city of Morelia; It has a maximum capacity of 80 million cubic meters, where its main income is rainwater. The sub-basin where it is located has been affected by population growth and land use change, which alters its water quality. In order to simulate the surface transport of nitrogen in the sub-basin of the Cointzio dam, hydrological modeling was used using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model, which allows us to know the surface behavior of water resources, by evaluating different hydrological phenomena such as precipitation, runoff, infiltration, among others. The cartography of land use and type of the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO) at a scale of 1:250,000 and hydrometric information from the National Bank of Surface Water (BANDAS) and climatological information from the Climate Computing Project (CLICOM) were used. The efficiency and performance evaluation indicators that were used to evaluate the mathematical model were: the coefficient of determination (R^2), the percentage bias (PBIAS) and the Nash-Sutcliffe Index (NSE). The results in the surface runoff calibration phase were $R^2 = 0.86$, PBIAS = 6.38 and NSE = 0.63. While in the validation phase the results were $R^2 = 0.78$, PBIAS = 11.21 and NSE = 0.50. Given these results, it is concluded that the model is reliable to simulate surface runoff and nitrogen transport. With the scenarios evaluated (with and without application of fertilizers) it was possible to identify the areas where there is a higher concentration of nitrogen in the sub-basin, caused by the excessive use of fertilizers. On the other hand, it was possible to determine the presence of ammonia nitrogen in surface water streams in the rainy season. Ammonia

nitrogen is a pollutant of special interest since, due to its characteristics, it can easily enter the water treatment plant in the city of Morelia, where it must be removed, to ensure compliance with NOM-127-SSA1-2021 "Water for human use and consumption, permissible limits of water quality".

Keywords: nitrogen transport / modeling / hydrological simulation / SWAT / fertilizers

I. Marco Conceptual

1.1 Introducción

Los seres humanos dependemos de la disponibilidad del agua ya que es uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta, no sólo para uso doméstico, sino también para la ejecución y continuidad de las actividades agrícolas e industriales. La demanda por este vital líquido ha crecido de manera significativa en las últimas décadas, sin embargo, el problema de contaminación reduce la posibilidad de utilizar el agua, ya que, si no cumple con la calidad adecuada, puede aumentar el problema de la escasez. Las aguas de los cuerpos superficiales se utilizan para las actividades humanas e industriales, el riego, la ganadería, entre otros. Y estas a su vez, se contaminan principalmente por las aguas residuales (domésticas, agrícolas, industriales o ganaderas) sin tratamiento previo que son vertidas a dichos cuerpos y que contienen partículas contaminantes disueltas, como ejemplo: arrastres de agroquímicos que provienen de las zonas agrícolas, y que principalmente contienen fósforo y nitrógeno. Esto disminuye la disponibilidad del agua para la población, tomando como alternativa el agua subterránea, la cual, no solo tiene problemas de contaminación, sino que también de sobreexplotación (IMCO, 2023).

La contaminación por nitrógeno en sus diferentes formas hoy en día, es un problema creciente y general que, no solo incide en la calidad de las aguas superficiales también afecta la de las subterráneas. Esta contaminación es un problema originado principalmente por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y por una gestión ineficaz de los purines en las zonas ganaderas. Una de las grandes preocupaciones en torno a la contaminación del agua por nitrógeno, es el impacto que puede tener sobre la salud humana, ya que el consumo de agua con altas concentraciones de este compuesto supone un riesgo para la salud, y su presencia puede dificultar el proceso de potabilización (Blancas y Hervás, 2001).

Para lograr una efectiva gestión ambiental y administración de los recursos hídricos, es necesario contar con un seguimiento continuo en cuanto a la calidad

y cantidad. Para esto, una herramienta son los modelos de calidad del agua. Los cuales son efectivos para evaluar y predecir el transporte de contaminantes, simulando y pronosticando procesos en los ecosistemas acuáticos mostrando diferentes escenarios y plazos de tiempo. Si bien, además de ayudarnos a predecir dichos procesos y comportamientos, los modelos desempeñan un papel importante en la reducción del costo de mano de obra, materiales y tiempo para una gran cantidad de experimentos de escenarios de mitigación de la contaminación hasta cierto punto (Wang *et al.*, 2013) así como en la toma de decisiones.

Por esta razón, para el presente trabajo se emplea el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para la simulación y predicción del transporte de nitrógeno en la Presa de Cointzio, ya que su presencia altera la calidad del agua, así como también en conjunto con otros contaminantes como el fosforo, proliferan el crecimiento del lirio acuático.

La aplicación moderna de modelado se utiliza esencialmente por la necesidad de cumplir con las normas y reglamentos (Ejigu, 2021). En este caso, se toman como base los parámetros marcados en la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad del agua". Y es de suma importancia garantizar su cumplimiento, ya que el agua es potabilizada para uso y consumo humano.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente los cuerpos de agua superficiales se ven afectados, las descargas residuales que reciben de las actividades industriales y domésticas sin un tratamiento previo alteran su calidad. En algunas presas, se llevan a cabo las descargas de aguas residuales que provienen de comunidades aledañas, así como el ingreso de escurrimientos de actividades agropecuarias, lo que crea condiciones favorables para la proliferación del lirio acuático (proceso de eutrofización) que impacta en la calidad del agua. Tal es el caso de la Presa de Cointzio, que además de la descarga de estas aguas, la deforestación y cambio de uso de suelo de la zona para cultivo alrededor de la misma, se emplean agroquímicos y en época de lluvias el agua corre provocando escurrimientos, arrastre de suelo y filtraciones de agroquímicos. Uno de los contaminantes que genera mayor problema en la subcuenca, es el nitrógeno amoniacal. Además del impacto a nivel ambiental, también afecta el proceso de potabilización para uso en las actividades humanas, pues la presencia de este contaminante en el agua hace más complejo y costoso su tratamiento para poder cumplir con la normativa de potabilización del agua.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Simular el transporte superficial del nitrógeno en la subcuenca de la presa de Cointzio, mediante simulación hidrológica, en diferentes escenarios.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la zona de estudio para alimentar el modelo.
- Generar las series históricas de datos climatológicos.
- Analizar las concentraciones de las diferentes formas de nitrógeno en la presa de Cointzio.
- Analizar los cultivos y el uso de agroquímicos empleados en la subcuenca.
- Generar un modelo hidrológico, como herramienta para simular el transporte del nitrógeno, en diferentes escenarios.

1.4 Hipótesis

La modelación hidrológica permitirá simular el transporte superficial de nitrógeno, en la subcuenca de la presa de Cointzio, en diferentes escenarios.

1.5 Justificación

La Presa de Cointzio es una importante fuente de abastecimiento de agua para los habitantes de la ciudad de Morelia, esta es utilizada para actividades como el riego agrícola y el suministro de agua potable para dicha ciudad. Dado el crecimiento demográfico y agrícola en la cuenca de aportación a la presa, la deforestación y el cambio de uso de suelo se han incrementado notablemente, lo que conlleva una mayor generación y arrastre de sedimentos, así como de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, provenientes del uso de agroquímicos en los cultivos, lo cual deteriora la calidad del agua de la presa.

En aguas superficiales, la fuente de nitrógeno amoniacal en condiciones normales proviene de la degradación natural de la materia orgánica presente en la naturaleza. Es uno de los componentes transitorios en el agua, ya que forma parte del ciclo del nitrógeno y está influenciado por la actividad biológica (González, 2013). Sin embargo, las aportaciones adicionales de nitrógeno amoniacal (originadas principalmente por el uso de fertilizantes, actividad ganadera, aguas residuales domésticas o efluentes contaminados industriales) alteran las concentraciones normales de este nutriente, ocasionando afectaciones al medio al cual son vertidos, disminuyendo el nivel de oxígeno disuelto en el agua, mismo que es consumido por las bacterias en los procesos de degradación del nitrógeno amoniacal, creando un ambiente anóxico y desencadenando una serie de reacciones químicas que disminuyen la calidad del agua.

Existe normativa que regula de las concentraciones de nitrógeno en las descargas hacia los cuerpos de agua, como lo es la NOM-001-SEMARNAT-2021. Sin embargo, estas concentraciones se consideran de acuerdo con la capacidad de autodepuración por el cuerpo de agua.

La calidad adecuada en el abastecimiento de agua para uso y consumo humano es fundamental para la salud del ser humano, por lo cual, existe una norma que regula los límites máximos permisibles de contaminantes en agua para consumo: NOM-127-SSA1-2021, a través de la cual se busca disminuir ciertos parámetros que afectan la calidad del agua para suministro de las ciudades.

La determinación de nitrógeno amoniacal es relevante como un indicador de calidad sanitaria, por tanto que, el saber la concentración de este nutriente le es útil no solo a las industrias que emplean procesos de tratamiento biológico a sus aguas para comprobar la eficiencia de las plantas de tratamiento (González, 2013), sino también para todos los organismos operadores y reguladores de la calidad y potabilización del agua, para efectos de este estudio al Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Mediante la modelación matemática se permite conocer el comportamiento superficial de los recursos hídricos, al evaluar diferentes fenómenos hidrológicos como la precipitación, infiltración, escorrentía, entre otros. Así como también algunos modelos incorporan el ciclo del nitrógeno y sus transformaciones, aunque la mayoría de estos modelos se enfocan únicamente en un aparte del sistema hidrológico, es decir, existen modelos con el fin de evaluar el comportamiento superficial del agua, que no establecen relación con el agua subterránea.

1.6 Antecedentes

Con el objetivo de determinar la aplicabilidad del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Osorio y Cerquera (2020), realizan una revisión bibliográfica del uso de dicho modelo para simular el transporte y destino de pesticidas en cuencas hídrológicas, en su trabajo titulado *“Revisión de aplicaciones del modelo SWAT para simular el transporte de agroquímicos en cuencas hidrográficas”*. Con base en la revisión realizada, el modelo presentó resultados satisfactorios para dicha simulación, confirmando que los procesos que dirigen el transporte y destino de los pesticidas son la escorrentía superficial y el flujo de la corriente, lo que permite analizar los impactos provocados por estos sobre el recurso hídrico. Esta revisión también señala que, la confiabilidad de los resultados para el análisis de los pesticidas está condicionada a la información de entrada de los mismos, así como de las variables para definir adecuadamente las Unidades de Respuesta Hidrológica. Y como desventaja, indican que la falta de información puede ser una limitante en el análisis de los resultados obtenidos en el modelo, pues este requiere una gran cantidad de datos de calidad y un periodo de tiempo significativo de análisis.

En el estudio de *“Modelación de nutrientes y evaluación de uso de suelo usando la herramienta de agua y suelo (SWAT), Caso de estudio: Cuenca del Río Coca”* (Narváez *et al.*, 2019), se evaluaron las dinámicas del nitrógeno y fósforo en la cuenca del río Coca y su comportamiento en diferentes escenarios que incluyen el cambio de cobertura y uso de suelo; para ello se usó el modelo SWAT. Como resultados, un primer escenario BAU (Business As Usual), refleja las condiciones y actividades actuales, mientras que un segundo escenario DEG (degradación) representa un manejo inadecuado del suelo, ya que existe una pérdida no controlada de la vegetación natural, priorizando el crecimiento de las actividades ganaderas, dando como resultado, un aumento significativo en la pérdida de nutrientes del suelo, lo que contribuye de manera negativa en la calidad del agua del río, pues en el cauce del mismo, el incremento en la concentración de los nutrientes presenta un alto porcentaje en ambos escenarios, mientras que en un tercer escenario (BMP) se muestra una disminución de las concentraciones hasta llegar a valores del escenario base. Esto último puede atribuirse debido a que la

conversión de pastizales en áreas silvopastoriles, retienen mejor los nitratos y fosfatos.

Con el objetivo de proponer un tren de tratamiento de potabilización de agua proveniente de un cuerpo superficial, que cumpla con los parámetros establecidos en la norma NOM-127-SSA1-2021, mediante el uso de una matriz de decisión (Camacho, 2023) en su trabajo titulado *“Evaluación de la factibilidad técnica de un tren de tratamiento en el proceso de potabilización a través de una matriz de decisión”*, evalúa las características fisicoquímicas y microbiológicas del cuerpo de agua superficial a diferentes profundidades realizando 4 muestreos a lo largo de un año para identificar los parámetros contaminantes del agua superficial, que se encuentren por encima de los límites máximos permisibles establecidos en la norma previamente citada. Cabe mencionar que, durante el primer muestreo realizado en el mes de diciembre 2022, la presencia del nitrógeno amoniacal no fue detectable a ninguna de las 3 profundidades propuestas (25, 20 y 10 m). En cambio, durante el tercer monitoreo del mes de junio 2022, su presencia se detectó a las profundidades de 22 y 10 m, en concentraciones aceptables por la norma. Sin embargo, en los resultados se observa un aumento repentino de los niveles, lo que indica que sale de norma, esto se debe a las precipitaciones de la región, donde influye también el uso de compuestos químicos en la agricultura ya que los fertilizantes por lo general contienen nitrógeno.

En el estudio *“Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México”* (Bautista-Ávalos *et al.*, 2014). Se determinó el balance hídrico y las cargas de contaminantes por actividades agrícolas en la subcuenca del lago de Chapala usando el modelo SWAT (2012). A partir de la aplicación de encuestas a los productores agrícolas de la subcuenca, se realizó un listado de fertilizantes y plaguicidas que se utilizan en la misma. Se simularon escenarios con y sin aplicación de fertilizantes, en un periodo de simulación que va de 1999 a 2001, y como resultado, por un margen de 300%, el balance hídrico resultó negativo, lo cual, los autores asocian a que se trata de una subcuenca abierta, siendo su principal afluente el río Lerma. Además de señalar, en el escenario con la aplicación de fertilizantes, un incremento de nitrógeno y fosforo en los flujos superficiales y subterráneos, en el que destaca el

movimiento de nitratos hacia el subsuelo; hecho que puede estar relacionado con el tipo de suelo y su permeabilidad. En este escenario, se presentó una mayor cantidad de nutrientes que se desplazan por los cuerpos de agua, a diferencia (de hasta más 87 000 %) con el escenario sin aplicación de fertilizantes. Esta diferencia se puede relacionar con el uso excesivo y poco eficiente de los fertilizantes, los cuales se dispersan por la subcuenca como parte de la contaminación difusa. Los compuestos nitrogenados y fosfatados, son la principal vía de ingreso de estos nutrientes a los ecosistemas acuáticos, a través de su vinculación con los escurrimientos, lo que trae como consecuencia, la eutrofización de estos ecosistemas.

En el trabajo *“Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la actividad agrícola en la cuenca baja del río Mayo en el estado de Sonora, México* (Rojas-Rodríguez *et al.*, 2020), se tuvo como objetivo caracterizar el aporte de nitratos y fosfatos procedentes de la agricultura en la cuenca baja del río Mayo, con el fin de comparar los escenarios de línea base y el escenario de contaminación generado por la producción de trigo en la región. En su hipótesis se sugiere que el aporte de estos nutrientes supera lo determinado por un escenario línea base. Se empleó el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), donde se simularon las contribuciones de sustancias contaminantes para un periodo del año 2000 al 2017. Los resultados mostraron prueba de que la actividad agrícola dentro de la cuenca estudiada, incrementa las aportaciones de nutrientes superando los niveles estimados.

El trabajo de Arroyo (2019) *“La presa de Cointzio: un proveedor de agua y energía perturbado”* consistió en la caracterización nutrimental de la presa de Cointzio, en la superficie y en la columna de agua, para tratar de establecer el estado trófico actual de dicho cuerpo de agua, como primera etapa. En una segunda etapa, se pretende evaluar la contaminación por elementos potencialmente tóxicos con énfasis en metales pesados y su distribución en la superficie y en el fondo. En los últimos años el paisaje circundante a la presa de Cointzio ha tenido grandes cambios. Estos cambios han sido influenciados por el crecimiento de la población de las localidades de Acuitzio, Tiripetio, Santiago Undameo, así como el desarrollo de actividades que demandan su existencia. Estas actividades también generan la remoción de grandes superficies de bosque para el desarrollo

de cultivos, propiciando la erosión y degradación de suelos. La eutrofización es un estado de contaminación que se caracteriza por el aporte y enriquecimiento de nutrientes en el agua. Los nutrientes generalmente proceden de actividades antropogénicas, por ejemplo: las actividades de agricultura, debido a que se utilizan fertilizantes y agroquímicos con nitrógeno y fósforo para el crecimiento de los cultivos.

En el trabajo de (Correa-González *et al.*, 2023) *“Evaluación de nitratos en aguas subterráneas de fuentes difusas considerando patrones espacio-temporales de sistemas hidrológicos utilizando un modelo SWAT/MODFLOW/MT3DMS acoplado”* se propone una metodología para evaluar el nitrato en aguas subterráneas de fuentes difusas considerando patrones espacio-temporales de sistemas hidrológicos utilizando un modelo acoplado SWAT/MODFLOW/MT3DMS. La aplicación del modelo se llevó a cabo utilizando un esquema de simulación de sistemas hidrológicos y agrícolas debido a la limitación de los datos espaciales y temporales. El área de estudio incluyó, para la forma de flujo superficial; la cuenca del lago Cuitzeo y en forma de flujo de agua subterránea; el acuífero Morelia-Queréndaro. Los resultados obtenidos señalan que, las concentraciones de nitratos históricas y simuladas se obtuvieron dentro de valores aceptables de los parámetros estadísticos y, por lo tanto, se consideran adecuadas. De acuerdo con sus recomendaciones, estos resultados mejorarían si se empleara una mayor cantidad de información, especialmente en los datos de nitrógeno, lo cual aportaría una mayor confiabilidad a la modelación. En dicho trabajo, se omitió la modelación de los cuerpos de agua, por lo que se sugiere para modelaciones futuras, incorporar la modelación de nitrógeno en la presa de Cointzio.

II. Marco Teórico

El agua es uno de los recursos más sustanciales para la vida en el planeta. El ser humano depende de su disponibilidad no sólo para uso doméstico, sino de igual manera para las actividades agrícolas e industriales. Con el objetivo de producir más alimentos y energía, así como dotar del servicio de agua potable a una población cada vez mayor, la demanda por el líquido ha crecido significativamente en las últimas décadas. Un importante problema asociado con la posibilidad de utilizar el agua es, su grado de contaminación, ya que, el problema de la escasez se puede empeorar si no posee la calidad adecuada (SEMARNAT, 2012).

Se estima que hay cerca de 1 400 millones de kilómetros cúbicos de agua en la Tierra, de los cuales el 2.5% es agua dulce y se encuentra distribuida en ríos, lagos, acuíferos, glaciares y mantos de hielo. Del total agua dulce en el planeta, el 30% se encuentra en agua subterránea, un 0.8% en el permafrost y únicamente el 0.4% en aguas superficiales y en la atmósfera (PNUMA, 2007).

Las zonas con cubierta vegetal juegan un rol muy importante en el proceso de recarga de los cuerpos de agua superficiales, pues actúan como esponja al recibir el agua de lluvia. También se abastecen de nacimientos de agua y escurrimientos de otras fuentes. En zonas deforestadas, por el contrario, el agua de la precipitación escurre de manera rápida en dirección a la pendiente, arrastrando el suelo y reduciendo el volumen que puede infiltrarse hacia el vaso receptor. Dichas aguas son utilizadas para actividades humanas, así como también se destinan para sectores como el agrícola, la ganadería, el riego o industrial entre otros (CENAPRED, 2019).

Las descargas sin tratamiento previo de aguas municipales e industriales, los arrastres provenientes de las zonas de actividades pecuarias y agrícolas, generan escurrimientos y filtraciones de químicos que aumentan la carga de nitrógeno y fósforo, contaminando los cuerpos de agua superficiales y subterráneas.

2.1 Contaminación del agua: natural y antropogénica

La degradación de los recursos hídricos puede ser causada por:

- Procesos naturales, que son resultado del equilibrio dinámico de la tierra, la actividad geofísica y del ciclo natural del agua.
- Procesos artificiales (antropogénicos) son consecuencia de la intervención del hombre (prácticas agrícolas y residuos urbanos) que generan compuestos ajenos a la composición natural del agua o alteran las concentraciones de los ya existentes.

Ambos procesos pueden tener graves repercusiones sobre el ciclo del agua afectando su calidad, así el funcionamiento de los organismos vivos y la salud humana. A pesar de esto, la gestión de las aguas superficiales y subterráneas como recursos sigue siendo complicada en muchas circunstancias y la información relevante sigue siendo desconocida (Akhtar *et al.*, 2021)

Como se mencionó, las principales actividades antropogénicas de contaminación del agua, así como las mismas causas naturales, conllevan un vertido directo o indirecto de residuos en los recursos hídricos, causando una contaminación del agua superficial a través de la precipitación y siguiendo su curso el agua contaminada llega al suelo, donde ocurre ya una mezcla de agua y se abre camino hacia la ruta del agua subterránea y ocurre una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas. Misma agua que a partir de diversos métodos de extracción llegan hasta un receptor (quien la consume). Los tipos, rutas y fuentes de contaminantes, así como a forma en la que influyen estas fuentes de contaminación naturales y antropogénicas sobre las aguas superficiales y subterráneas se muestran en la Figura 2.1.

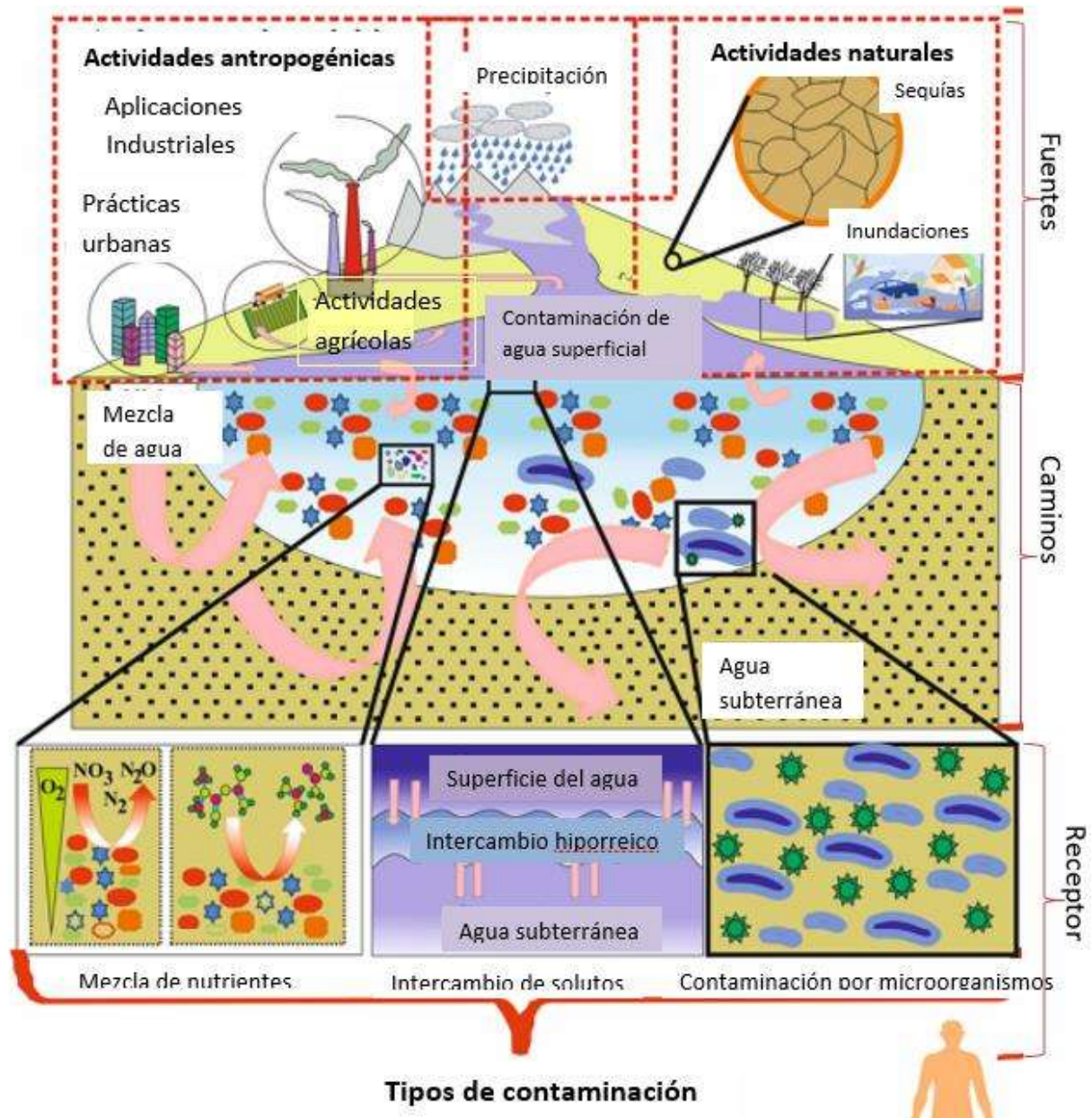


Figura 2.1 Esquema ilustrativo de la contaminación del agua debido a fuentes y fuentes antropogénicas, sus vías, receptores y otros tipos de contaminación. Editado a partir de (Akhtar et al., 2021)

El origen de la contaminación antropogénica está vinculado a alguna de estas 4 actividades: urbanas (Pérez y Espigares, 1999); agrícolas, ganaderas (Rodríguez García *et al.*, 2003) e industriales (Blancas y Hervás, 2001). Dichas actividades se describen en la Figura 2.2.

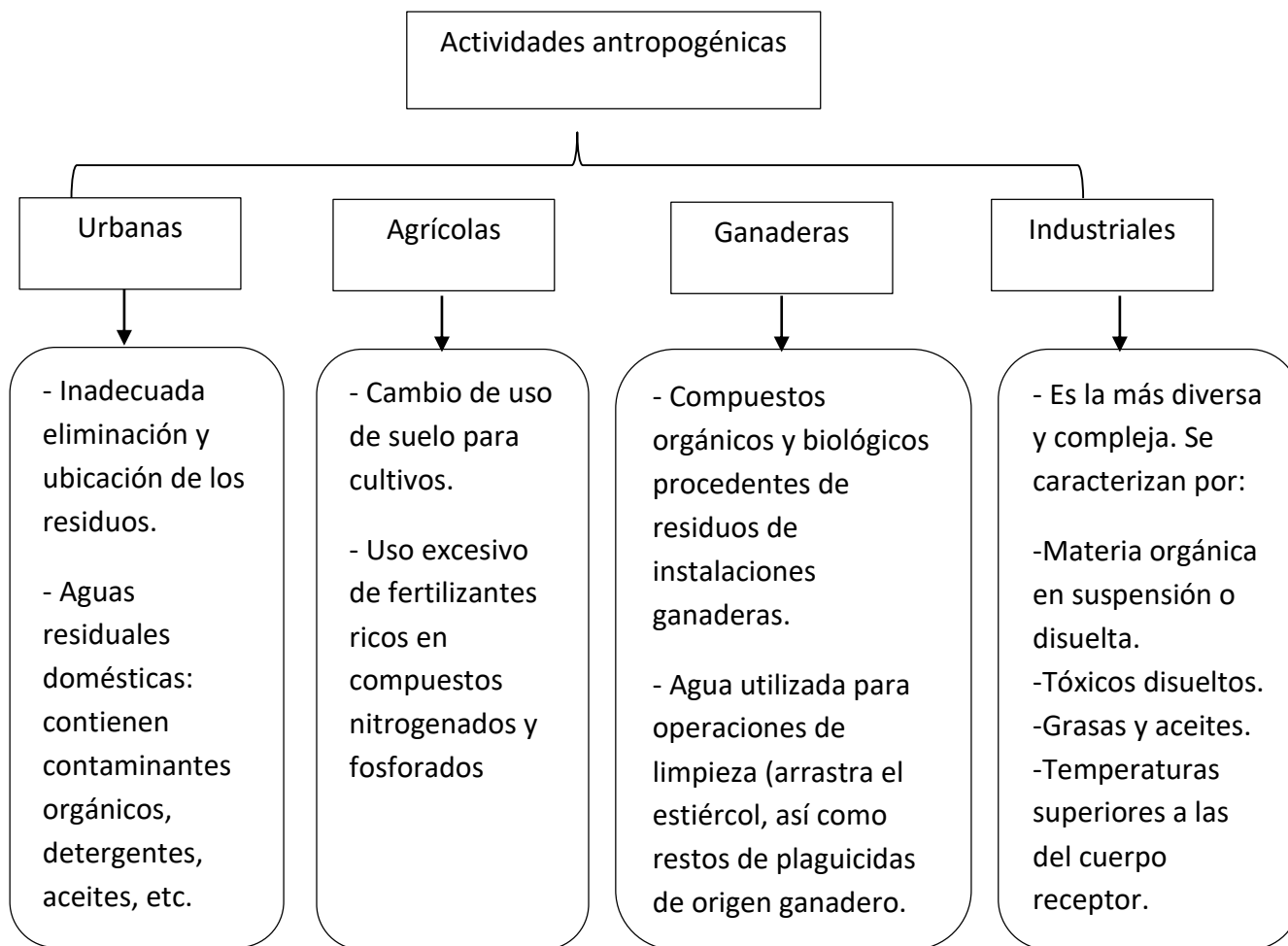


Figura 2.2. Actividades que originan la contaminación antropogénica. Fuente: elaboración propia a partir de (Pérez y Espigares, 1999; Rodríguez García et al., 2003 y Blancas y Hervás, 2001).

Existe cierta semejanza entre los productos de cada una de estas fuentes de contaminación, por ejemplo, la contaminación urbana se refleja en la adición de materia orgánica (que se puede presentar en forma de amonio, nitratos, y nitritos), en el aumento de la salinidad en el agua, y posible contaminación biológica. En tanto, que la contaminación agrícola, se manifiesta por el incremento de compuestos nitrogenados, la presencia de compuestos organoclorados y otros compuestos orgánicos en las aguas (Blancas y Hervás, 2001).

Numerosos compuestos utilizados en la agricultura son beneficiosos para la productividad agrícola, sin embargo, hoy en día además de liberar nutrientes tales como el fósforo y el nitrógeno, también liberan metales pesados, patógenos

y sales, algunos han demostrado ser persistentes, móviles y solubles en los sistemas acuíferos, lo que es nocivo para la salud humana y los sistemas ambientales (Shwetank *et al.*, 2020). Algunas sustancias inorgánicas como el cobre, el zinc, el hierro y el níquel entre otros, son necesarias para el desarrollo de plantas y animales, pero estas sustancias son dañinas para los animales o las plantas cuando las concentraciones superan las limitaciones aceptables (Galindo-Miranda *et al.*, 2019).

Los organismos reguladores han determinado un alto nivel de compuestos tóxicos en los sistemas de agua potable en muchos lugares del mundo. Por ejemplo, se han registrado compuestos de nitrato y fertilizantes en altas concentraciones en los sistemas de aguas subterráneas (Kumar *et al.*, 2016). Por lo tanto, la contaminación resultante directamente de la agricultura y las actividades industriales es un problema creciente y persistente (Ntanganedzeni *et al.*, 2018).

2.2 Contaminación del agua por fuentes puntuales y difusas

Aunado a los tipos de contaminación natural y antropogénica, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha definido dos tipos principales de contaminación del agua, estos son la contaminación de fuente puntual y la contaminación de fuente no puntual.

2.2.1 Fuentes puntuales

Se refiere a cualquier contaminante liberado de un solo punto que ingresa al medio ambiente desde áreas fácilmente identificables y confinadas, como chimeneas, tubos de drenaje, desechos industriales, plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, fábricas y centrales eléctricas. Este tipo de fuentes se ubica principalmente en centros urbanos, y se componen de aguas residuales municipales e industriales.

2.2.2 Fuentes no puntuales o difusas

La contaminación de fuentes no puntuales, no proviene de una fuente específica y es una combinación de contaminantes que se liberan de un área grande. Significa que la contaminación no proviene de una fuente específica, viene de una sola vez desde una gran distancia y varios lugares. Sin embargo, es más difícil de

encontrar y más difícil de abordar (por ejemplo: escorrentía, aceites, grasa, desechos animales, pesticidas y fertilizantes) (USEPA, 1996).

La lluvia es el medio de transporte de contaminantes de fuentes no puntuales. Esta provoca el escurrimiento y debido a la erosión, arrastra grandes cantidades de sedimentos y contaminantes que desembocan en cuerpos de agua superficiales (Bravo-Inclan *et al.*, 2013).

2.3 Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno (N_2) es un elemento de mayor abundancia en la atmósfera (78%) y se encuentra en forma libre (estado gaseoso). El nitrógeno es tan estable, que apenas y se mezcla con otros elementos, por lo que es difícil que sea asimilado por los organismos, para ello primero necesitan desdoblarlo y emplearlo en la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos (ADN y ARN), aminoácidos y otras moléculas fundamentales para su metabolismo. Hay dos mecanismos para lograr esta ruptura o desdoblamiento: descargas eléctricas y fijación fotoquímica, ambas proveen suficiente energía para formar nitratos. Existe además una tercera forma de fijación del nitrógeno, que es llevada a cabo por bacterias que viven en el suelo y que utilizan enzimas en lugar de la luz solar o descargas eléctricas (CICEANA, 2023).

El nitrógeno molecular no es sencillamente asimilable por los organismos vivos, debido a la unión que existe entre los átomos del nitrógeno, que está formada por un triple enlace muy difícil de romper. La única forma de poder usar este elemento, es por medio de una reacción química en la que estos tres enlaces se rompen incorporándose átomos de hidrógeno para formar amoníaco; compuesto que sí es asimilable y procesado metabólicamente por los organismos. Las bacterias fijadoras de nitrógeno, son un grupo selecto de bacterias capaces de captar y aprovechar el nitrógeno de la atmósfera como nutriente, y así, poder llevar a cabo el proceso de fijación biológica del nitrógeno (Corvera, 2000).

La reserva activa del nitrógeno se encuentra en el suelo, a pesar de que la mayor parte de este elemento se encuentra en la atmósfera. Ya que es en el suelo donde van a parar los desechos orgánicos de los organismos vivos y los restos de éstos.

2.3.1 Etapas del ciclo del nitrógeno

1. **Fijación:** es la primera etapa del ciclo, y en esta se da la combinación del nitrógeno atmosférico con oxígeno o hidrógeno, lo que permite a los seres vivos poder utilizar el nitrógeno en sus procesos metabólicos.

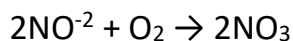
Las bacterias fijadoras de nitrógeno, son las protagonistas en este proceso, ya que poseen una enzima llamada nitrogenasa, que en condiciones anaerobias (sin presencia de oxígeno) convierten el nitrógeno atmosférico (N_2) en amoníaco (NH_3). Posteriormente, el NH_3 , resultado de una ionización, se transforma en amonio (NH_4^+). Básicamente se refiere a la incorporación del nitrógeno atmosférico a las plantas, por acción de los microorganismos (a través del uso de la enzima nitrogenasa para su descomposición), principalmente bacterias y cianobacterias que se encuentran en el suelo y en ambientes acuáticos. Esta fijación se da por medio de la conversión del nitrógeno atmosférico en amoníaco o nitratos.

2. **La nitrificación** es la transformación aerobia del nitrógeno amoniacal a nitrato, por acción de las bacterias quimioautótrofas; principalmente por nitrosomonas y nitrobacterias, que toman la energía de la oxidación de compuestos inorgánicos; transformando el amonio a nitrito y el nitrito (NO_2^-) a nitrato respectivamente (Pérez y Menéndez, 2007). Las dos formas de nitrógeno que son asimilables por las plantas son: en forma de nitrato (NO_3^-) y en forma de amonio (NH_4^+). Ambas formas pueden ser absorbidas por las raíces de las plantas, aunque solo algunas especies optan por absorber nitratos en lugar de amoníaco.

Esta etapa se realiza en dos fases por diferentes bacterias del suelo: la primera fase, donde las bacterias nitrosomonas y nitrococcus transforman el amonio en nitrito (CICEANA, 2023) mediante la siguiente reacción:



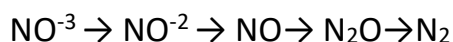
En la segunda fase, las nitrobacter, oxidan el nitrito en nitrato mediante la siguiente reacción:



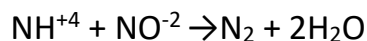
La nitrificación puede ocurrir como un proceso de oxidación natural en los cuerpos de agua, en el cual existe un consumo de oxígeno (Pérez y Menéndez, 2007). Se considera que la velocidad de la tasa de crecimiento de las *Nitrobacter* es superior que la de las *Nitrosomonas*, razón por la cual, la transformación de amonio a nitrito es considerada el paso limitante en el proceso de nitrificación (Zhu y Chen, 2002). La nitrificación les aporta energía a las bacterias.

3. **La asimilación** se da, cuando las plantas a través de sus raíces absorben amoníaco (NH_3) o nitrato (NO^{-3}), elementos que se forman por la fijación de nitrógeno o por la nitrificación. Posteriormente, estas moléculas se incorporan a las proteínas y a los ácidos nucleicos de las plantas; cuando los animales ingieren las plantas, también consumen nitrógeno, asimilándolo y lo transforman en compuestos animales.
4. La **desnitrificación**, es la reducción de los nitratos a nitrógeno gaseoso (N_2), y de amonio a amoníaco, las bacterias desnitrificadoras son las que llevan a cabo este proceso, las cuales revierten la acción de las bacterias fijadoras de nitrógeno, devolviendo en forma gaseosa el nitrógeno a la atmósfera (CICEANA, 2023).

Para que el nitrógeno sea eliminado completamente, es necesario que el nitrato pase al estado elemental del nitrógeno, esto ocurre por la acción de bacterias heterotróficas desnitrificantes y en condiciones anóxicas. Las bacterias emplean los productos de degradación orgánica como fuente de carbono y energía, y como un aceptor de electrones el nitrato, convirtiéndolo a nitrógeno gaseoso por la vía nitrito- óxido nítrico y óxido nitroso, y este sale del medio acuático a la atmósfera, siendo de esta manera, finalmente removido (Pérez *et al.*, 2007).



En sedimentos marinos y de agua dulce, bajo condiciones anaerobias, otras especies de bacterias pueden oxidar el amoníaco (con NO^{-2}) formando gas nitrógeno.



La reacción de anammox puede constituir hasta el 50% de la desnitrificación que tiene lugar en los océanos. Todos estos procesos contribuyen en el cierre del ciclo del nitrógeno (Kimball, 2020).



Figura 2.3. Ciclo del Nitrógeno. Fuente: Comisión Europea

2.3.2 El Nitrógeno en sus diferentes formas

El nitrógeno pasa por diferentes formas químicas durante su ciclo biogeoquímico, sin embargo, este se cuantifica y se reporta como el elemento. Se puede cuantificar directamente como nitrógeno total a través de algunos métodos modernos, pero comúnmente en la práctica, se analiza cada una de sus formas y al final se suman. Esto permite tener información más detallada del estado del medio en el cual el nitrógeno fue medido (Hernández Batis, 2016). En la Figura 2.4, se muestran las diferentes formas de nitrógeno en el agua y las cuales son descritas en la Tabla 2.1.

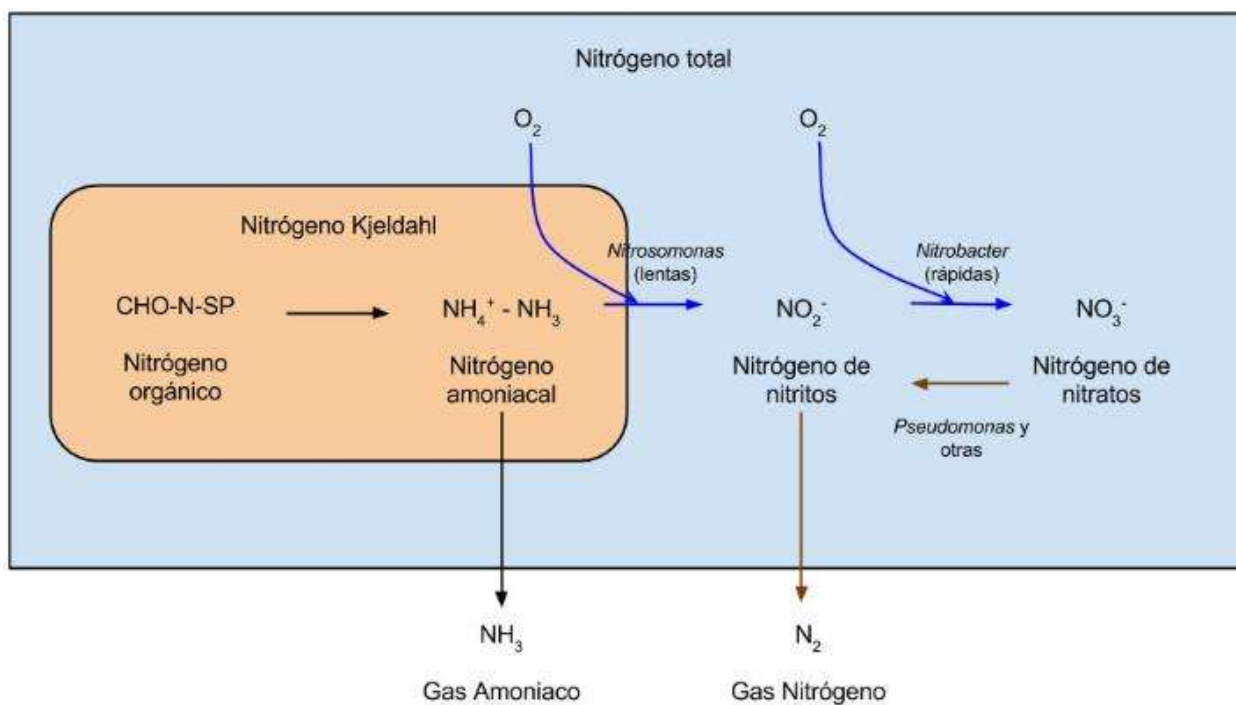


Figura 2.4. Formas del nitrógeno en el agua. Fuente: Hernández Batis, 2016.

Tabla 2.1. Generalidades de las formas de nitrógeno en el agua.

Nitrógeno Total			
Nitrógeno Kjeldhal		Nitritos (NO_2^-)	
Nitrógeno orgánico	Asociado a moléculas orgánicas como proteínas, ácidos nucleicos, o urea y ácido úrico		Resultan de la oxidación biológica de del nitrógeno amoniacal (nitrificación). No se volatiliza pero se oxida rápidamente a nitrato.
Nitrógeno amoniacal	Su estado depende del pH: - A un pH ácido: ion amonio (NH_4^+) - A un pH alcalino: como gas amoniaco (NH_3), el cual es muy irritante y mortal en concentraciones elevadas.	Nitratos (NO_3^-)	Son la forma más oxidada del nitrógeno y en la cual la asimilan las plantas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Hernández Batis, 2016.

Existen dos orígenes principales de la presencia de nitratos en el agua:

- Nitrógeno inorgánico: el lavado de los suelos ricos en nitratos, a raíz de las prácticas agrícolas, es su principal fuente de ingreso. La contaminación por nitratos tiende a ser muy estable en el tiempo y muy difícil de eliminar.
- Nitrógeno orgánico: su entrada al medio natural, se debe al vertido de excrementos animales, el uso descomunal de fertilizantes inorgánicos en la agricultura, el vertido de aguas residuales urbanas sin tratamiento o la infiltración que proviene de fosas sépticas mal diseñadas (Blancas y Hervás, 2001).

Los compuestos inorgánicos más comunes en el agua son: el nitrito, amonio, y nitrato; de estos el principal es el amonio, el cual se produce por la descomposición de material proteico. No obstante, y eventualmente cuando la contaminación es ocasionada por fertilizantes inorgánicos o por algún proceso industrial, pueden encontrarse cantidades considerables de nitritos y nitratos (Singer *et al.*, 2008).

2.4 Efectos por la contaminación con nitrógeno en el agua y riesgos a la salud

La demasía de nitratos en el agua produce una serie de problemas para el entorno y la biodiversidad de la zona afectada por este tipo de contaminación. Además, provocan que el agua contaminada no esté disponible para otros usos.

Las aguas superficiales: lagunas, ríos y humedales, poseen una capacidad natural de autodepuración. Es decir, que los ecosistemas acuáticos por medio de mecanismos naturales y por acción de los microorganismos, disminuyen la carga de contaminantes aportada por el vertido a lo largo del cauce. Sin embargo, un incremento en el aporte de estos contaminantes, altera la calidad del agua, superando así la capacidad de autodepuración natural del cuerpo de agua, lo cual propicia el proceso de eutrofización. Dicho proceso comienza cuando el cuerpo receptor tiene un aporte excesivo de nutrientes (nitrógeno y fosforo), favoreciendo el crecimiento acelerado de plantas verdes y algas que cubren la superficie del agua. A consecuencia de ello, el agua se enturbia impidiendo que la luz solar penetre y se lleve a cabo la fotosíntesis, provocando la disminución y agotamiento del oxígeno en el cuerpo de agua, sobre todo en la superficie. Lo que

puede causar la muerte de organismos acuáticos, así como un incremento del grado de sedimentación (Blancas y Hervás, 2001).

El tratamiento convencional de potabilización se puede ver afectado por la presencia simultánea de nitrógeno amoniacal (N-NH_3) y materia orgánica (MO). La MO causa color turbio en el agua y cuando se utiliza cloro en la desinfección puede llegar a desarrollar compuestos tóxicos para el ser humano. Mientras que, concentraciones superiores a los 6 mg/L de N-NH_3 , aunque este sea removido por membranas, no cumple con la normatividad de agua potable. Por lo que, el tratamiento de esta agua se vuelve complejo y requiere de otros procesos como el uso de ozono y biofiltración (IMTA, 2021).

La presencia de estos y algunos otros compuestos orgánicos en la cloración del agua durante el proceso de potabilización, provocan la aparición de derivados clorados, principalmente cloroformo y trihalometanos (compuestos tóxicos y/o carcinogénicos). Además, altas concentraciones de nitratos pueden causar en los niños, metahemoglobinemia (enfermedad que se caracteriza por inhibir el transporte de oxígeno en la sangre) y la formación de nitrosaminas (riesgo de cáncer de estómago), (Blancas y Hervás, 2001).

NOM-127-SSA1-2021

Los requisitos de la calidad del agua varían según el uso al que se destine. El agua empleada para el consumo directo o aseo personal, debe tener una calidad específica que garantice la falta de riesgos para la salud. Mientras que para el riego o limpieza, la calidad sanitaria no requiere ser elevada (Blancas y Hervás, 2001).

La calidad adecuada en el abastecimiento de agua para uso y consumo humano es elemental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades relacionadas a la misma, por lo que, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua distribuida a los consumidores a través de los sistemas de abastecimiento públicos y privados, es necesario establecer y actualizar los límites permisibles en cuanto a sus características físicas, químicas, microbiológicas, y radioactivas (NOM-127-SSA1-2021).

Por dichas razones, la Secretaría de Salud, acorde a las necesidades actuales, emite la presente Norma, con el objetivo de establecer un control sanitario eficiente del agua que se somete a tratamientos de potabilización, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-2021). El agua para uso y consumo humano debe cumplir con las siguientes especificaciones en cuanto a los compuestos de nitrógeno, Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores máximos permisibles de Nitrógeno en diferentes formas.

Parámetro	Límite permisible	Unidades
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	0.5	mg/L
Nitrógeno de nitratos (N-NO ⁻³)	11.0	mg/L
Nitrógeno de nitritos (N-NO ⁻²)	0.90	mg/L

Fuente: Elaboración propia a partir de las especificaciones sanitarias químicas de la NOM-127-SSAI-2021.

2.5 Caracterización de la Subcuenca de Cointzio

2.5.1 Localización de la zona de estudio

La subcuenca de la Presa de Cointzio se encuentra a 12 km al sureste de la ciudad de Morelia entre los 19° 35' y 19° 27' N, y 101°19' y 101°18' W, es parte de la cuenca del lago de Cuitzeo, y se ubica en la región hidrológica de Lerma-Chapala (Figura 2.5). Cuenta con una superficie aproximada de 643 km² y limita al Norte con el valle de Morelia, al sur y sureste con el parteaguas de la cuenca del Río Balsas, al suroeste con la cuenca del lago de Zirahuén y al oeste con la cuenca del lago de Pátzcuaro (Bravo-Espinoza *et al.*, 2008). La presa tiene una capacidad máxima de 80 millones de metros cúbicos, donde su principal ingreso de agua es la lluvia y la filtración. Cuenta con una elevación de 1991.59 msnm, su cortina mide 46 m (SINA, 2024).

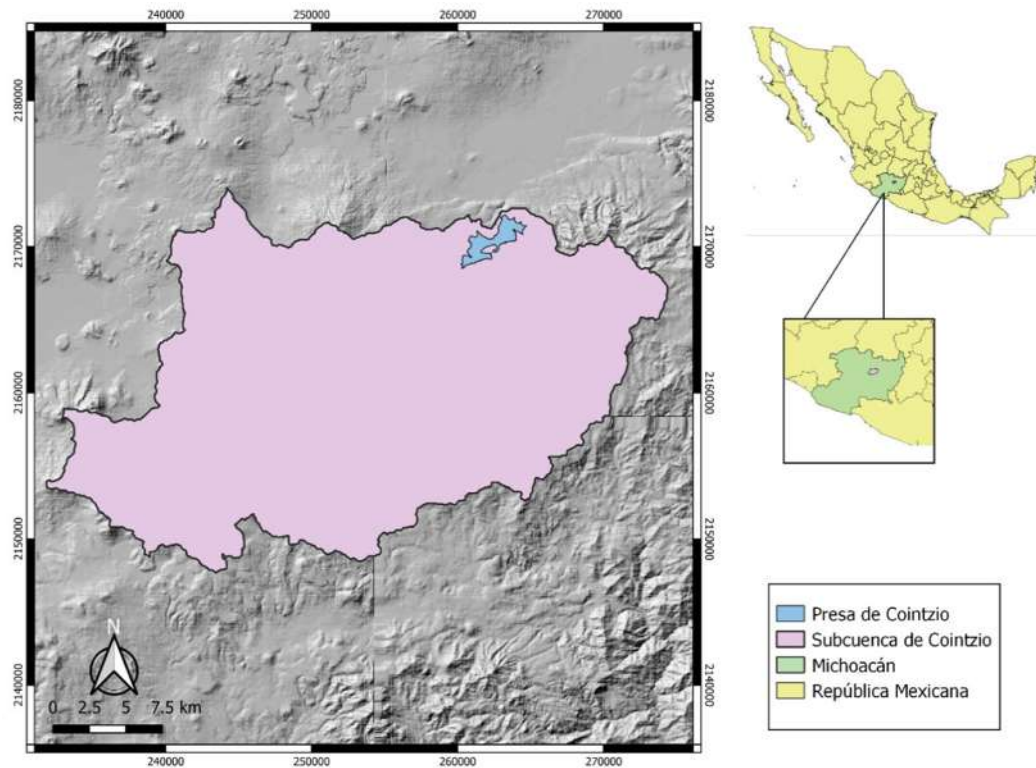


Figura 2.5. Ubicación geográfica de la subcuenca de Cointzio. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI.

En la Subcuenca de Cointzio se asientan parcial o totalmente ocho municipios del Estado de Michoacán. En ella habitan alrededor de 43 506 personas, en 155 localidades, de las cuales tres corresponden a asentamientos urbanos (> 2,500 habitantes), Acuitzio del Canje, Cuanajo y Huiramba (Mendoza y López, 2007), Figura 2.6.

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI.

El clima predominante en esta zona es el templado y subhúmedo, la temporada de lluvia va de mayo a octubre, estas por lo general son cortas e intensivas. De norte a sur la precipitación se incrementa, mientras que, desde el sur hacia el norte la temperatura asciende (Mendoza y López, 2007). La temperatura media anual es 13.8°C y la precipitación anual de 1002 mm (Alcalá de Jesús *et al.*, 2007).

La subcuenca está formada por colinas, planicies y lomeríos altos, desarrolladas sobre materiales volcánicos. Los lomeríos bajos presentan pendientes entre 3° y 20° y predominan sobre los basaltos, riolitas, dacitas, y andesitas; las colinas sobre depósitos superficiales, ignimbritas y andesitas, presentan pendientes menores de 20°; las colinas desarrolladas en andesitas, volcanes monogenéticos y flujos asociados, y depósitos superficiales con pendientes menores de 20°; y los piedemontes sobre basaltos caracterizados por tener pendientes menores a 12° (Mendoza y López, 2007).

2.5.3 Cobertura vegetal

Los usos del suelo y las coberturas vegetales que predominan en la subcuenca son: cultivos de temporal, cultivos de riego, bosque semi-abierto, bosque cerrado y matorral-pastizal. Lo cual define a la subcuenca como de tipo agro-silvo-pastoril (Mendoza y López, 2007).

Algo que también es importante mencionar, es la presencia de los árboles de eucalipto en la zona. Ya que estos, pueden tener ventajas como desventajas. Entre las primeras, es que existen diferentes especies que crecen muy rápido y se adecuan a diferentes ecosistemas, lo cual lo hace muy valioso para la industria de papel. Dentro de los problemas ambientales que genera, es que requieren grandes cantidades de agua para crecer, lo que puede provocar la disminución de los recursos hídricos disponibles en la zona donde se cultivan. Además de agotar los nutrientes disponibles en el suelo causando su infertilidad y el desplazamiento de la flora y fauna endémica.

2.5.4 Tipo de suelo

Los suelos presentes en la subcuenca de la presa de Cointzio son los: Acrisoles, andosoles, leptosoles, luvisoles, phaeozem y vertisoles (Figura 2.7).

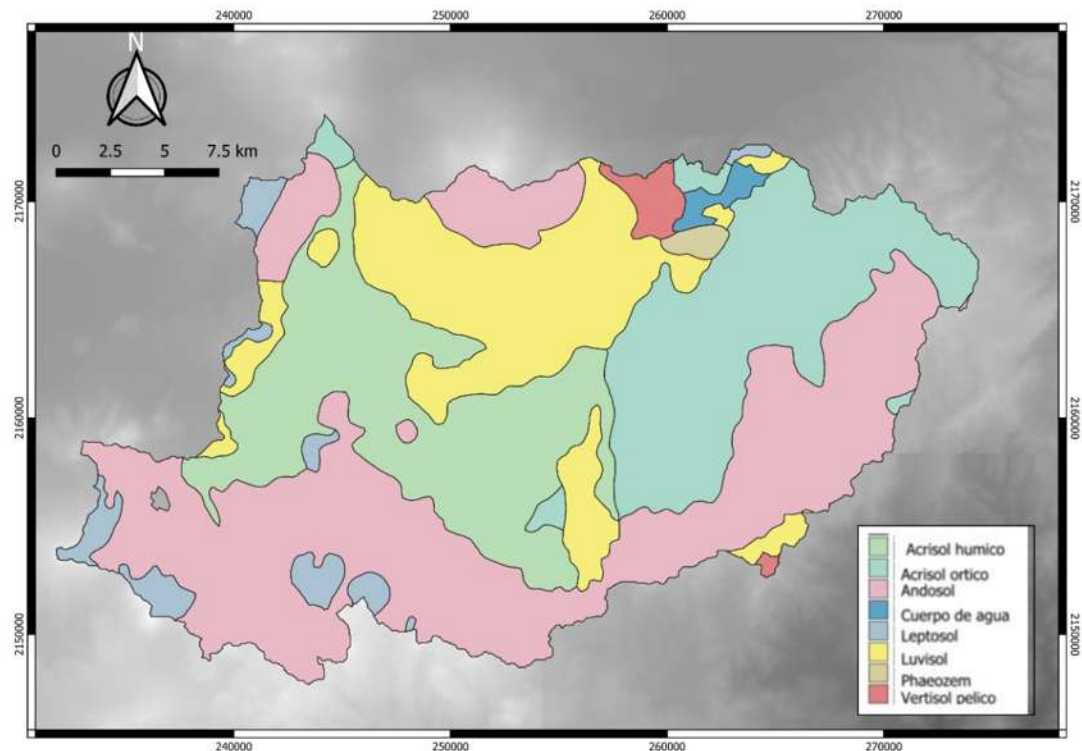


Figura 2.7.- Tipos de suelos en la subcuenca de la Presa de Cointzio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONABIO.

Sin embargo, los suelos dominantes son los: acrisoles, luvisoles y andosoles. De acuerdo con las características de los suelos phaeozem, estos son muy fértiles e idóneos para el cultivo, aunque son sumamente propensos a la erosión. Son suelos que, como característica principal, superficialmente presentan una capa de color oscuro debido al contenido de materia orgánica mayor a 1 %, son profundos, suaves y desarrollados (INEGI, 2001). Se encuentran en varias zonas, desde zonas semiáridas, templadas o tropicales muy lluviosas, hasta diversos tipos de terrenos: planos y montañosos. En condiciones naturales, pueden presentar casi cualquier tipo de vegetación. Son suelos abundantes en nuestro país, y los usos que se les dan son variados; dependiendo del clima, relieve y algunas condiciones del suelo. Aquellos que son profundos y se sitúan en terrenos planos se emplean en agricultura de riego y temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con altos rendimientos. Los que tienen rendimientos más bajos, son aquellos que son menos profundos o que se encuentran en laderas y pendientes y se erosionan con mayor facilidad. No obstante, pueden emplearse para el pastoreo o la ganadería con resultados favorables (Ramos, 2023).

Por su bajo pH de 5.5, los acrisoles no cuentan con las propiedades apropiadas para la agricultura. Son suelos que se caracterizan por acumular arcilla en el subsuelo; por sus colores rojos, amarillos o amarillos claros con manchas rojas y porque generalmente son ácidos o muy ácidos. Suelen encontrarse en zonas templadas muy lluviosas o tropicales. Son en cierta medida susceptibles a la erosión, con el uso en el que menos se destruyen como recurso natural, es el forestal. El acrisol húmico, es un suelo que presenta un alto contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo, y menor contenido de materia orgánica en las capas de abajo (Ramos, 2003).

Los andosoles, por el contrario, son más fáciles de cultivar, cuentan con buenas características de enraizamiento y depósito de agua. Sin embargo, el cambio de usos de suelo los hace frágiles. Debido a su alto contenido de materia orgánica, la capa superficial es de color oscuro, su estructura es esponjosa, pero muy ácida. Son moderadamente profundos, de textura media y están limitados por roca (INEGI, 2001). Son, además, muy susceptibles a la erosión. El uso en el que menos se destruyen como recurso natural es el forestal (Ramos, 2003).

Los luvisoles son suelos desarrollados y ácidos (pH de 5.5 a 6.5), considerados uno de los suelos más abundantes en México, se caracterizan por tener un mayor contenido de arcilla, lo que le confiere buenas propiedades para la agricultura (INEGI, 2001).

2.5.5 Usos de suelo

Los principales usos del suelo en la subcuenca de la Presa de Cointzio son ocupados por el bosque (de pino y encino), mancha urbana, pastizales, vegetación (arbustos), y en su mayoría está ocupado por la agricultura, como se observa en la Figura 2.8.

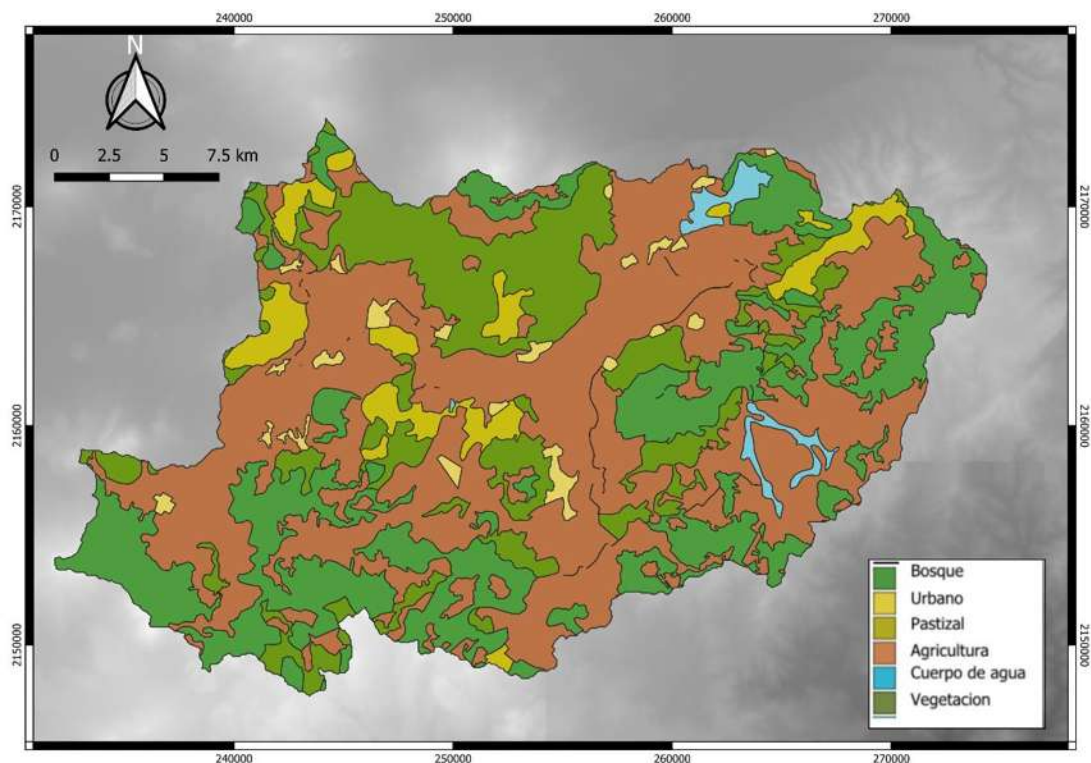


Figura 2.8.- Uso de suelos en la subcuenca de la Presa de Cointzio. Fuente: Elaboración propia con datos de la CONABIO.

2.5.6 Prácticas agrícolas

Respecto al uso de suelo en su mayoría está ocupado por la agricultura, principalmente cultivos como aguacate, berries y maíz.

De acuerdo con las estadísticas y datos registrados en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023) la intención de siembra y cosecha de productos agrícolas en el año 2023 en los municipios de Acuitzio, Lagunillas, Morelia y Huiramba, se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3.- Productos agrícolas y superficie sembrada por municipio.

Cultivo	Modalidad	Municipio	Superficie (ha)
Maíz	Riego	Acuitzio	295
	Temporal		1,585.60
	Temporal	Lagunillas	1,228
	Riego		sin datos
	Riego	Morelia	902
	Temporal		15,588
	Riego	Huiramba	sin datos
	Temporal		1,398
Aguacate	Temporal	Acuitzio	332
	Riego		1,627
	Riego	Morelia	1,086.50
	Temporal		478
	Temporal	Lagunillas	42
	Riego		sin datos
	Riego	Huiramba	sin datos
	Temporal		228
Fresa	Riego	Huiramba	125
	Temporal		sin datos
	Riego	Lagunillas	86
	Temporal		sin datos
	Riego	Morelia	165
	Temporal		sin datos
	Temporal	Acuitzio	sin datos
	Riego		sin datos

Fuente: elaboración propia a partir de estadísticas del SIAP, 2023.

Actualmente, también se encuentran cultivos de arándano dentro de la subcuenca, sin embargo, de estos no hay un registro como tal dentro de la plataforma del SIAP.

Con base en una entrevista personal con el director de la Junta de Sanidad Vegetal de Acuitzio (2024), en esta se tiene el registro de la producción de aguacate de los municipios de Acuitzio, donde las huertas se encuentran en menor cantidad, pero las superficies son más grandes; en Villa Madero y Morelia, caso contrario a Acuitzio, las huertas son más chicas y corresponden a terrenos ejidales. En la

Tabla 2.4 se muestran las hectáreas sembradas correspondientes a dichos municipios, así como el número de localidades que abarca.

Tabla 2.4.- Aguacate y superficie sembrada en los municipios de Acuitzio, Villa Madero y Morelia.

Municipio	Superficie (ha)
Acuitzio	2,515
Morelia	1,418
Villa Madero	1,247

Fuente: elaboración propia a partir de datos proporcionados por la Junta de Sanidad Vegetal de Acuitzio, 2024.

Cabe mencionar que este registro ante la Junta, es únicamente de las huertas de aguacate que son de exportación para los Estados Unidos. Siendo así, que las huertas que no tienen un registro, aumentan la superficie sembrada en dichos municipios.

El municipio de Morelia abarca 37 localidades que son: Atécuaro, Buena Vista, Campechagua, Capula, Canoas, Cerro del águila, Chihuerio, Chiquimitio, Cuanajillo del Toro, El Tejocote, Hojas anchas, Ichaqueo, Iratzio, Nieves, Ojo de agua, Palo amarillo, Puerto de la Sosa, Puerto del Madroño, San José Coapa, Joya de la Huerta, La Artesa, La Ciénega, La Peña Tajada, Las Flores, Las Palomas, Loma Caliente, Loma del Puerto del Tigre, Paramo, Piedras de Lumbre, Potrerillos, San Miguel Coapa, Tacícuaro, Teremendo, Tiripetio, Tumbisca, Umecuaró y Sajo el chico.

De las cuales, la mayor producción se encuentra en las localidades de Hojas anchas, Nieves, Loma Caliente y Umecuaró. Mientras que en Chiquimitio, Cuanajillo del Toro, Iratzio, Teremendo y Capula se concentra una menor producción.

Respecto al municipio de Acuitzio, este abarca 41 localidades: Agua grande, Agua puerca, Aróstaro, Arroyo Hondo, Cutzaro, Corralo (Tirindiriz), Cruz gorda, El Ciprés, El Melón, El Moral, El Paredón, La Laja, La Palma, Ziparapio el Bajo, La Peñita, La Tinaja, La Vinata, Las Canoas, Las Juntas, Las Peñas, Las Trojes, El Terrero, El Tzintzún, El Varal, Huajumbo, La Angostura, La Campana, La Huizata, Los Aguacates, Paso del Muerto, Páramo, La Florida y Tepatzicuaro.

2.5.7 Uso de fertilizantes

La concentración de nitrógeno en los fertilizantes nitrogenados varía, y según la forma en la que se agreguen al suelo y a los cultivos. Las características del suelo son muy importantes para la elección del fertilizante, pues esto depende del pH y contenido de humedad del suelo, así como del nitrógeno disponible en él. Otros factores son, la disponibilidad del fertilizante y del equipo para su aplicación, también del costo por unidad de Nitrógeno - ha. No hay una recomendación general como tal para el mejor tipo y cantidad optima de fertilizante. Se requiere que los agricultores evalúen la fuente de nitrógeno adecuada para sus cultivos según sus condiciones específicas y así poder disminuir las pérdidas por volatilización (Verhulst *et al.*, 2015).

Los principales fertilizantes aplicados en la región se concentran en la Tabla 2.5, así como la cantidad aplicada, dependiendo el tipo de cultivo, la zona y el agricultor, la cantidad puede variar. En algunos casos, los agricultores utilizan como complemento de abono el estiércol del ganado. Ante las temperaturas bajas, algunos optan por el estiércol de la gallina, ya que este, es más caliente que el estiércol de las vacas y para algunos cultivos, incluso para el suelo, son mejor. Dicha información, se obtuvo de primera mano, es decir, se realizaron entrevistas a algunos agricultores de la subcuenca.

Los fertilizantes utilizados son minerales, y son solubles en agua, por lo que su aplicación es vía fertirriego. Esta aplicación tiene como ventajas la reducción en los costos de aplicación de fertilizantes por hectárea, pues se utiliza el mismo equipo de riego. Además, esta técnica disminuye el daño a los cultivos, ya que los nutrientes se aplican de manera uniforme (SIAP, 2016).

Tabla 2.5.- Principales fertilizantes nitrogenados utilizados en los cultivos de la subcuenca de Cointzio.

Cultivo	Fertilizante	Cantidad aplicada (kg/ha)
Maíz	Urea	600
	Sulfato de amonio (solub 21)	150-240
	Nitrato de amonio	200
Arándano	Sulfato de amonio (solub 21)	150-300
	Urea	250
	Fosfonitrato de amonio	250
Fresa	Nitrato de amonio	244
	Sulfato de amonio (solub 21)	150-300
	Urea	250
Aguacate	Fosfonitrato de amonio	600
	Nitrato de potasio	600
	Urea	300
	Triple 16, 17, 18, 19	200 -400
	MAP	300 -400

Fuente: elaboración propia a partir de datos proporcionados por agricultores incorporados a la Junta de Sanidad Vegetal de Acuitzio, 2024.

2.6 Problemática de contaminación en la zona

Los municipios aledaños en la zona Sur como son Acuitzio, Tiripetio y Santiago Undameo son los que más contaminan este cuerpo de agua, pues mucho de sus entradas provienen dichas localidades, además del drenaje de agua que baja de las colinas. Este tipo de suministro trae consecuencias como el arrastre de sedimentos y materia que alteran la composición fisicoquímica del agua. Otros factores que causan el cambio en la composición del agua son el incremento de la población y con ello el consumo de agua por las actividades que se realizan en su alrededor.

El aumento en los cultivos de aguacate y fresa principalmente, se han convertido en una amenaza que afectan la calidad del agua, estas actividades de cultivo

también dañan las zonas de bosque ya que se lleva a cabo actividades de deforestación y tala de árboles para sus previos cultivos (Arroyo, 2020). Al mismo tiempo, además de demandar una mayor cantidad de agua, demandan una cantidad de suelo, que después comienza a ser muy inestable.

En la zona Sur de Morelia, en el 37 % del área total, se desarrolla la actividad agrícola, a diferencia de la forestal (bosque cerrado y semi abierto) cubre el 31%.

De acuerdo con el documento de Alcalá de Jesús *et al.* (2007) el cual menciona que esta zona está compuesta por tres tipos o zonas de suelos que varían con forme a sus alturas, en las zonas más altas se constituye con material de tipo volcánico y se observan deforestación tala de árboles específicamente pino y encino, tales deforestaciones su mayor porcentaje es utilizado para fines de cultivo de maíz esto provoca la contaminación de suelos, de igual manera en zonas de lomas y mesetas se lleva a cabo el cultivo de maíz y deforestación de pino conservando una pendiente que varía entre 5% y 15%, y en zonas menores se cuenta con suelo destinado a el pastoreo y zonas de riego con pendientes de menor al 5%.

En la Figura 2.9 se puede observar que, con base en la información de la Universidad Nacional Autónoma de México, los principales factores que influyen en la degradación del suelo de la presa de Cointzio, son: políticos, de manejo, socioeconómicos y ambientales. Que se basan en el monocultivo (de aguacate, maíz y berries), mismo que conlleva a un uso excesivo de agroquímicos y una labranza inadecuada por falta de información y capacitación a los agricultores. Así mismo, la deforestación y urbanización, y una política estatal desvinculada entre otros.



Figura 2.9.- Principales factores políticos, de manejo, socioeconómicos y ambientales de degradación del suelo en Cointzio. Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México.

Aunado a las actividades de agricultura y ganadería, la Presa de Cointzio se ha visto afectada por el proceso de eutrofización (presencia de lirio) que se ve favorecido por el incremento de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno (Figura 2.10). Dichos nutrientes se encuentran en exceso, y su presencia se puede adjudicar a la escorrentía e infiltración de residuos de agroquímicos utilizados en la agricultura principalmente.

Los agroquímicos tienen un efecto adverso en todo el ciclo acuático, desde la flora como las algas, hasta los organismos que sirven de alimento para las poblaciones piscícolas, “especialmente a las especies nativas”.



Figura 2.10.- Eutrofización en la presa de Cointzio. Fuente: elaboración propia.

Los municipios influyentes dentro de la subcuenca son Santiago Undameo, Tiripetio, Acuitzio, Lagunillas, Huiramba, Cuanajo y parte de Pátzcuaro. Sin embargo, son 4 los que mayor influencia tienen sobre la subcuenca: Acuitzio, Huiramba, Lagunillas y Morelia. De los 643 km² de superficie aproximada que tiene de territorio la subcuenca, estos 4 municipios abarcan un 85%. En ellos se han incrementado los cultivos de aguacate y fresas (Fuerte, 2022).

En el 2012, Peniche y Ávila, realizaron un análisis de la cantidad de agua que requiere el cultivo de fresa contra el cultivo de maíz, el estudio demuestra que el cultivo de fresa requiere una alta cantidad de agua a diferencia de cultivos tradicionales como el maíz. La fresa requiere cerca de 40 riegos a la vez que el maíz utiliza solo 4.

Mientras que en el estudio de Gómez (2018), habla sobre el peligro del cultivo de aguacate y mismo en cual determinó la cantidad de agua que consume un árbol de aguacate, demostrando que un árbol joven de aguacate consume alrededor de 0.98 l/m²/día, mientras que un árbol de pino 0.190 l/m²/día. Lo que significa que el cultivo de aguacate consume cinco veces más agua que un árbol de pino. Así mismo, dicho autor evidenció una segunda problemática respecto a estos cultivos, pues mientras que un árbol de pino capta un 2.4% del total de la precipitación un árbol de aguacate capta 0.017, es decir, 14 veces menos que el pino. Lo que nos indica que la producción de aguacate permite poca infiltración

del agua al subsuelo, afectando la recarga de agua y a los cuerpos superficiales de agua.

Actualmente en Santiago Undameo, en las coordenadas 19.598473, -101.285892 se encuentran las instalaciones de una planta tratadora de aguas. Sin embargo, no se encuentra funcionando por falta de operadores y mantenimiento. Incluso pobladores cercanos comentan que en temporada de lluvias esta se llega a inundar (Figura 2.11 y 2.12). El predio se encuentra libre de vegetación, donde existen evidencias que en ella se practicó la agricultura de temporal, actualmente el predio no tiene un uso específico.

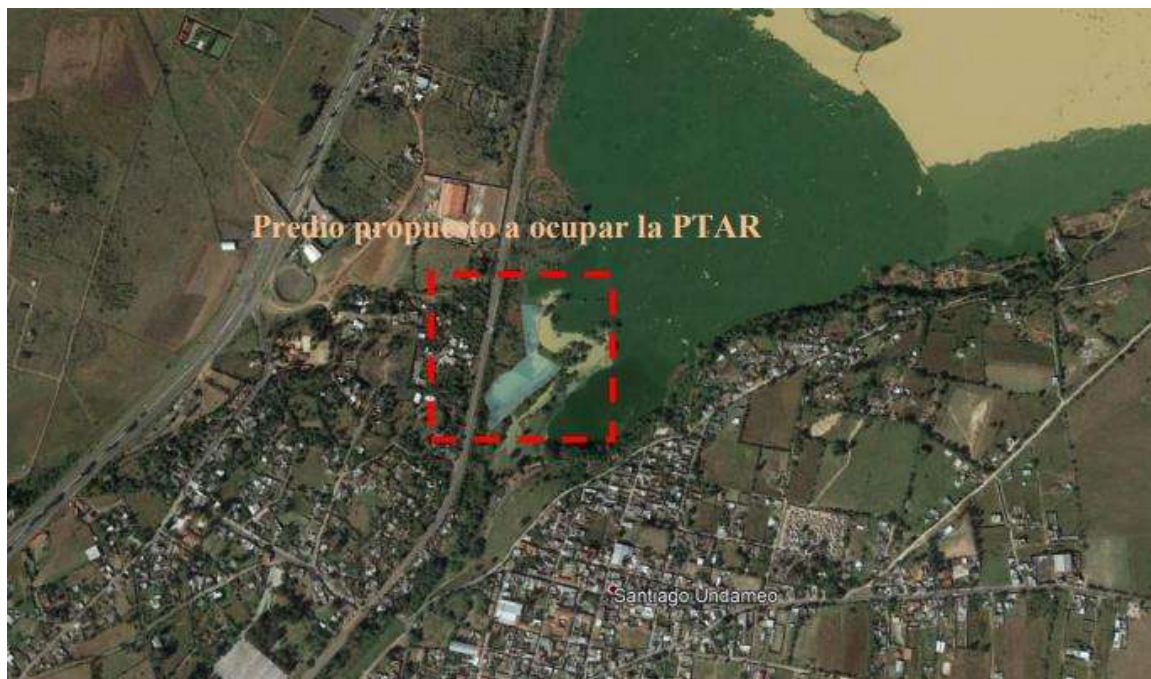


Figura 2.11.- Ubicación del predio destinado para la construcción de la planta tratadora de aguas residuales, en la localidad de Santiago Undameo, municipio de Morelia, Mich.

Fuente: Dirección general de impacto y riesgo ambiental.



Figura 2.12.- Planta tratadora de aguas residuales en Santiago Undameo. Fuente: Elaboración propia.

2.7 Modelación hidrológica

El uso de los modelos hidrológicos matemáticos actualmente, se ha convertido en una herramienta fundamental en el día a día. A razón de esto, en los últimos años, el mercado se ha vuelto muy competitivo, pues se han desarrollado variedad de programas informáticos con diversas características e interfaces, con el propósito de intentar cubrir las limitantes de los programas anteriores y las necesidades del modelado actual (Fuillerat Muriel, 2021). (Praskievicz y Chang, 2009) y (Abbaspour *et al.*, 2015) señalan que los modelos hidrológicos son una pieza clave en la gestión de los recursos hídricos, que cubren las demandas agrícolas, urbanas e industriales. Así mismo, que juegan un rol importante en la predicción de los impactos generados y en la previsión de emergencias.

Se puede afirmar que, al ser los modelos hidrológicos representaciones simplificadas, es posible estudiar la relación causa-efecto de la precipitación sobre una cuenca (Navarro, 2019).

2.7.1 Modelos de transporte

Los modelos de simulación permiten crear diferentes escenarios para predecir el comportamiento de distintas variables en un sistema. Existen diferentes modelos que permiten obtener buenos resultados y que responden a las interrogantes formuladas, de acuerdo con los sistemas y el objeto de estudio; entre estos se encuentran los modelos de calidad del agua, calidad del aire, hidrológicos, entre

otros (Osorio y Cerquera, 2020). El transporte de agroquímicos tiene dos componentes; uno hidrológico y otro relacionado con la calidad del agua. El primero, debido a la escorrentía que arrastra diferentes partículas y el segundo por las sustancias disueltas (Neitsch *et al.*, 2005). El objetivo del modelo hidrológico es, conocer el comportamiento de las variables hídricas en una cuenca, permitiendo simular el transporte de nutrientes, sedimentos y agroquímicos; y por otra parte, el modelo de calidad de agua permite conocer la interacción entre los contaminantes y el agua, en relación al impacto generado y la calidad del agua (Kannel *et al.*, 2007). Los modelos hidrológicos, incluyen los modelos de transporte, estos simulan el flujo de agua en la cuenca y estiman las cargas de sustancias que pueden ser arrastradas por dichos flujos (Pascual y Díaz, 2016).

Dentro de los modelos de transporte se consideran dos grandes grupos: 1) los sedimentos (material arrastrado de la parte superficial del suelo) y 2) las sustancias que están disueltas en el agua como nutrientes, plaguicidas, entre otros (Neitsch *et al.*, 2005).

Algunos ejemplos de modelos hidrológicos de transporte son:

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que ha sido utilizado para simular el transporte de sedimentos, nutrientes y agroquímicos en cuencas hidrológicas.

El Water Erosion Prediction Project (WEPP) este simula la escorrentía superficial y la producción de sedimentos en laderas y pequeñas cuencas de drenaje. Simula escenarios de acuerdo con las características del terreno cultivado, los efectos de los cultivos y su rotación (Pascual y Díaz, 2016).

Y el Annualized Agricultural NonPoint Source Model (AnnAGNPS), que es un modelo basado en eventos y flujo continuo, que simula la escorrentía, el transporte de sedimentos; pesticidas y nutrientes (nitrógeno y fósforo), la erosión del suelo y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Pascual y Díaz, 2016).

Para efectos de este estudio, se opta por el uso del SWAT, ya que es un modelo que posee la capacidad para simular el transporte de nutrientes, en este caso el transporte de nitrógeno, tomando en cuenta todos los componentes del ciclo hidrológico (precipitación, escorrentía, infiltración, entre otros). Y, de acuerdo a

los resultados obtenidos, evaluar los efectos en el mismo, provocados por los cambios de uso de suelo (Arnold *et al.*, 1998), (Neitsch *et al.*, 2005, en Bautista *et al.*, 2014).

Además de la previa revisión de antecedentes, en los cuales, diferentes estudios emplearon el modelo no solo para estimar el transporte de agroquímicos o pesticidas, sino también el destino de plaguicidas, otras sustancias y sedimentos a nivel de cuenca.

2.7.2 Modelo SWAT

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo hidrológico semidistribuido y físicamente basado, que permite simular los componentes del balance hídrico (Ecuación 1), a una escala espacial y temporal. Se cataloga como continuo, ya que opera con un paso diario de tiempo. Está diseñado para predecir el impacto de las prácticas y manejo del suelo en la generación de escurrimientos y sedimentos; así como para evaluar el comportamiento de sustancias químicas agrícolas en distintos tipos de suelo, coberturas vegetales y condiciones de manejo a lo largo del tiempo (meses o años) (Arnold *et al.*, 1998), (Weber y Baigorri, 2018).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad Ec.1$$

Donde:

SW_t , es el contenido final de agua en el suelo (mm) en el tiempo t.

SW_0 , es el contenido inicial de agua del suelo en el día i (mm).

t, tiempo (días).

R_{day} , es la cantidad de precipitación en un día i (mm).

Q_{surf} , es la cantidad de escurrimiento superficial en un día i (mm).

E_a , es la cantidad de evapotranspiración en el día i (mm).

W_{seep} , es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm).

Q_{gw} , es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm).

Se encuentra ligado a la interfaz de un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual, posibilita al usuario generar, integrar y representar a través de la conexión de mapas con bases de datos de manera eficaz cualquier información geográfica asociada a un territorio. Estos sistemas facilitan la visualización de los datos obtenidos en un mapa y tienen como finalidad representar y relacionar fenómenos de cualquier tipo. Representan los objetos del mundo real desde carreteras, usos del suelo, identificación de parcelas agrícolas, entre otros. Bajo este contexto, hay dos formas de almacenar los datos en un SIG: raster y vectorial. Ambas, son formas versátiles de mostrar el espacio y ayudan, según su naturaleza, a interpretar mejor los elementos del objeto de estudio (SGM, 2017). El SIG al cual se encuentra ligado, para este estudio es el QGIS.

A partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), el procedimiento consiste en dividir la cuenca de estudio en varias subcuencas, posteriormente, de acuerdo con la pendiente del terreno, el tipo de suelo y la cobertura vegetal, estas se subdividen en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). Esta subdivisión permite, para varios ciclos de cultivo y tipos de suelo, representar las diferencias en la evapotranspiración. Los escurrimientos se estiman por separado para cada HRU para obtener después los escurrimientos totales de la cuenca, lo cual incrementa la precisión y describe el balance hídrico de mejor manera (Neitsch *et al.*, 2011).

El modelo SWAT utiliza la información de la estación meteorológica más cercana al centroide de cada subcuenca. Para cada HRU, el ciclo hidrológico es simulado a partir del balance hídrico, que involucra la precipitación, el escurrimiento superficial, la intercepción, la evapotranspiración, la percolación, el flujo lateral del perfil del suelo y flujo de retorno de acuíferos poco profundos (Gassman *et al.*, 2007). Para cada HRU, el escurrimiento superficial lo predice de forma separada y, después para obtener el escurrimiento total de la cuenca, lo concentra a través del método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) (USDA, 1972).

SWAT determina la evaporación del suelo y de las plantas por separado. La evapotranspiración potencial (ETP) se puede calcular con los siguientes métodos:

PenmanMonteith, el cual requiere datos de temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad (Monteith, 1965); Priestley-Taylor, requiere datos de temperatura, radiación solar y humedad relativa (Priestley y Taylor, 1972); y Hargreaves, que solo requiere temperatura máxima y mínima (Hargreaves y Samani, 1985).

El método de Hargreaves en SWAT, utiliza la siguiente fórmula para calcular la evapotranspiración potencial:

$$\lambda E_o = 0.0023 H_o (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} (T_{av} + 17.8) \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

λ es el calor latente de evaporación (MJ/kg).

E_o es la evapotranspiración potencial (mm/d).

H_o es la radiación estraterrestre (MJ/m²d).

T_{mx} es la máxima temperatura del aire en un día dado (°C).

T_{mn} es la mínima temperatura del aire en un día dado (°C).

T_{av} es la temperatura media del aire en un día dado (°C).

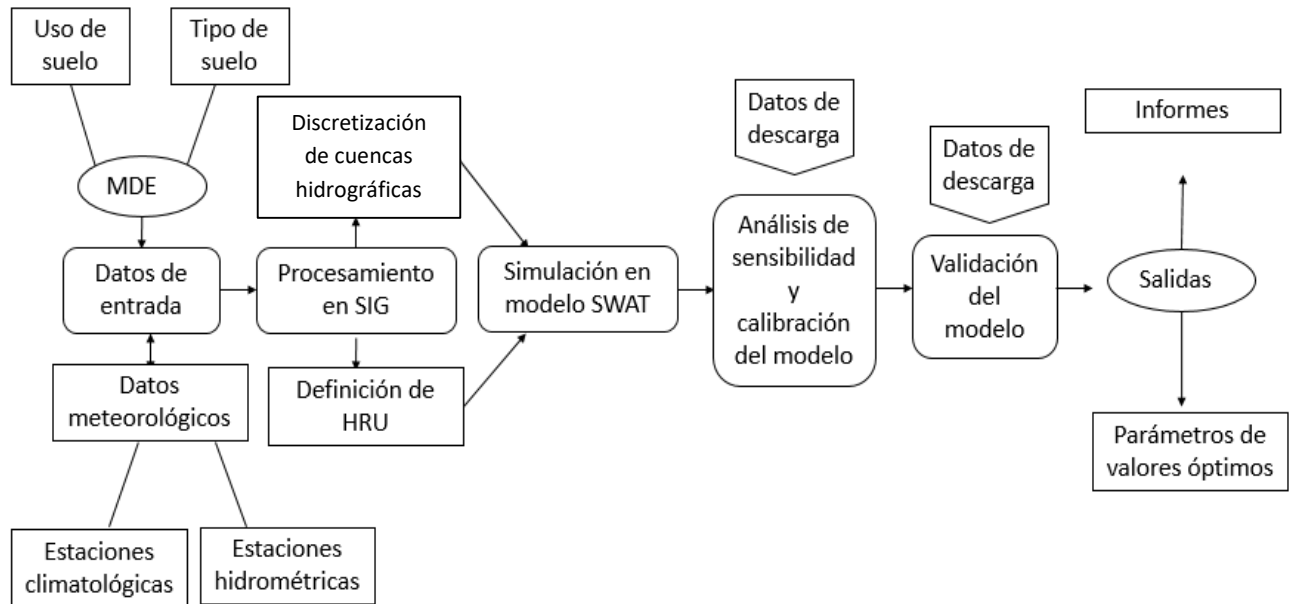


Figura 2.13.- Diagrama de la configuración del proyecto en SWAT. Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de SWAT, 2021.

2.7.3 Modelación del nitrógeno en SWAT

El ciclo del nitrógeno, al ser un sistema dinámico, comprende el agua, el suelo y la atmosfera. Existen varias formas en las que la concentración de nitrógeno se puede sumar al suelo; ya sea por medio de la lluvia, los fertilizantes, el abono o la aplicación de residuos, por fijación de las bacterias simbióticas y no simbióticas. El nitrógeno se elimina del suelo a través de su absorción por las plantas, lixiviación, volatilización, desnitrificación y la erosión. En la Figura 2.14 se muestran los principales componentes del ciclo del nitrógeno (Neitsch *et al.*, 2005).

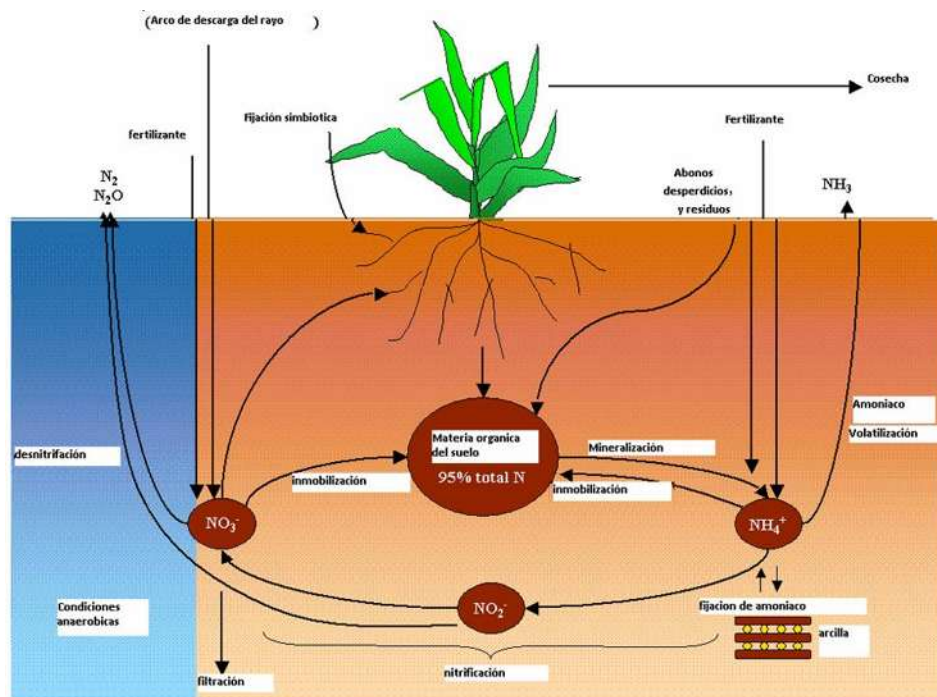


Figura 2.14.- Principales componentes del ciclo del nitrógeno en SWAT. Fuente: Manual SWAT, 2005.

El nitrógeno en SWAT, se representa en el perfil del suelo y en el acuífero poco profundo. Este modelo monitorea cinco diferentes formas de nitrógeno. Dos son formas inorgánicas (NH_4^+ y NO_3^-), las otras tres formas son orgánicas (nitrógeno orgánico fresco, estable y activo). El nitrógeno orgánico fresco se relaciona con la biomasa microbiana y residuos de cultivo, mientras que el nitrógeno orgánico estable y el nitrógeno activo se asocian con el humus del suelo, se muestran en la Figura 2.15 (Neitsch *et al.*, 2005).

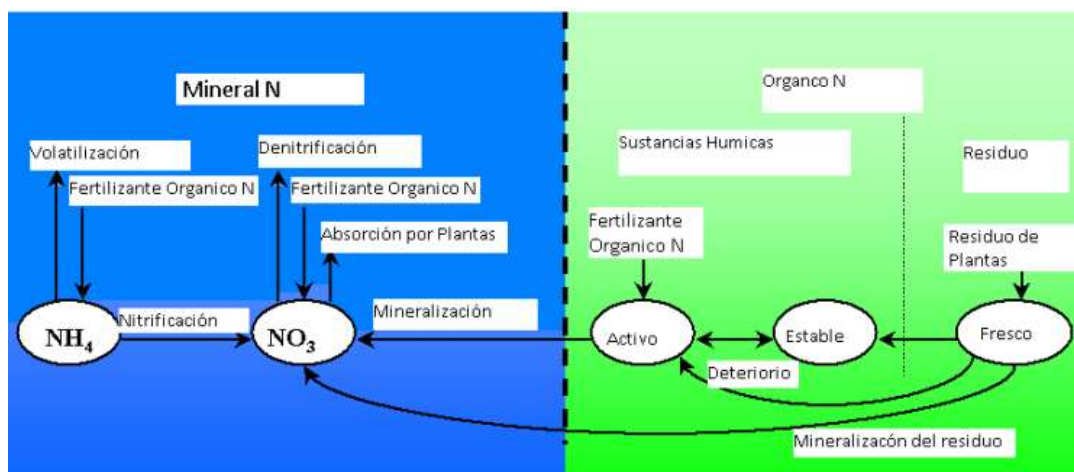


Figura 2.15.- División del nitrógeno en SWAT. Fuente: Manual SWAT, 2005.

Al inicio de la simulación, el usuario puede establecer la cantidad de los niveles de nitrógeno para las capas del suelo; de no especificar las concentraciones, SWAT inicializara dichas concentraciones para las diferentes formas de nitrógeno. En todas las capas, el nitrógeno orgánico fresco se establece en 0 a excepción de la parte superior a los 10 mm del suelo, en esta parte es fijado a 0.15%. Mientras que la reserva de amonio para el nitrógeno del suelo, se inicializa en 0 ppm, y la fracción de nitrógeno húmico activo, es fijada en 0.02. Al ingresar los datos de nutrientes como concentraciones, SWAT realiza los cálculos para transformarla a masa (Neitsch *et al.*, 2005).

SWAT reconoce el movimiento y la conversión de las diferentes formas del nitrógeno en la cuenca, la cual ocurre por el ciclo natural del mismo. Este nutriente se transporta hacia los canales principales gracias a la escorrentía. El nitrógeno es simulado en cada HRU, las concentraciones de nitrógeno en forma de nitratos contenidas en la escorrentía, se estiman como producto del volumen de agua y la concentración del nitrato en la capa del suelo (Neitsch *et al.*, 2005). El cálculo del nitrógeno orgánico presente en los sedimentos, se basa en la concentración de este compuesto en la primera capa del suelo, en la producción de sedimento y se estima a partir de la pérdida de nitrógeno orgánico diario por escorrentía (Neitsch *et al.*, 2011).

III. Metodología

Para realizar la aplicación del modelo SWAT a nuestra zona de estudio, se llevaron a cabo los siguientes pasos presentados en la Figura 3.1 y descritos a continuación por etapas.

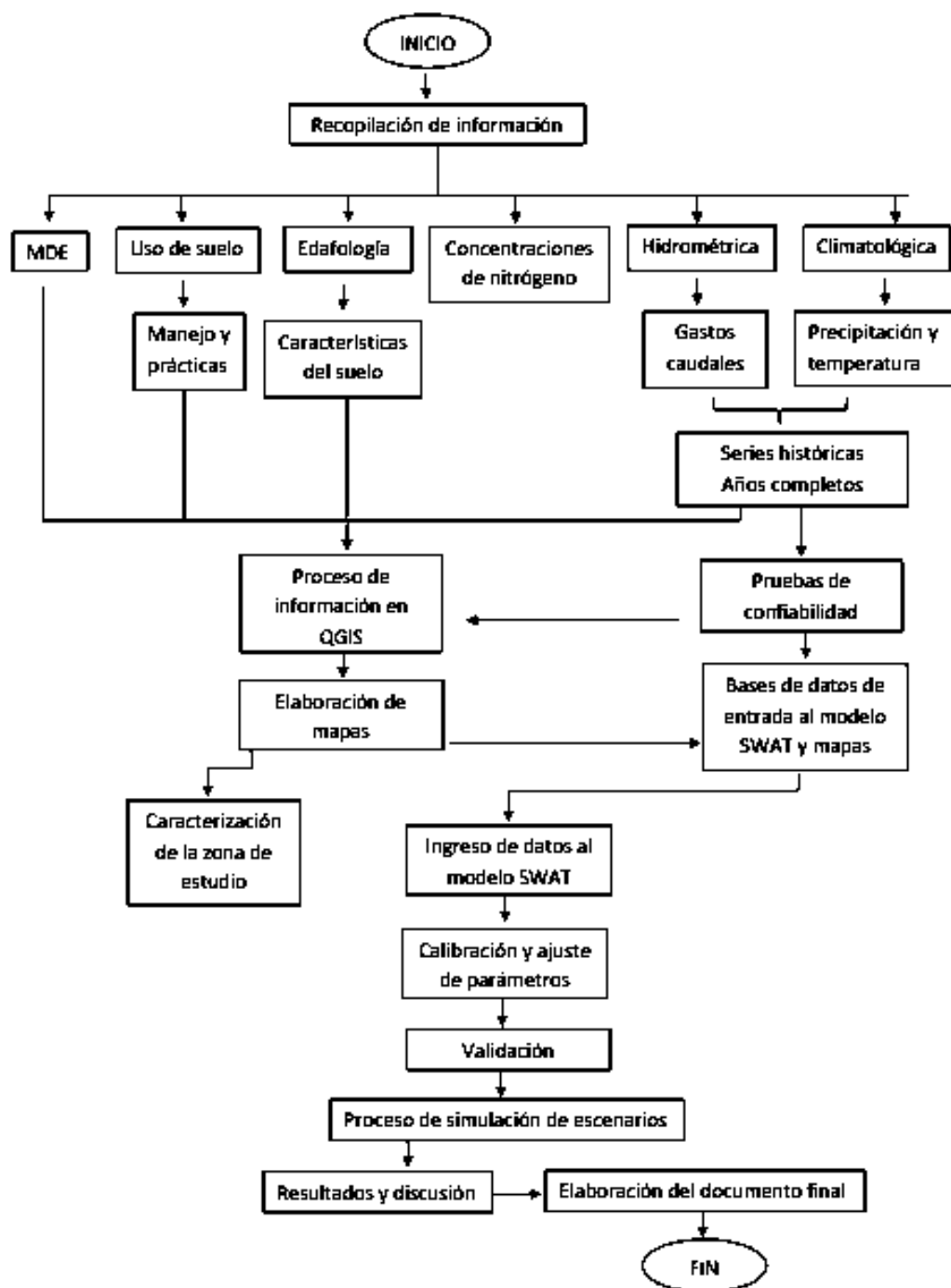


Figura 3.1.- Diagrama general de la metodología empleada para la modelación. Fuente: Elaboración propia.

3.1 Caracterización de la zona de estudio

Es importante conocer el área de estudio, para ello se realizó una caracterización de la subcuenca de Cointzio a fin de identificar su localización, clima, topografía, así como el uso y tipo de suelo (datos de entrada al modelo SWAT). Además de poder identificar también los cultivos que se tienen en los municipios y localidades aledañas a la zona.

Para ello, se empleó el sistema de información geográfica QGIS, el cual además está asociado a la interfaz del modelo SWAT. Mediante el cual se crearon los mapas a partir de las cartas topográficas de uso y tipo de suelo de la CONABIO y el modelo digital de elevaciones obtenido del INEGI.

3.2 Recopilación de la información

La recopilación de información consiste en obtener los datos necesarios para la modelación. El modelo SWAT requiere múltiples datos de entrada para su ejecución, como son:

- El modelo digital de elevaciones (MDE)
- Tipo y uso de suelo, cultivos en la cuenca.
- Información climática e hidrométrica: precipitación diaria, temperatura máxima y mínima. Para el presente trabajo la información requerida se obtuvo de diferentes programas cuyo objetivo es analizar y almacenar dicha información.
- Datos de fertilizantes empleados.

3.3 Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

El primer insumo requerido para la modelación, es el modelo digital de elevaciones, que está constituido por un conjunto de datos raster del territorio mexicano, para el cálculo de la pendiente y conocer las diferentes elevaciones de las zonas de estudio (INEGI, 2023) y el cual permite a SWAT delimitar la cuenca, las subcuencas y determinar la red de drenaje que componen el sistema hidrológico a simular, asimismo permite agregar diferentes elementos al modelo: puntos de entrada y salida de agua, embalses y reservorios de agua (Fernández, 2017).

En esta investigación se usó el MDE a una escala de 1:50 000 con la cual trabaja el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2023) obtenido de su página oficial. Para el área de estudio fue necesaria la unión de 4 cartas topográficas, cuyas claves son: E14A22 (Pátzcuaro), E14A23 (Morelia), E14A32 (Villa Escalante) y E14A33 (Villa Madero), la cual se realiza ingresándolos al sistema de información geográfica con el que se esté trabajando, en este caso QGIS, para conformar un solo MDE que abarque toda la subcuenca.

3.4 Mapas de uso y tipo de suelo

Los datos referentes al uso y tipo de suelo de la zona de estudio se obtuvieron de la información generada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) desde el Portal de Geoinformación (2023). Los formatos son un conjunto de datos vectoriales, y se encuentran a una escala gráfica de 1:250 000.

Respecto al uso de suelo, nos arroja información sobre el manejo y las prácticas que se llevan a cabo. El tipo de suelo, muestra información sobre la edafología que se encuentra en área de estudio. Además, nos proporciona también diferentes datos relacionados a sus características como físicas, textura, permeabilidad, entre otras.

El modelo solo incluye datos de suelos de Estados Unidos, por tal razón, las categorías de suelo se deben asociar a esa base de datos de suelo, esto se realiza tomando en consideración las similitudes entre las coberturas identificadas con las existentes en el modelo (Osorio y Cerquera, 2020).

3.5 Procesamiento de información en QGIS

Los archivos vectoriales se ingresan al sistema de información geográfica con la finalidad de procesar la información proporcionada y usarla en el modelo.

El modelo contiene una base de datos en donde almacena diferente tipo de información. En esta, existe información referente a la reclasificación del mapa de uso y tipo de suelo, en donde el usuario tiene libertad de modificarla (Correa, 2015).

3.6 Reclasificación de los mapas

Para la reclasificación del mapa de uso de suelo se realizó de acuerdo con la base de datos del modelo, como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1.- Información de uso de suelo.

Clave	Uso de suelo (INEGI)	Uso de suelo SWAT
WATR	Cuerpo de agua	Water
URBN	Urbano	Urban
PAST	Pastizal	Pasture
FRST	Bosque	Forest_mixed
FRSE	Vegetación	Forest_green
AGRL	Agricultura	Agricultural-generic

Fuente: Elaboración propia a partir de los usos de suelo del INEGI y claves para cada uno en SWAT.

Respecto al tipo de suelo, la información que nos proporciona este mapa, no es suficiente para llevar a cabo la modelación, ya que es información básica sobre las características de este, como las físicas (roca, tepetate, pedregosidad) o de textura superficial dominante. Y el modelo requiere de una mayor descripción de dichas características, como la textura, composición y porcentaje de arenas, arcillas, limo y rocas, así como datos de profundidad del suelo, grupo hidrogeológico, conductividad hidráulica, etc.

Para la reclasificación de este mapa, las características básicas del tipo de suelo se obtuvieron de la Guía para la interpretación de cartografía; edafología del INEGI (2015) y los valores de porcentajes de composición del suelo (Tabla 3.2) así como el grupo hidrogeológico y la conductividad hidráulica se propusieron a partir de dichas características básicas y una guía de la Food and Agricultural Organization (FAO).

Tabla 3.2.- Características del tipo de suelo.

Tipo de suelo	Clave INEGI	Textura	% arena	%arcilla	%limo	%roca
Leptosol	Lp	Media	69.9	19.5	10.5	0
Acrisol ortico	Ao	Fina	53.6	30.6	15.8	0
Acrisol húmico	AH	Media	31.3	43.8	24.8	0
Luvisol	LV	Media	26.1	46.7	27.3	0
Vertisol pélico	VP	Fina	25.1	62.7	12.2	0
Phaeozem	HH	Fina	37.2	31.6	31.2	0
Andosol	To	Media	8.54	51.95	39.51	0
Cuerpo de agua	Watr	-	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Food and Agricultural Organization (FAO).

3.7 Estaciones climatológicas

El modelo SWAT requiere de información climatológica de la zona de estudio. Dicha información se obtuvo de la base de datos de Climate Computing Project (CLICOM), es una base que alberga registros diarios de la red de estaciones climatológicas las cuales nos proporcionan información de temperatura máxima y mínima, precipitación diaria, evaporación. Los datos que alberga CLICOM presentan un retraso en su actualización, con variaciones que van desde meses hasta años, debiéndose principalmente a que los registros se elaboran de forma manual por el observador. Por lo tanto, es necesario aplicar un análisis estadístico a la información.

3.8 Estaciones hidrométricas

Para los datos de caudales del cuerpo de agua, se tomaron los datos de la estación hidrométrica 12347- Santiago Undameo, que se encuentra a la entrada de la Presa de Cointzio. Misma que se obtuvo de la base de datos BANDAS (Banco Nacional de Aguas Superficiales). La información que nos proporcionan estas estaciones es: gasto medio diario, gasto máximo, gasto mínimo y transporte de sedimentos. Se trabajó con dicha estación, ya que esta se encuentra a régimen natural, y nos reporta datos donde no hay alguna intervención humana.

En la siguiente Figura 3.2, se puede observar la red de corrientes dentro de la subcuenca de la presa, la cual muestra la escorrentía hacia la misma. Así como la estación hidrométrica 12347- Santiago Undameo que se ubica a la entrada de la presa.

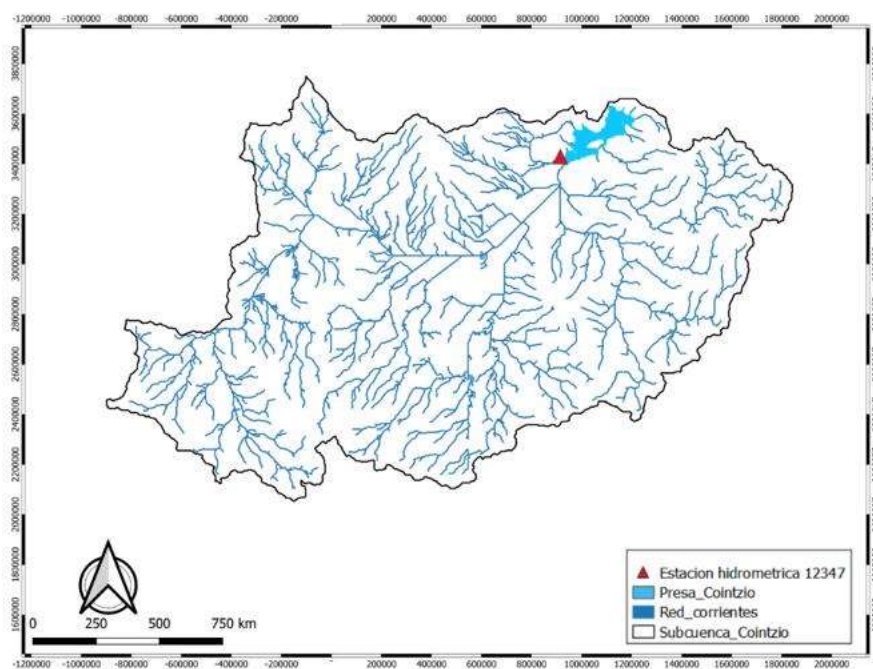


Figura 3.2.- Red de corrientes y ubicación de la estación hidrométrica 12347. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INEGI.

3.9. Análisis estadístico de la información

Las series de datos de la precipitación, se someten a un análisis estadístico de la información recopilada, el cual hace referencia a una evaluación de confiabilidad y calidad de los datos de las series de precipitación y gastos, mediante diversas pruebas matemáticas: homogeneidad e independencia.

Las pruebas que se implementaron son: Secuencias (Mather, 1975), Curva Masa Doble (Martínez *et al.*, 2006), la prueba de Helmer (Doorenbos, 1976), Wald-Wolfowitz (Siegel, 2015); pruebas específicas como t de Student (WMO, 1966) y Cramer (WMO, 1966). La evaluación de independencia es mediante la prueba de Límites de Anderson (Anderson, 1942; Salas, 1980).

Prueba de homogeneidad: la homogeneidad en una serie se refleja cuando todos los datos pertenecen a una misma población estadística. Sin embargo, esta

homogeneidad se ve alterada por la intervención del hombre; el crecimiento demográfico y el aumento en la demanda de recursos y servicios para satisfacer sus necesidades, cambian la consistencia de los registros de datos; pero este, no es el único factor, los procesos naturales como terremotos y erupciones volcánicas transforman el entorno afectando la homogeneidad de los registros. Entre las pruebas de homogeneidad se incluyen la prueba estadística de Cramer, la estadística de Helmert, la t de Student (Escalante y Reyes, 2002).

a) Prueba de Helmert

Esta prueba analiza el signo de las desviaciones de cada evento con respecto a su media; se forma una secuencia (S) cuando las desviaciones presentan consecutivamente el mismo signo, se considera un cambio (C) si las desviaciones cambian de signo (Domínguez *et al.*, 2017). Es decir, ordena los valores en función del tiempo y determina las secuencias (S) de valores con el mismo signo, ya sea que se encuentren por debajo o por encima de la media, y de igual forma identifica cuántos cambios (C) hay en la serie.

La serie es considerada homogénea, cuando la siguiente condición se cumple:

$$-\sqrt{n-1} \leq (S-C) \leq \sqrt{n-1}$$

Ec.3

Dónde:

n , es el tamaño de la muestra

S , es el número de secuencias

C , es el número de cambios

b) T-Student

Se emplea para identificar si la media de la serie sufre cambios significativos. Si se tiene una serie Q_i para $i = 1, 2, \dots, n$, y se divide en dos conjuntos n_1 y n_2 del mismo tamaño $n_1 = n_2 = n/2$, entonces, el estadístico t_d para la prueba de homogeneidad se define con la siguiente expresión:

Ec.4

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{[n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2 * (\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})]^{1/2}}{n_1 + n_2 - 2}}}$$

Dónde:

$\bar{X}_1$ y S_1^2 son la media y la varianza de la primera mitad del registro.

$\bar{X}_2$ y S_2^2 son la media y la varianza de la segunda parte del registro.

Se realiza una comparación entre el valor absoluto de t_d y el valor de la distribución t de Student de dos colas, y con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$. En caso de que el valor absoluto de t_d sea superior que el de la distribución t de Student, se señala que la diferencia entre las medias tiene inconsistencias, por consiguiente, la serie Q_i se considera no homogénea (Domínguez *et al.*, 2017).

c) Cramer

El objetivo de esta prueba, es comprobar la homogeneidad en el registro P_j^i de la serie j para $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$, así como determinar si el valor medio no varía de manera significativa de un periodo de tiempo a otro. Se analizan tres bloques, el primero que corresponde al tamaño total de la muestra, el segundo (n_{60}) que abarca el 60% de los últimos valores de la muestra n_j , y el tercero (n_{30}) que considera el 30% de los últimos valores de la muestra n_j . La prueba contrasta el valor de $\bar{P}_j$ del registro completo con cada una de las medias de los bloques seleccionados $\bar{P}_{60}^j$ y $\bar{P}_{30}^j$.

No debe existir una diferencia significativa entre las medias de los bloques, para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media (Gómez Hernández, 2012).

$$\bar{P}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{P_1^j}{n_j} \quad j = 1 \quad \text{Ec.5}$$

d) Curva masa doble

Esta prueba se basa en observar que la precipitación media acumulada en varias estaciones no es muy sensible a cambios en una de ellas, ya que se compensan entre sí muchos de los errores. Mientras que, la presencia de cambios significativos en una estación en particular afecta la precipitación acumulada en esta. Por lo que, si en una gráfica, en un eje se coloca la precipitación anual acumulada media de varias estaciones próximas a la estación en cuestión, y en el otro eje se pone la precipitación anual acumulada de la estación en estudio, tendremos como resultado una línea recta, siempre y cuando no se hayan presentado cambios o que estos no sean importantes; por el contrario, si la estación opera en condiciones diferentes, la pendiente de la línea cambia a partir del año en que estas condiciones se hayan presentado (Aparicio, 1992).

Prueba de Independencia: esta se aplica para asegurar que, al completar los registros de las series no se haya modificado su tendencia. Además, se debe garantizar a través de esta prueba, que las series estén formadas por variables aleatorias para que puedan ser modeladas utilizando modelos probabilísticos (Gómez Hernández, 2012).

Límites de Anderson

La prueba de independencia de los límites de Anderson, utiliza el coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso k . Si se analiza un registro, entonces $j = 1$. Con el objetivo de poder realizar un análisis de frecuencias, se requiere que la muestra P_i^j de la serie j para $i = 1, 2, 3, \dots$, esté compuesta por variables aleatorias.

La ecuación para determinar el coeficiente de correlación serial de retraso k es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (P_i^j - \bar{P}^j) (P_{i+k}^j - \bar{P}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (P_i^j - \bar{P}^j)^2} \quad \text{Ec.6}$$

Para: $r_0^j = 1$ y $k = 1, 2, \dots, n_j/3$.

Donde:

$$\bar{P}^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} P_i^j}{n_j} \quad \text{Ec.7}$$

Los límites al 95% de confianza para r_k^j se pueden calcular a partir de:

$$r_k^j (95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k} \quad \text{Ec.8}$$

El correlograma de la muestra, se representa en una gráfica con los valores estimados para r_k^j (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas) junto con sus correspondientes límites de confianza. Si el 10% de los valores r_k^j superan los límites de confianza, se considera que la serie P_i^j es independiente y, por consiguiente, se define como una variable que sigue las leyes de la probabilidad. La prueba se efectúa desde $k = 1$ hasta $k = \frac{L}{3}$, donde L es el tamaño de registro, y es mejor si r se acerca a cero (Gómez Hernández, 2012).

3.10 Muestreo en la presa de Cointzio para la determinación de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal.

Se tomaron muestras de agua y sedimentos, a fin de determinar mediante un análisis de calidad en el laboratorio, diferentes formas y su concentración, en las que el nitrógeno pueda estar presente e identificar los posibles puntos de contaminación en el cuerpo de agua superficial.

Puntos de toma de muestra

El monitoreo del cuerpo de agua superficial se llevó a cabo durante la temporada de estiaje en el cuerpo de agua, a fin de tomar muestras representativas se tuvieron 4 puntos de muestreo a lo largo de la presa, estos puntos se muestran en la Figura 3.3 y sus respectivas coordenadas y que se describen en la Tabla 3.3 con las observaciones correspondientes a dichos puntos de muestreo.



Figura 3.3.- Puntos de muestreo en la Presa de Cointzio. Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

Tabla 3.3.- Puntos de toma de muestra de agua.

No de muestra	Lugar de muestreo	Coordenadas	Observaciones
1	Aposento alto*	19.624601, - 101.248227	La muestra 1 se tomó a 5 m de profundidad.
2	*Aposento alto	19.624601, - 101.248227	La muestra 2 se tomó a 3 m de profundidad en el mismo punto de la muestra 1.
3	Uruapilla	19.615767, - 101.273479	La muestra se tomó a 5 m de profundidad.
4	Santiago Undameo	19.603210, - 101.277042	La muestra 4 se tomó cerca de una entrada a la presa proveniente de Santiago Undameo, a 3 m de profundidad.
5	Canal Santiago Undameo	19.592361, - 101.289262	La muestra 5 se tomó superficial en un canal de Santiago Undameo, que va hacia la presa.

*Referencia de cercanía al sitio de muestreo. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 3.4.- Puntos de toma de muestra de sedimentos.

No de muestra	Lugar de muestreo	Coordenadas	Observaciones
1	Uruapilla	19.615599, - 101.269754	La muestra es más lodosa, color claro
2	Aposento alto*	19.625810, - 101.247695	La muestra es de color más oscuro.

*Referencia de cercanía al sitio de muestreo. *Fuente: Elaboración propia.*

Procedimiento

Para realizar un muestreo de agua, se debe cumplir con los requisitos establecidos en la NMX-AA-3-1980 NORMA MEXICANA "AGUAS RESIDUALES. – MUESTREO".

Esta norma nos indica las recomendaciones para llevar a cabo un buen muestreo y obtener muestras representativas respecto a las condiciones existentes en el lugar de muestreo y de las características del efluente total.

Para obtener las muestras se realizó el siguiente procedimiento:

Muestreo de agua

Se ingresó al cuerpo de agua a través de una lancha motorizada, hacia los puntos de muestreo mencionados anteriormente. Las muestras se extrajeron con apoyo de una botella Van Dorn de 10 L de capacidad, atada con una cuerda para poderla tomar a diferentes profundidades (3 y 5m) y a fin de obtener una muestra representativa y compuesta.

Posteriormente la muestra se transfirió de la botella Van Dorn a frascos de polivinilo, previamente enjuagados con la misma agua del sitio de muestreo, e identificados, los cuales se fijaron correctamente con su tapa para evitar que la muestra se derramara. Posteriormente resguardaron las muestras en una hielera.



Figura 3.4.- Muestreo de agua en la Presa de Cointzio. Fuente: Elaboración propia.

Preservación de las muestras

Para el transporte de las muestras desde el lugar de muestreo hasta el laboratorio donde fueron analizadas, se colocó hielo dentro de las hieleras para preservar las muestras a una temperatura (4°C). El periodo de tiempo entre la toma de la muestra y su análisis debe ser el menor posible y no exceder los tres días.

Muestreo de sólidos

Para la toma de muestras de sólidos, se realizó en dos puntos: 1) cerca de una descarga de aguas negras, a la orilla del cuerpo de agua, 2) en una entrada al cuerpo de agua, donde se observa acumulación de lirio acuático. Se utilizó un muestreador de tubo PVC de 2", el cual se introdujo al cuerpo de agua, quedando los sedimentos dentro de la superficie del mismo. Posteriormente, se transfirieron a un frasco de polivinilo para su posterior análisis.



Figura 3.5.- Muestreo de sedimentos en la Presa de Cointzio. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3.5, se describen las formas de nitrógeno a analizar, las técnicas de preservación y la normativa a emplear para su análisis, tanto para agua como para sedimentos.

Tabla 3.5.- Parámetros a evaluar, técnicas de preservación y metodología a emplear.

Parámetro	Técnica de preservación	Normativa
Nitrógeno de nitratos	Refrigerar a 4 ± 2 °C, adicionar 2 ml de ácido sulfúrico/L (H_2SO_4)	NMX-AA-079-SCFI-2001
Nitrógeno de nitritos	Refrigerar de 2 a 6°C	NMX-AA-099-SCFI-2006
Nitrógeno amoniacal	Adicionar H_2SO_4 a pH < 2 refrigerar de 4 ± 2 °C a 10 °C, 4 ml para 1 litro de muestra.	NMX-AA-026-SCFI-2010
Sedimentos (sólidos suspendidos totales)	---	NMX-AA-034-SCFI-2015

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la normativa.

Los análisis de calidad del agua se realizaron con el apoyo del laboratorio del Departamento de Calidad del Agua, acreditado y aprobado del OOAPAS Morelia.

Mientras que los análisis de sedimentos, se realizaron en el laboratorio también acreditado, ÚKUA LAB de la ciudad de Morelia. Dentro de los cuales, todos los equipos se encuentran calibrados y con sus mantenimientos vigentes.

3.11 Calibración y validación del modelo

Para la etapa de calibración y validación del modelo, es necesario realizar el ajuste de algunos parámetros para obtener valores similares entre los observados y modelados, con el objetivo de evaluar la coincidencia entre estos. Vargas y Monroy (2011) señalan que “en la modelación hidrológica, es elemental conocer el grado de precisión entre los resultados de la simulación y los medidos en la realidad. El proceso de calibración permite ajustar los resultados simulados en relación con los medidos en el lugar, esto se logra modificando los valores de los parámetros que tienen mayor influencia en las variables respuesta; principalmente, con referencia al caudal. Seguida de esta etapa, está la fase de validación, la cual permite verificar la proximidad de la modelación a la realidad, con otros datos de entrada, correspondientes a un periodo de tiempo diferente.

La calibración, siendo el primer paso de ajuste de parámetros, puede ser, de acuerdo con Vélez Upegui (2013): “calibración manual o calibración automática. En la calibración manual, habitualmente se implementan métodos de ensayo y error con los parámetros a ajustar; de este modo, permite obtener resultados confiables en un corto plazo. Para la calibración automática, se emplea un software compatible con el modelo, en el que se modifican los valores de cada uno de los parámetros, dentro de rangos asignados por el analista experto en los procesos simulados; estos rangos deben ser valores razonables y consistentes con la zona de estudio”.

Revisando la disponibilidad de los medios para realizar la calibración, esta se realizó a prueba y error (manual). Se llevó a cabo con los caudales diarios de la estación hidrométrica 12347 de Santiago Undameo, la cual se encuentra a régimen natural. Se seleccionó un periodo de 21 años, del 01 de enero de 1958 al 01 de diciembre de 1980 para la simulación. Estableciendo los años 1958 a 1970 (3 años) como periodo de calentamiento, lo cual permite a los parámetros alcanzar el equilibrio. Para la calibración se define el periodo de 01 de enero de

1961 al 01 de diciembre de 1970 y para la validación desde el 01 de enero de 1971 al 01 de diciembre de 1980.

Pereira *et al.* (2016), mencionan que existen parámetros de mayor sensibilidad: “En una calibración manual, donde la escorrentía superficial es el objeto de estudio, los parámetros con mayor sensibilidad son: el número de curva (CN2), el factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO), la capacidad de agua disponible (SOL_AWC), la profundidad de la capa del suelo (SOL_Z), la conductividad hidráulica del suelo (SOL_K) y el coeficiente de recesión de escorrentía base (ALPHA_BF)” en Villate Corredor *et al.* (2023).

Bajo este contexto y lo señalado por Correa-González *et al.*, (2023) de que “las principales características del suelo que tienen efecto en la escorrentía son: la conductividad hidráulica, el grupo hidrogeológico y la profundidad del suelo”, los tipos de suelo y los valores calibrados para cada una de las características mencionadas por Pereira y (Correa-González *et al.*, 2023) se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6.- Parámetros calibrados del modelo para tipo de suelo. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de suelo	Símbolo	SOL_K* (mm/hr)	Grupo hidrogeológico	SOL_Z* (mm)
Acrisol ortico	AO	0.635	D	500
Acrisol húmico	AH	3.81	B	500
Andosol	To	3.81	B	500
Phaeozem	HH	0.635	D	500
Luvisol	LV	3.81	B	500
Leptosol	LP	7.62	A	500
Vertisol pélico	VP	1.27	C	500

*SOL_Z: Profundidad del suelo; SOL_K: Conductividad hidráulica. Fuente: elaboración propia.

Los valores calibrados, se propusieron en función del tipo de suelo de acuerdo con la tabla de criterios de clasificación del grupo hidrogeológico que se encuentra en SWAT Input/Output File Documentation Version 2012. Estos criterios se basan

en la teoría de que la permeabilidad mínima se produce dentro de los 50 cm superiores.

Se ejecutaron varias simulaciones moviendo los parámetros de la Tabla 3.6 y los mencionados por Pereira *et al.* (2016), dichos parámetros se fueron cambiando uno por uno hasta obtener la calibración final.

En el proceso de calibración, generalmente, la variable de la escorrentía es la más utilizada (Villate Corredor *et al.*, 2023) esta se predice por separado en cada HRU y, luego, a través del método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) se concentra para obtener el escurrimiento total de la cuenca (USDA, 1972). Este método es una función que considera el uso de la tierra, la permeabilidad del suelo y las condiciones antecedentes del agua de suelo. A medida que esta cambia, todos los componentes del ciclo hidrológico también lo hacen.

El número de curva fue uno de los primeros parámetros calibrados en el modelo. El modelo calcula el número de curva en función de la evapotranspiración de las plantas, esta función se añadió a causa de que el método de humedad pronosticaba una escorrentía excesiva en suelos poco profundos. Al calcular el valor de CN en función de la evapotranspiración de las plantas, este valor es menos dependiente del almacenamiento del suelo y más dependiente del clima antecedente. Bajo este contexto, el modelo asume que un 50% de la demanda de evapotranspiración, se encuentra en los primeros 10 mm de la tierra (Neitsch *et al.*, 2011).

Para este estudio se consideró la CN2; humedad promedio, puesto que la condición de humedad I (CNI) representa el valor más bajo de la curva numérica que se puede suponer en condiciones secas (punto de marchitez). De tal manera que es similar a hacer la corrección del valor de N, en caso de una lluvia previa, para considerar condiciones iniciales de humedad de acuerdo con valores de lluvia acumulada 5 días antes de la fecha que nosotros estamos evaluando. Así mismo se considera que la modelación es superficial, el flujo subterráneo no se toma tanto en cuenta porque no es muy representativo como lo es la lluvia y el escurrimiento superficial, que son los principales ingresos de agua del vaso receptor. Así mismo la CN2, se asume apropiada para pendientes del 5%. Para

superficies impermeables y aguas superficiales se ha definido un CN=100 (Neitsch *et al.*, 2011).

Los números de curva tabulados para la condición de humedad II asume pendientes del 5%. El modelo marca como límites CN2 mínimo = 30 y CN2máximo =95, se realizaron varios ajustes entre estos rangos, sin embargo, tomando en cuenta que la subcuenca cuenta con zonas donde la pendiente varía entre 5% y 15%, y otras menores a 5% y que para aguas superficiales el CN2 definido = 100, el valor de simulación aceptable para la calibración y ajuste del modelo fue de CN2=95.

Para evaluar el desempeño del modelo SWAT, se aplicaron tres indicadores: Coeficiente de Determinación o relación (R^2), Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y Sesgo Porcentual (PBIAS) los cuales son ampliamente utilizados en la modelación hidrológica (Panda *et al.*, 2021); y se calculan a partir de las ecuaciones 8, 9 y 10. Cada una de estas compara diferentes características entre la serie histórica y la serie modelada.

- El coeficiente de determinación (R^2) indica el grado de colinealidad entre los valores medidos y los simulados. Es decir, describe la proporción de la varianza en los datos medidos expresada por el modelo. Este coeficiente, va de 0 a 1, los valores más elevados revelan una menor varianza del error y, los valores por arriba de 0.5 se consideran aceptables (Santhi *et al.*, 2001, Van Liew *et al.*, 2003).

Se representa con la siguiente ecuación:

$$R^2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m) - P_i - P_m}}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 (P_i - P_m)^2} \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

O_i es el valor observado para el evento i
 P_i es el valor modelado para el evento i
 n es el número de eventos

O_m es la media observada

Tabla 3.7.- Interpretación de resultados del coeficiente de determinación.

Valores de correlación			Correlación de los valores
Si	< 0	=	Nula
Si	0.5	=	Aceptable
Si	≠ 1	=	Perfecta

Fuente: Elaboración propia a partir de Santhi et al., 2001 y Van Liew et al., 2003.

- Índice de eficiencia de Nash-Stucliffe (NSE) es un estadístico que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") comparada con la varianza de los datos medidos ("información") (Nash y Sutcliffe, 1970). Este índice, determina qué tan bien se ajusta la gráfica de datos observados contra los simulados a la línea 1:1. Es decir, mide el ajuste entre el valor simulado y el valor medido. Tiene como base la suma lineal cuya pendiente es igual a 1. El índice de eficiencia de Nash-Stucliffe en gran medida, ha sido utilizado para evaluar el rendimiento y/o eficiencia de los modelos hidrológicos (Parajuli et al., 2009). Mediante la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

O_i es el valor observado para el evento i

P_i es el valor modelado para el evento i

n es el número de eventos

O_m es la media observada

Los valores entre 0 y 1 normalmente consideran niveles de rendimiento aceptables (Nash y Sutcliffe, 1970), si el valor medido es el mismo que el

estimado, el índice de eficiencia de Nash-Stucliffe es igual a 1 (Parajuli *et al.*, 2009), mientras que los valores <0 indican un rendimiento inaceptable. Si el valor es negativo, las estimaciones son muy deficientes (Nash y Sutcliffe, 1970).

- El sesgo porcentual (PBIAS) determina la tendencia promedio que tienen los datos simulados a ser superiores o inferiores a los observados (Gupta *et al.*, 1999).

La ecuación es la siguiente:

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mod})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} * (100) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

O_i es el valor observado para el evento i
 P_i es el valor modelado para el evento i
 n es el número de eventos

El valor ideal de PBIAS es 0; los valores de baja magnitud revelan una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo, mientras que los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación del mismo (Gupta *et al.*, 1999).

En la modelación hidrológica algunos de los parámetros estadísticos se manejan dentro de ciertos rangos de valores, con el fin de predecir si el ajuste del modelo es aceptable o no. A continuación se muestran los rangos de valores en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8.- Clasificación general de los resultados de los métodos estadísticos del ajuste del modelo. (D.N. Moriasi *et al.*, 2007; Deng *et al.*, 2020).

Ajuste	NSE	PBIAS	R ²
Muy buena	0.75 – 1	< ±10	> 0.75
Buena	0.65 – 0.75	±10 - ± 15	0.65 – 0.75
Satisfactoria	0.50 – 0.65	± 15 - ± 25	0.50 – 0.65
Insatisfactoria	< 0.50	≥ ±25	< 0.50

Fuente: elaboración propia a partir de D.N. Moriasi *et al.*, 2007; Deng *et al.*, 2020.

Posterior a realizar la calibración y validación de nuestro modelo con resultados fiables. Es posible generar nuestros escenarios para la simulación del transporte de nitrógeno. Para lo cual se trabajó con dos escenarios: 1) sin aplicación de fertilizantes y 2) con aplicación de fertilizantes.

Para el primer escenario, se llevó a cabo el registro de los cultivos (maíz, arándano, fresa y aguacate principalmente) en la subcuenca en el apartado “Horarios de Gestión” con el que cuenta SWAT. Se realizó la simulación únicamente con este registro sin la aplicación de los fertilizantes.

Para el segundo escenario, con apoyo de la información previamente recabada en campo de los fertilizantes utilizados para dichos cultivos, se registraron como operaciones los nombres de los fertilizantes, la cantidad aplicada y la forma de aplicación (ya que SWAT permite al usuario hacerlo). Bajo este esquema, se tomaron en cuenta prácticas agrícolas similares:

- Se consideró que la agricultura en la zona de estudio es de temporal.
- El inicio de las prácticas agrícolas se considera en la temporada primavera-verano. Durante los primeros meses de lluvia.
- La aplicación de fertilizante en su mayoría se consideró por fertirriego (con base en la información recabada en campo por los agricultores).
- De acuerdo con la misma información obtenida de primera mano, la propuesta de aplicación de fertilizante es de 200 a 300 kg/ha. Con un contenido en su mayoría de nitrógeno en forma de amonio.

Una vez ingresada esta información, se corre el modelo para simular el escenario con la aplicación de fertilizante.

Cabe mencionar que, para el registro de cultivos y fertilizantes, SWAT cuenta con una base de datos ya establecida. En el caso del aguacate, al ser un cultivo que no se da en Estados Unidos, fue necesario ingresarlo de manera manual.

Para los fertilizantes, estos se fueron seleccionando también de la base de datos, algunos con el nombre de las formulas y otros por su nombre común.

IV. Resultados y Discusión

En este apartado se presentan y discuten los resultados obtenidos durante este trabajo de tesis.

- De las pruebas de homogeneidad a las estaciones climatológicas

Se trabajaron 15 estaciones climatológicas, a las cuales se aplicó un filtro con los siguientes criterios para seleccionar las que cumplieran con ellos: cercanía a la zona de estudio (estar más cerca), tener un menor porcentaje de vacíos y tener más de 25 años efectivos de datos y de servicio. En la Tabla 4.1 se muestran las estaciones evaluadas, con la información anteriormente mencionada.

Tabla 4.1.- Evaluación de estaciones.

Estación	Código	Años de servicio	Años efectivos	Año inicial	Año final	% de vacíos
Acuitzio del Canje	16001	54	38.6	1961	2015	29%
Cointzio	16022	66	60	1940	2006	9%
Jesús del Monte	16055	80	76.6	1935	2015	.4%
Morelia	16080	29	27.4	1986	2015	6%
Morelia	16081	68	67.1	1947	2015	1%
San Miguel del Monte	16114	52	40.4	1963	2015	22%
Santiago Undameo	16120	54	52.4	1953	2007	3%
Pátzcuaro	16087	46	39.8	1969	2015	13%
Capula	16247	26	17.8	1981	2007	32%
Santa Fe de la laguna	16118	51	46.1	1963	2014	10%
Etucuario	16049	44	41	1944	1988	7%
Villa Madero	16139	41	40.6	1943	1984	1%
Villa Madero (CFE)	16140	33	30.6	1961	1994	7%
Santa Isabel de Ajuno	16257	6	4.5	1982	1988	25%
San Diego Curupateo	16109	93	90.2	1922	2015	3%

Fuente: Elaboración propia.

En su mayoría cumplen con los años de servicio y años efectivos >25 años, a excepción de las estaciones 16247 y la 16257 de Capula y Santa Isabel de Ajuno respectivamente. Las cuales se descartan para pasar al siguiente filtro, que es la evaluación de las pruebas de homogeneidad e independencia.

En la Tabla 4.2, se muestran los resultados de las estaciones que cumplen con las pruebas de independencia y homogeneidad.

Tabla 4.2.- Evaluación de estaciones: pruebas de homogeneidad e independencia.

Estación	Código	Secuencias	Homogeneidad				Independencia	
			Helmert	Tstudent	Cramer	Curva Masa Doble	Wald wolfowitz	Límites de Anderson
Acuitzio del Canje	16001	✗	✗	✗	✗	✓	✓	I
Cointzio	16022	✗	✓	✗	✗	✓	✓	I
Jesús del Monte	16055	✓	✓	✓	✗	✓	✗	I
Morelia	16080	✓	✓	✗	✗	✓	✗	I
Morelia	16081	✓	✗	✗	✗	✓	✗	I
San Miguel del Monte	16114	✓	✓	✓	✓	✓	✓	I
Santiago Undameo	16120	✓	✓	✗	✗	✓	✓	I
Pátzcuaro	16087	✓	✓	✗	✗	✓	✓	I
Santa Fe de la laguna	16118	✗	✗	✗	✗	✓	✓	I
Etúcuaro	16049	✓	✓	✗	✗	✓	✗	D
Villa Madero	16139	✓	✓	✓	✓	✓	✓	D
Villa Madero (CFE)	16140	✓	✓	✗	✗	✓	✓	I
San Diego Curupateo	16109	✓	✗	✓	✓	✓	✗	I

✓ = Homogénea, ✗ = No homogénea, I = Independiente, D = Dependiente.

Fuente: elaboración propia.

Respecto a las pruebas de estas estaciones podemos observar que únicamente 9 de las 13 estaciones que se evaluaron cumplen con las pruebas de homogeneidad. Y por ende las estaciones 16049 de Etucuar, 16118 de Santa Fe de la Laguna, 16081 de Morelia y 16001 de Acuitzio del Canje, que no cumplieron las pruebas, se descartaron para continuar con la calibración.

- Estaciones climatológicas.

Realizadas las pruebas de homogeneidad, se realizó un mapa con la ubicación de cada una de ellas, Figura 4.1, para posteriormente realizar los polígonos de Thiesen Figura 4.2, los cuales nos ayudan a visualizar cuales de estas estaciones tienen mayor influencia sobre la subcuenca.

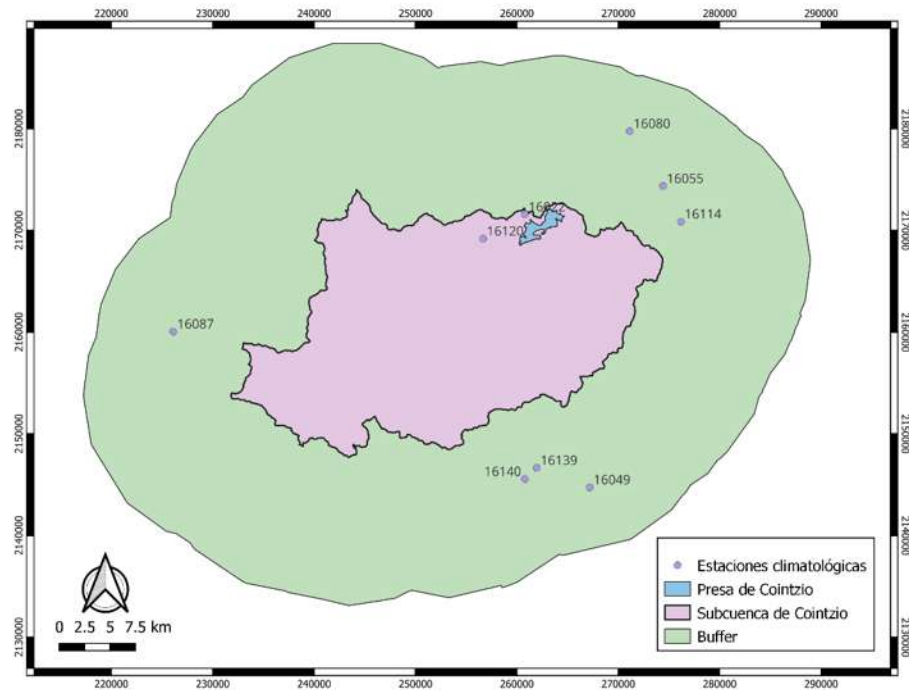


Figura 4.1.- Estaciones climatológicas que cumplen con las pruebas de homogeneidad y su ubicación. Fuente: Elaboración propia en QGIS.

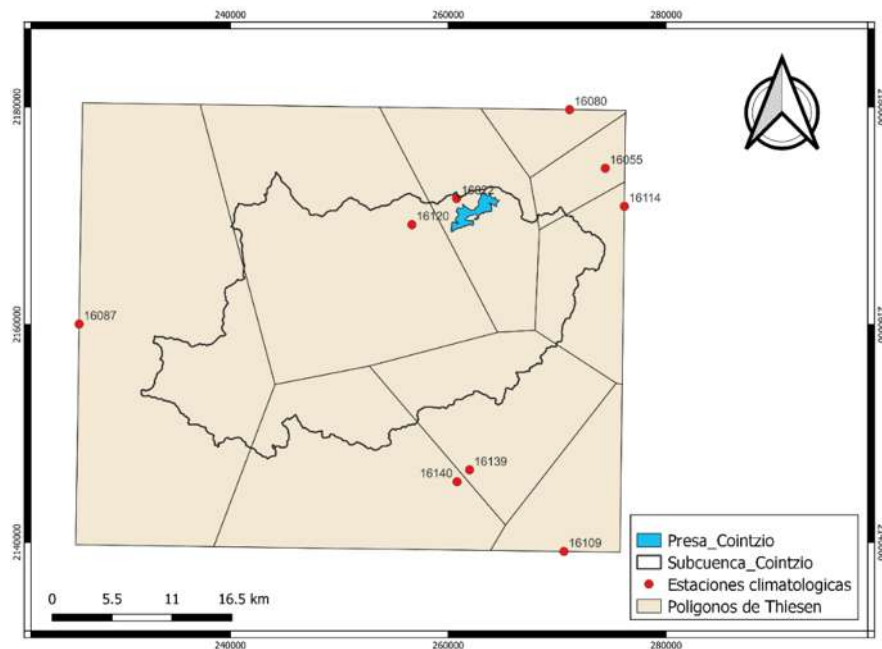


Figura 4.2.- Polígonos de Thiesen y estaciones climatológicas que cumplen con las pruebas de homogeneidad. Fuente: elaboración propia.

Esta Figura muestra que de las 9 las estaciones que cumplieron con las pruebas, 7 son las que tienen mayor influencia sobre la subcuenca, que son: 16139 de Villa Madero, 16140 de Villa Madero, 16087 de Pátzcuaro, 16120 de Santiago Undameo, 16022 de Cointzio, 16055 de Jesús del Monte y 16114 de San Miguel del Monte. Mientras que la estación 16080 de Morelia se utilizó para llenar los vacíos de las estaciones influyentes a la subcuenca.

- Del análisis de agua en el muestreo de la Presa de Cointzio

En la Tabla 4.3, se presentan los resultados del análisis de agua para la determinación de la concentración de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal en la Presa de Cointzio a las profundidades de 3 y 5m y en el anexo A, los análisis completos. De acuerdo con los valores máximos permisibles que establece la NOM-127-SSA1-2021, los valores de nitritos y nitratos obtenidos se encuentran dentro del límite permisible, mientras que la presencia del nitrógeno en forma amoniacal no fue detectable.

Tabla 4.3.- Resultados de la determinación de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal.

No de muestra	Lugar de muestreo	Coordenadas	Profundidad	Nitratos (mg/L)	Nitritos (mg/L)	Nitrógeno amoniacal (mg/L)
1	Aposento alto*	19.624601, -101.248227	3m	0.37	0.1	No detectable
2	Aposento alto*	19.624601, -101.248227	5m	0.28	0.1	No detectable
3	Uruapilla	19.615767, -101.273479	3m	0.24	0.1	No detectable
3	Uruapilla	19.615767, -101.273479	5m	0.23	0.1	No detectable
4	Santiago Undameo	19.603210, -101.277042	3m	0.14	0.1	No detectable
5	Canal Santiago Undameo	19.592361, -101.289262	Superficial	0.32	0.2	No detectable

**Referencia cercanía al sitio de muestreo. Fuente: elaboración propia con los datos obtenidos en el análisis de agua de la presa.*

De acuerdo con la NMX-AA-099-SCFI-2006 la presencia del nitrito en el agua, puede darse como resultado de la descomposición biológica de material proteico. En aguas superficiales crudas, su presencia indica contaminación. La concentración de nitrógeno de nitritos raramente es superior a 1 mg/L, incluso en efluentes de plantas de tratamiento municipales. Normalmente, su concentración en aguas superficiales y subterráneas es más baja de 0.1 mg/L.

Debido a su alta solubilidad en el agua, el nitrato, se presenta fácilmente en los lixiviados que llegan a las fuentes de agua. La capacidad de estos para transportarse e incorporarse a ríos, lagos, embalses, pozos y acuíferos, tiene implicaciones al medio ambiente y a la salud, lo cual convierte la contaminación por nitratos en una cuestión alarmante. De manera distinta a los nitratos, otros contaminantes como el amoníaco y los fosfatos no se desplazan con la misma facilidad. El nitrógeno amoniacal, por acción bacteriana se oxida convirtiéndose en nitritos y no se volatiliza, pero se oxida rápidamente a nitrato.

- De los sedimentos

La Tabla 4.4 muestra los resultados del análisis de nitrógeno amoniacal en sedimentos, principalmente en dos puntos de muestreo donde se tienen descargas de aguas residuales puntuales, las cuales se aprecian en la Figura 4.3 a) como referencia cercanía al sitio de muestreo “Aposento Alto” y b) Uruapilla. Se muestran los análisis completos en el anexo B.

Tabla 4.4 Resultados de la determinación de nitrógeno amoniacal en sedimentos.

No de muestra	Lugar de muestreo	Coordenadas	Profundidad	Nitrógeno amoniacal (mg/kg)
1	Aposento alto	19.625810, -101.247695	superficial	41.50
2	Uruapilla	19.615599, -101.269754	superficial	27.75

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del análisis de sedimentos.

La apariencia y la textura de los sólidos en el sitio de muestreo de Uruapilla, es más lodosa y de un color café calor. Mientras que los sólidos del otro sitio de muestreo, son más oscuros y granulados. Cerca de este sitio, se encuentra creciendo lirio acuático.



Figura 4.3.- a) Sitio de muestreo de sedimentos. Fuente: elaboración propia. b). Descarga residual que desemboca a la Presa. Uruapilla. Fuente: Elaboración propia.

Las algas (principalmente las cianobacterias) asimilan e inmovilizan el amonio; al morir estas, se descomponen sus restos en el fondo de los cuerpos de agua, y el amonio se traslada a los sedimentos. El material celular nitrogenado es

amonificado, transfiriendo este amonio sumado a los sedimentos, acumulándose bajo condiciones anóxicas y puede oxidarse a nitratos en ambientes oxigenados (Van Rijn, 1996).

Por otro lado, se ha observado que la nitrificación-desnitrificación puede ocurrir de manera muy rápida, lo que podría indicar que en el interior de agregados de partículas orgánicas se genere un proceso de anaerobiosis, dando paso a la desnitrificación, aun cuando sean aerobias las condiciones externas. Por tal razón, es que pueden presentarse al mismo tiempo la nitrificación y la desnitrificación en el sedimento (Pérez, 2008).

- De la calibración del modelo hidrológico

Se obtuvieron 37 unidades de respuesta hidrológica, las cuales se observan en la Figura 4.4, mismas que representan áreas de tierra que se supone responden de manera similar a los factores climáticos y que resumen la respuesta de todas las parcelas de la subcuenca que tienen el mismo suelo, uso de suelo y pendiente, esto para que el modelo se ejecute más rápido.

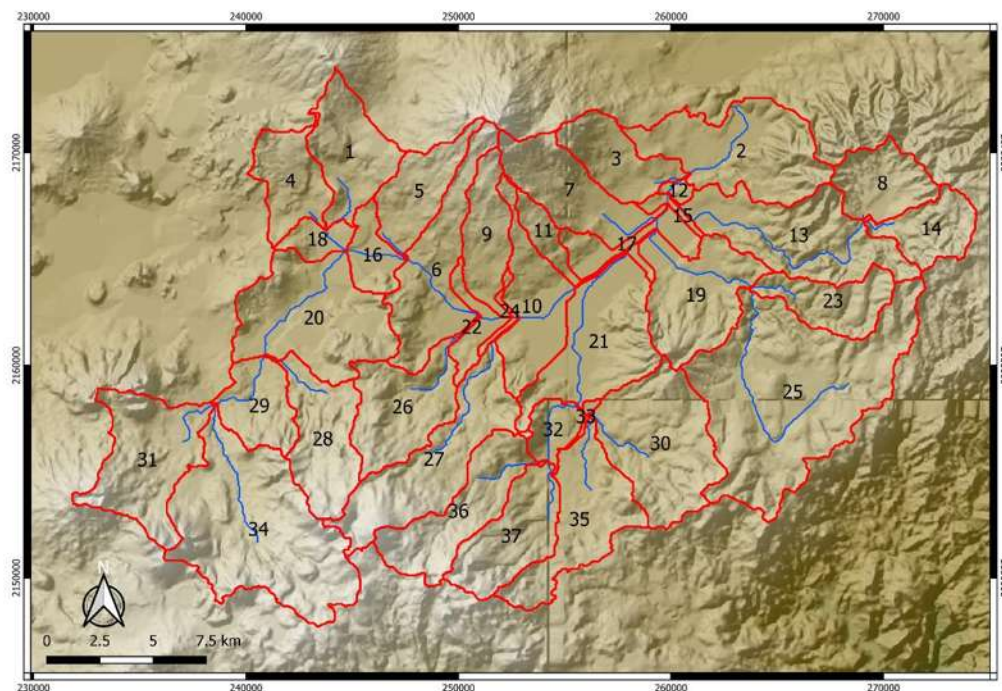


Figura 4.4.- Unidades de respuesta hidrológica (HRU). Fuente: Elaboración propia con datos procesados en SWAT y QGIS.

En la Figura 4.5, se muestran las series de datos históricos y modelados de la calibración para la estación 12347 de Santiago Undameo, observando que el modelo calibrado de manera satisfactoria simula los caudales en la subcuenca. La modelación se llevó a cabo con un periodo de 9 años (1961 a 1970). Y en la Tabla 5.5, se reportan los resultados de la calibración del modelo de acuerdo con los métodos estadísticos de ajuste del modelo propuestos por (D.N. Moriasi *et al.*, 2007; Deng *et al.*, 2020).

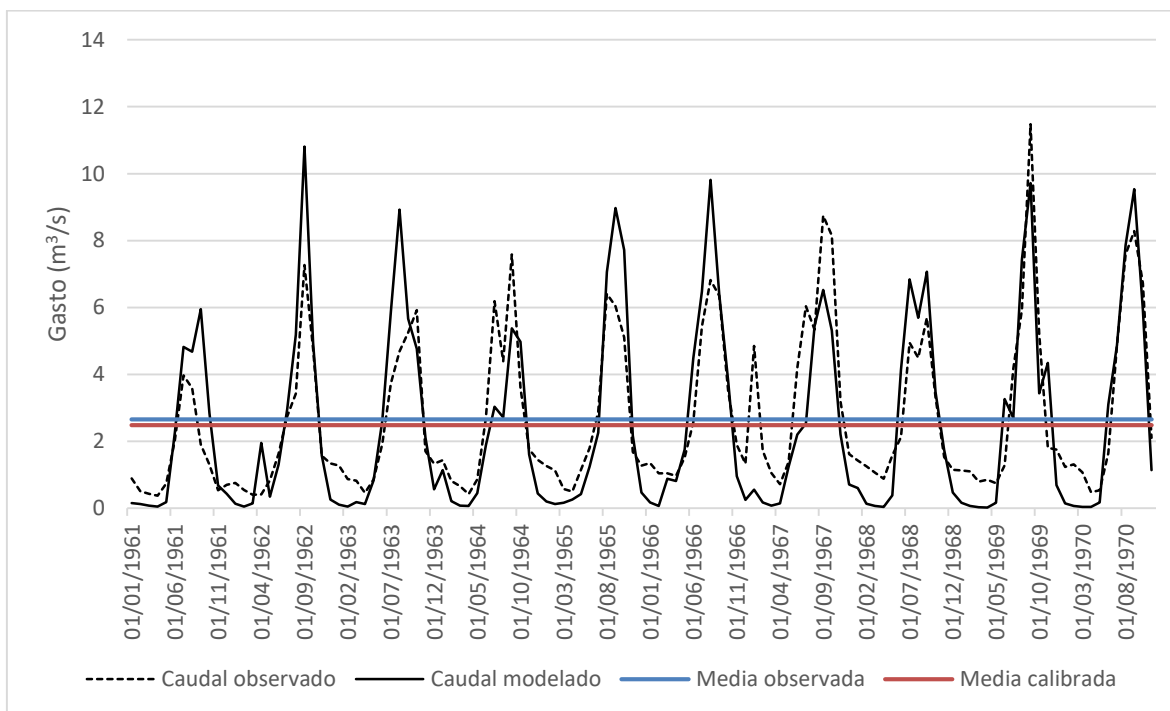


Figura 4.5. Serie de gastos históricos y modelados (calibración) de la estación hidrométrica Santiago Undameo en SWAT de 1961-1970.

Tabla 4.5.- Resultados de la calibración del modelo. Índices de eficiencia y rendimiento.

PBIAS	Clasificación	R ²	Clasificación	NSE	Clasificación
6.38	Muy buena	0.86	Muy buena	0.63	Satisfactoria

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la calibración.

Considerando el proceso de calibración para el periodo de 1961 a 1970, se obtuvo un coeficiente de determinación con ajuste “muy bueno” entre los caudales observados y los modelados por SWAT; en términos del índice de NASH se clasifica como “satisfactorio”, generando niveles aceptables de rendimiento. Mientras que el PBIAS mostró un desempeño “muy bueno”. Los valores de la

precipitación media anual modelada y la media observada fueron de 2.48 m³/s y 2.65 m³/s respectivamente, obtenidos a partir del promedio de las lluvias registradas en los doce meses del año para todo el ciclo, lo mismo para la media anual observada y modelada de la validación. Con estos resultados, se logró realizar un buen ajuste por lo que la calibración se toma como buena.

Las series de caudales simulados y observados para la validación se muestran en la Figura 4.6, misma que nos permite observar cierta similitud entre ellos. Y los resultados de acuerdo con los índices de eficiencia y rendimiento del modelo, se indican en la Tabla 4.6.

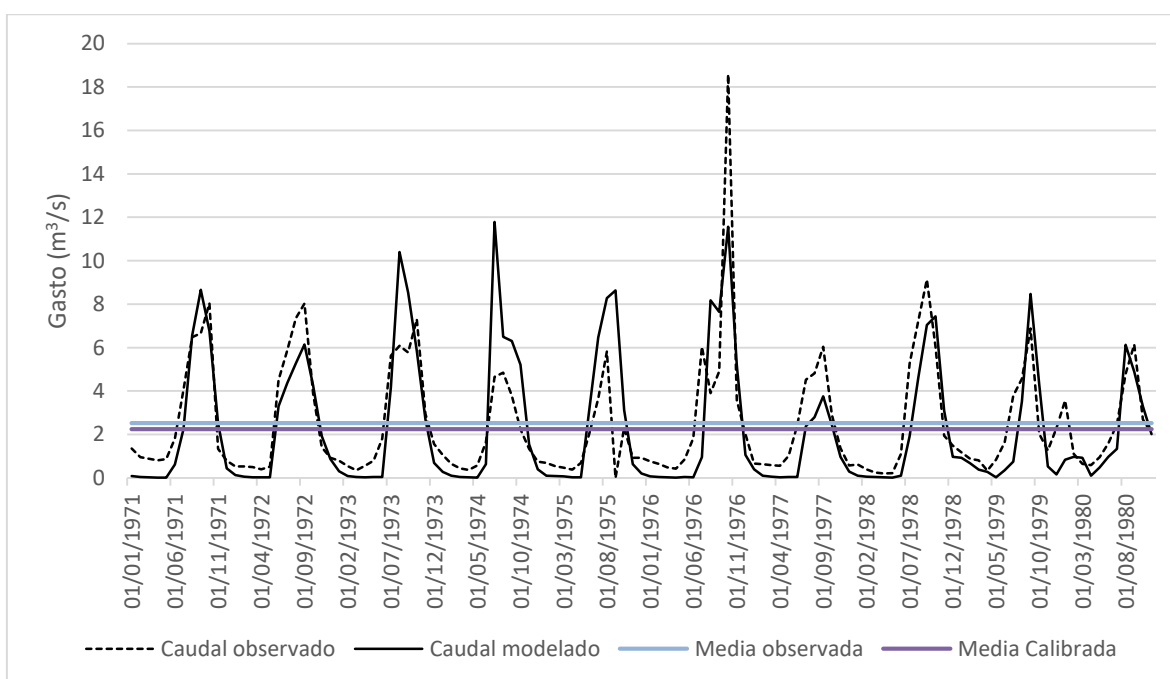


Figura 4.6.- Serie de gastos históricos y modelados (validación) de la estación hidrométrica Santiago Undameo en SWAT de 1971-1980.

Tabla 4.6.- Resultados de la validación del modelo. Índices de eficiencia y rendimiento.

PBIAS	Clasificación	R ²	Clasificación	NSE	Clasificación
11.21	Buena	0.78	Muy buena	0.50	Satisfactoria

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la validación.

Al igual que la calibración, el proceso de validación nos indica que se logró un buen ajuste, esta para el periodo de 1971 a 1980, donde el coeficiente de determinación resulto con un ajuste “muy bueno” entre los caudales observados y los modelados por SWAT; y el índice de NASH se clasifica como “satisfactorio”, generando niveles aceptables de rendimiento y en términos de PBIAS el resultado se clasifica como “bueno”. El valor de la media modelada obtenida fue de 2.24 m³/s y de la media observada de 2.52 m³/s.

Se observó una tendencia similar en los datos históricos y los modelados, tanto en la calibración como en la validación. Dados estos resultados, se puede señalar que el modelo es fiable para simular el escurrimiento superficial y de la misma manera adecuado para realizar la simulación del transporte de nitrógeno.

- Del nitrógeno

Los escenarios evaluados permiten visualizar una representación sobre la presencia del nitrógeno por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados en los cultivos de la subcuenca.

En la Figura 4.7, se muestra el mapa que arroja el modelo como resultado del escenario 1 (sin aplicación de fertilizantes) en él se puede observar la distribución de nitrógeno total en la subcuenca de la Presa de Cointzio, de mayor a menor concentración (kg/ha) que va desde una concentración mínima hasta los 4.85 kg/ha. Mismo que puede ser aportado por el ciclo natural del mismo, las prácticas agrícolas y actividad humana.

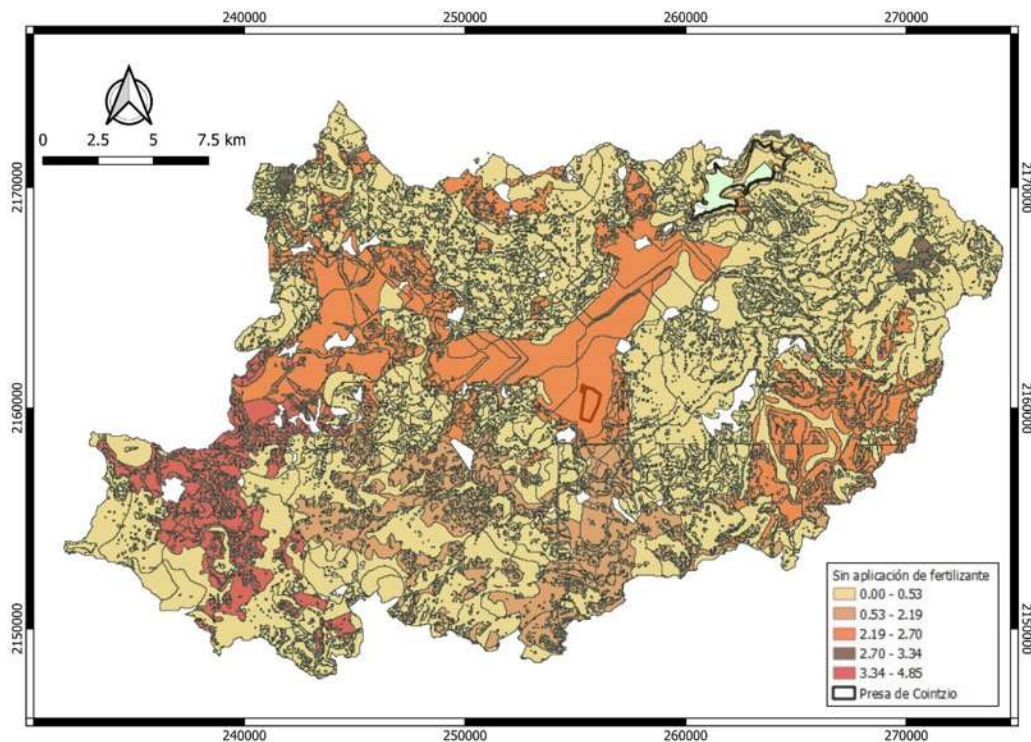


Figura 4.7.- Mapa de la distribución de nitrógeno en la subcuenca de la Presa de Cointzio. Escenario 1. Sin aplicación de fertilizantes. Fuente: elaboración propia con información procesada en SWAT y QGIS.

Mientras que en la Figura 4.8 se muestra el resultado del escenario 2 (con aplicación de fertilizante) en la subcuenca de la presa. En el cual se puede apreciar un claro aumento en los niveles de concentración del nitrógeno total a lo largo de la subcuenca, que, a diferencia del escenario sin la aplicación del fertilizante, se lograron alcanzar concentraciones de hasta los 246 kg/ha. Esto se relaciona al uso excesivo de fertilizantes para los cultivos, el cambio y uso de suelo y un mayor crecimiento demográfico.

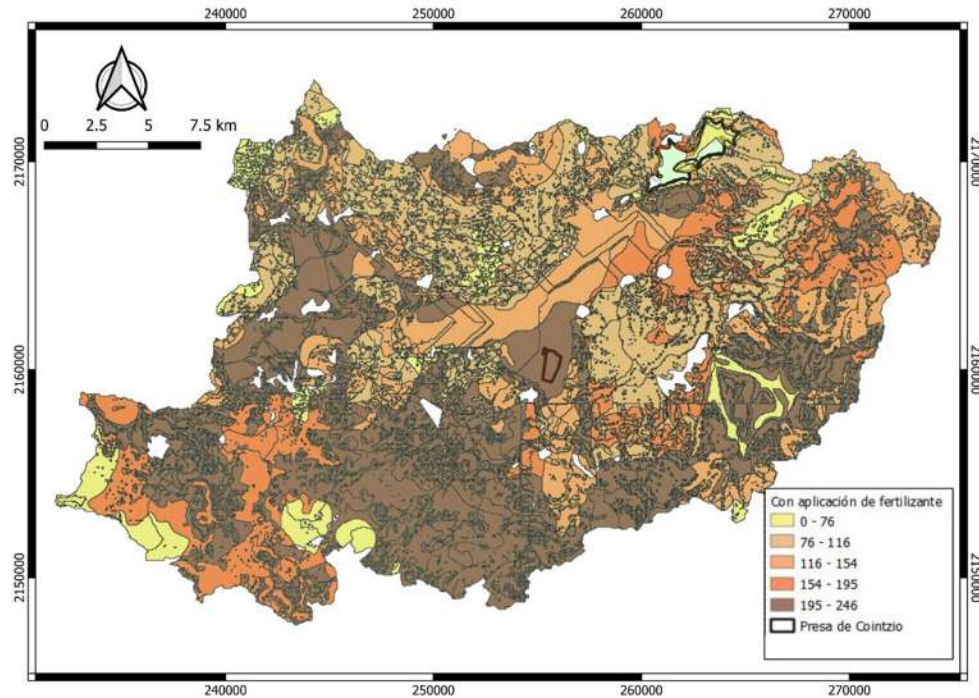


Figura 4.8.- Mapa de la distribución de nitrógeno en la subcuenca de la Presa de Cointzio. Escenario 2. Con aplicación de fertilizantes. Fuente: elaboración propia con información procesada en SWAT y QGIS.

- Del transporte de nitrógeno

Para este análisis se tomó como base el nitrógeno amoniacal, ya que es una de las principales formas de nitrógeno que nos interesa evaluar por su impacto en el proceso de potabilización del agua para uso y consumo humano.

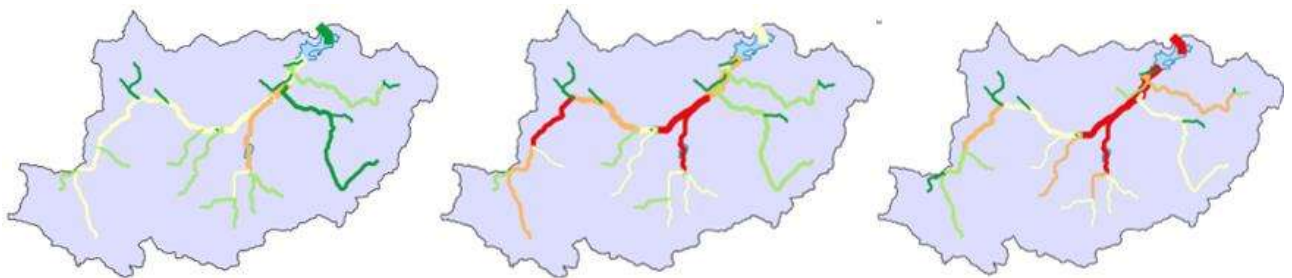


Figura 4.9.- Transporte de nitrógeno amoniacal en las principales corrientes de la subcuenca de la Presa de Cointzio durante la temporada de lluvia. Fuente: elaboración propia con información procesada en SWAT y QGIS.

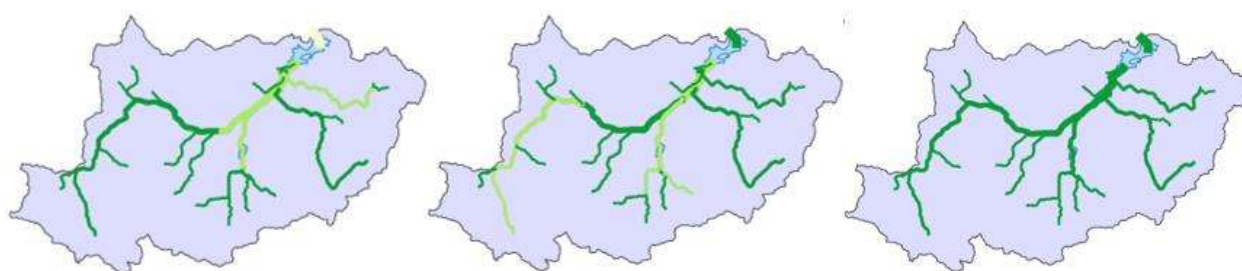


Figura 4.10.- Transporte de nitrógeno amoniacal en las principales corrientes de la subcuenca de la Presa de Cointzio en temporada de estiaje. Fuente: elaboración propia con información procesada en SWAT y QGIS.

En las Figuras 4.9 y 4.10 se representan las principales corrientes dentro de la subcuenca de la presa de Cointzio. Y en ellas se observa el transporte del nitrógeno amoniacal. La primera figura hace referencia a la temporada de lluvia, donde se observa en tonos rojos, naranjas y amarillos la presencia en mayor concentración del nitrógeno amoniacal. También se ve refleja que donde se concentra una mayor presencia de este compuesto, es en la unión de los arroyos Tirio y Tiripetio. A diferencia de la Figura 4.10, que representa las corrientes en temporada de estiaje, donde las concentraciones de nitrógeno amoniacal son más bajas y se representan en color verde. Esto se debe a los escurrimientos que provoca la lluvia, pues los nutrientes son arrastrados por el agua.

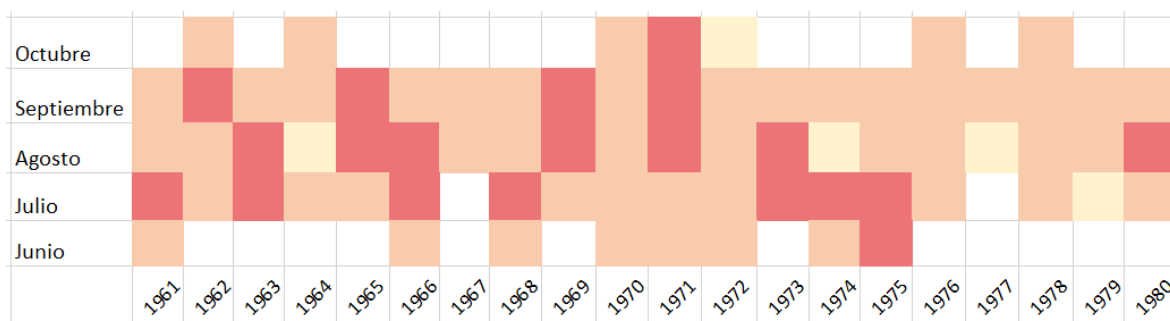


Figura 4.11.- Meses donde se tiene una mayor presencia de nitrógeno amoniacal la subcuenca de la Presa de Cointzio. Fuente: elaboración propia con información procesada en SWAT y QGIS.

En la Figura 4.11 se muestran los meses asociados a la Figura 4.9, pues representa la temporada de lluvias. Es preciso mencionar, que como se tomaron en cuenta

los cultivos de temporal, y que son principalmente de la temporada primavera verano, la siembra puede comenzar en los meses de marzo, abril y mayo. Durante esta temporada que es el inicio de la temporada de lluvias, se realizan las primeras fertilizaciones para que sean aprovechadas por la planta, ya que, al contar con la presencia de una lluvia ligera, puede ayudar a que los nutrientes penetren en el suelo y sean absorbidos por las raíces de las plantas. Mientras que, por el contrario, si llueve en exceso o cuando se fertiliza y llueve después de esta acción, los nutrientes se lavan y pueden perderse si no se han absorbido todavía.

Estos resultados, los resultados del muestreo y los datos reportados en estudios anteriores (OOAPAS y Camacho, 2023) son información precisa que nos ayuda a poder fundamentar y validar los datos de la modelación comparándolos entre sí. En la Figura 4.12 se presentan dichos resultados, donde se aprecia de manera clara la presencia y el aumento del nitrógeno amoniacal, principalmente en la temporada de lluvias. Superando a la salida de la presa el máximo permisible que establece la NOM-127-SSA1-2021, triplicando este valor en algunos meses, lo cual puede afectar al proceso de potabilización del agua, ya que este requiere de más insumos para su eficiente remoción.

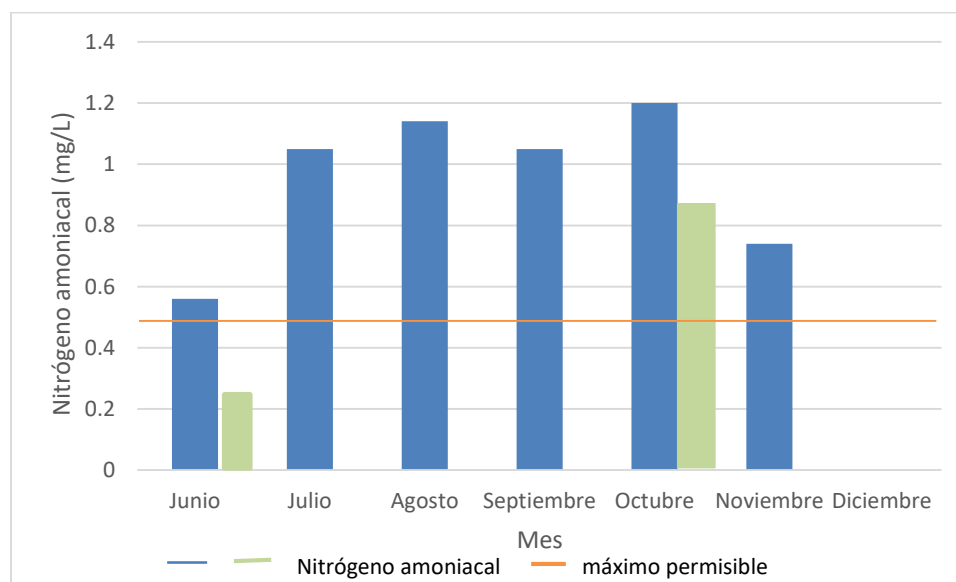


Figura 4.12.- Comparación de la concentración de nitrógeno amoniacal con datos proporcionados OOAPAS y estudios anteriores. Elaboración propia.

En términos generales podemos decir que las concentraciones de las diferentes formas de nitrógeno varían tanto en los cuerpos de agua como en los sedimentos,

esto puede ser de acuerdo con las condiciones ambientales y las vías de ingreso al sistema, pues el ser humano ha impactado de manera significativa e importante en el ciclo del nitrógeno.

De acuerdo con Nixon (1995) existen tres principales factores que inciden en la problemática de los nutrientes que se transportan a un cuerpo de agua: la emisión, la movilización y los efectos. La emisión representa a la generación de los nutrientes en las fuentes: puntuales y difusas; las primeras están bien definidas y las segundas son aquellos sitios de emisión que no se pueden identificar fácilmente (Dunnivant y Anders, 2006).

En cuanto a la movilización, esta hace referencia a cómo se transportan los nutrientes y, los procesos que provocan su retención o liberación. Las retenciones dependen de las características intrínsecas de la cuenca en la cual se desplazan, a la suma de estas retenciones se conoce como atenuación natural.

La atenuación puede ser por biodegradación por acción de los microorganismos que comen los contaminantes y los degradan. La sorción hace que los contaminantes se adhieran a las partículas del suelo o a la superficie de las rocas (USEPA, 2021).

Y los efectos, es decir, el impacto en los cuerpos hídricos frente a la adición de estos nutrientes.

Con base en este trabajo, se abordaron de alguna manera estos tres factores. (i) La emisión: identificando algunas fuentes puntuales como las descargas de aguas domésticas sin un tratamiento previo. Al ser una subcuenca agro-silvo-pastoril que combina la siembra de árboles, pastos arbustos, cultivos y el pastoreo de animales. Se identifica como fuente difusa el aporte de nitrógeno proveniente de los cultivos, identificándolos de una manera más clara; así mismo la zona no cuenta con un drenaje, las personas utilizan fosas sépticas.

Las actividades ganaderas representan una carga importante de nitrógeno. Cuando el ganado no se encuentra confinado, sino que está en una extensión grande de terreno, la excreta de estos animales se distribuye en toda el área,

por lo que, se convierten una fuente difusa (Puckett, 1995). Identificando también granjas avícolas industriales.

(ii) La movilización, que podría considerarse el factor central de esta tesis, que se relaciona al transporte de los nutrientes, en este caso del nitrógeno. Pues durante el ciclo, ocurren varias reacciones que lo van transformando de una forma a otra. Y según la forma en la que se van transformando se da su movilidad en agua y suelo.

Ejemplificando, el nitrato, que es altamente soluble en agua y este se incorpora con mayor facilidad a las fuentes de agua. En cambio, el amoníaco, al no transportarse con la misma facilidad, es absorbido por las plantas acuáticas y se da la fijación del amonio en las arcillas (Stumm y Morgan, 1996). Lo que nos permite indicar, que, de acuerdo con los resultados obtenidos, donde en los sedimentos se encontró una mayor concentración de nitrógeno amoniacal a diferencia del agua donde no se detectó su presencia, son estos su “deposito final”.

Y finalmente, (iii) los efectos, los cuales son evidentemente claros con la presencia y proliferación del lirio acuático en las orillas del cuerpo de agua.

V. Conclusiones

Los resultados de las simulaciones realizadas en este trabajo nos permitieron concluir que:

- Se logró generar un modelo matemático hidrológico, que permite simular de manera confiable el transporte del nitrógeno en las aguas superficiales.
- Con los escenarios evaluados, podemos visualizar las zonas de mayor concentración de nitrógeno a lo largo de la subcuenca, y que, no obstante que hay otras fuentes de aporte de nitrógeno en la subcuenca, éstas se presentan principalmente debido al uso excesivo de fertilizantes.
- El fenómeno de transporte de nitrógeno amoniacal en las aguas superficiales se intensifica en la temporada de lluvias, debido a los escurrimientos derivados de las precipitaciones, la erosión y arrastre de sedimentos derivados del cambio de uso de suelo forestal a agrícola.
- Para reducir el ingreso de nitrógeno a la presa y poder mitigar el proceso de eutrofización, es muy importante disminuir y controlar el uso de agroquímicos, y en particular de los fertilizantes, así como echar a andar y mantener en operación las dos plantas de tratamiento de agua residual que vierten al vaso de la presa de Cointzio.

VI. Recomendaciones

Toda investigación científica es un aporte de gran utilidad para futuras líneas de investigación y toma de decisiones. Aun cuando los recursos son limitados, es necesario continuar con la investigación en dicha zona, pues los datos de muestreos de agua y suelo en ella, siempre aportarán información que puede tomarse como referencia para futuras líneas de investigación y en ciertos casos, en apoyo cuando se emplee la modelación como herramienta.

Es importante que los resultados de estas investigaciones sean considerados en los Planes municipales de desarrollo urbano. Por consiguiente, se recomienda a los interesados en dar continuidad a este proyecto investigación; seguir realizando más muestreos de calidad del agua, tanto en el vaso receptor como en las principales corrientes que desembocan en la presa, tanto en temporada de lluvias, como en temporada de estiaje. De igual manera, se recomienda continuar con una caracterización y análisis del suelo alrededor de la subcuenca, dado que en los últimos años ha habido importantes cambios en el uso de suelo.

Finalmente, también se recomienda analizar escenarios como incrementos en el cambio de uso de suelo, considerando el crecimiento demográfico, así como analizar el posible impacto que traerá consigo la construcción del nuevo anillo periférico de la ciudad de Morelia.

VII. Referencias

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Akhtar, N., Syakir Ishak, M. I., Bhawani, S. A., & Umar, K. (2021). Various Natural and Anthropogenic Factors Responsible for Water Quality Degradation: A Review. *Water*, 13(19), 2660. <https://doi.org/10.3390/w13192660>
- Alcalá de Jesús M., Prat Christian., Ramos Ramírez A., Hidalgo C., Cabrera González A., y Garduño Monroy V.H. (2007). Caracterización edafológica al sureste de la cuenca de Cointzio, Michoacán. In: Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo. 4 p. León, México. 2007/09/17-21.
- Anderson, R. (1941). Distribution of the Serial Correlation Coefficient. *The Annals of Mathematical Statistics*. <https://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177731638>
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (8. reimpr). Limusa Noriega Ed.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arroyo, E. (2019). La presa de Cointzio: un proveedor de agua y energía perturbado. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. 5. <https://www.researchgate.net/publication/341225942>
- Bautista-Ávalos, D., Cruz-Cárdenas, G., Moncayo-Estrada, R., Silva-García, J.T. y Estrada-Godoy, F. (2014). Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. *Revista Internacional de contaminación ambiental versión*

- impresa*, 30(3). ISSN 0188-4999. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arrtex&pid=S0188-49992014000300003
- Blancas Cabello, C., & Hervás Ramírez, M. E. (2001). *Contaminación de las aguas por nitratos y efectos sobre la salud*. Consejería de Salud.
- Bravo-Espinoza, M., García-Oliva, F., Ríos-Patrón, E., Mendoza-Cantú, M., Barrera-Camacho, G., López-Granados, E., Serrato-Barajas, B.E., y Sáenz-Reyes, T. (2008). La Cuenca del Lago de Cuitzeo: Problemática, Perspectivas y Retos hacia su Desarrollo Sostenible. CIRPAC-INIFAP.
- Bravo-Inclan, L., Saldaña-Fabela, P., Izurrieta-Dávila, J., y Mijangos-Carro, M. (2013). La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo. Gobierno Federal. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/93656/contaminacion_01feb.pdf
- Cáliz Pacheco, A., Raya García, V., Hernández Morales, R., y Zurita Valencia, W. (2018). Calidad de la Presa de Cointzio y fuentes de disposición final intradomiciliarias. *Revista Latinoamericana el ambiente y las ciencias*, 9(21), 996-1006.
- Camacho, A. (2023). *Evaluación de la factibilidad técnica de un tren de tratamiento en el proceso de potabilización a través de una matriz de decisión*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2019). Informe de actividades. Recuperado de www.gob.mx/cenapred. México.
- CICEANA. (s.f.-b). Ciclo del nitrógeno. *Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América*. CICEANA, A.C. Recuperado el 6 de junio de 2023, de https://www.divulgación.ccg.unam.mx/webfm_send/109.
- Correa, A. (2015). Determinación de la concentración de nitratos en escorrentía superficial y mantos acuíferos con modelación matemática. Tesis de maestría en ciencias en ingeniería ambiental. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. https://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4723
- Correa-González, A., Hernández-Bedolla, J., Martínez-Cinco, M. A., Sánchez-Quispe, S. T., & Hernández-Hernández, M. A. (2023). Assessment of Nitrate in Groundwater from Diffuse Sources Considering Spatiotemporal Patterns

- of Hydrological Systems Using a Coupled SWAT/MODFLOW/MT3DMS Model. *Hydrology*, 10(11), 209. <https://doi.org/10.3390/hydrology10110209>
- Corvera, A. (2000). La fijación biológica del nitrógeno y su importancia. Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno. Universidad Nacional Autónoma de México. Revista Red Escolar.6. <https://www.redescolar.ilce.edu.mx/20aniversario/programa/carrucelrevistas/Revista/06/articulos/o0.html>.
- D.N. Moriasi., J.G. Arnold., M.W., Van Liew., R, L. Bingner., R.D. Harmel y T.L. Veith. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. 50(3), 885–900. Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351.
- Domínguez, M.R., Arganis, J.M., Carriosa, E.E. *et al.* (2017). Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República mexicana. Tomos I al IV, Informe Técnico. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Doorenbos, J. (1976). Agro-meteorological Field Stations. Number 27 the FAO irrigation and drainage paper, Food and Agriculture Organization of the UNited Nations. ISBN 9251000301, 9789251000304.
- Dunnivant, Frank M. y Anders, Elliot. (2006). A basic intrduction to pollutant fate and transport: an integrated approach with chemistry, modeling risk assessment, and environmental legislation. A John Wiley & Sons, INC. New Jersey, USA. ISBN -13 978-0-471-65128-4 ISBN-10 0-471-65128-1 (cloth).
- Ejigu, M. T. (2021). Overview of water quality modeling. *Cogent Engineering*, 8(1), 1891711. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1891711>
- EPA. (1996). Point and non-point sources of wáter pollution. United States Environmental Protection Agency. Washington, DC.
- Escalante Sandoval, C.A. y Reyes Chávez, L. (2002). Técnicas Estadísticas en Hidrología. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Fernández, R. (2017). Utilización del programa “SWAT” para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas. Universidad de Huelva. Recuperado de https://www.uva.es/trim/TRIM/TRIM12_files/RFernandez.pdf.

- Fuerte, D. J. (2022). Evaluación de la huella hídrica en la producción de aguacate y fresa en municipios de la subcuenca de Cointzio. Un análisis de vulnerabilidad hídrica. Tesis de doctorado en desarrollo sustentable. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/6785
- Fuillerat Muriel, M. (2021). Revisión de los modelos matemáticos aplicados a la gestión de recursos hídricos o cuencas. Máster Universitario en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos. Universidad de Alcalá.
- Galindo-Miranda, J.M., Guízar-González, C., Becerril-Bravo, E.J., Moeller-Chávez, G., León-Becerril, E. & Vallejo-Rodríguez, R. (2019). Occurrence of emerging contaminants in environmental Surface waters and their analytical methodology- a review. *Water Science & Technology Water Supply*, 19(7), 1871–1884. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.087>
- George H. Hargreaves & Zohrab A. Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Gómez Hernández, A. (2012). Determinación de los cambios del patrón de lluvias debido a la presencia de embalses: Estudio del sistema Grijalva. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/238229>
- González, L. (2013). Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. *Mente & Materia*, 4(1), 12-13. Recuperado de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/mente-y-materia/article/view/334>
- Gómez Hernández, A. (2012). Determinación de los cambios del patrón de lluvias debido a la presencia de embalses: Estudio del sistema Grijalva. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/238229>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S. & Yapo, P.O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparision with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Hernández Batis, J.O. (2016). Las formas múltiples del nitrógeno. Obtenido de Microlab Industrial.

- Instituto Mexicano para la Competitividad, A.C. (2023). Aguas en México, ¿escasez o mala gestión? Investigación. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. (2015). Guía para la interpretación de cartografía: edafología. Escala 1:250 000: serie III. INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. (2001). Síntesis de Información geográfica del Estado de Tabasco. Recuperado de Síntesis de Información geográfica del Estado de Tabasco (inegi.org.mx)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. (2015). Guía para la interpretación de cartografía: edafología. Escala 1:250 000: serie III. INEGI. México.
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y.-S., Kanel, S. R., & Pelletier, G. J. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*, 202(3–4), 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.12.033>
- Kimball, J. (2020). 17.2B: Ciclo del Nitrógeno. Libro: Biología.
- Kumar, M., Das, A., Das, N., Goswami, R. & Singh, U.K. (2016). Co-occurrence perspective of arsenic and fluoride in the groundwater of Difhu, Assam, Northeastern India. *Chemosphere*, 150, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.019>
- Martínez, P.E., Martínez, P. y Castaño, S. (2006). Fundamentos de Hidrogeología. Ed. Mundi-Prensa. ISBN 9788484762393. México.
- Mather, J.R. (1975). Estimation of areal average precipitation using different network densities and averaging techniques. *Publication in Climatology*, Elmer 28(2), 53–54. Laboratory of Climatology. New Jersey.
- Mendoza, M. y López, E. (2007). Caracterización físico-geográfica de la Subcuenca de Cointzio, Michoacán: Información básica para el manejo integrado de cuencas. Ed. Avances de investigación en agricultura sostenible III: Bases metodológicas para el manejo integral de cuencas hidrológicas, 69-96. Uruapan, Michoacán, México.
- Narváez, M., López, C., Reinoso, I., y Minaya, V. (2019). Modelación de nutrientes y evaluación de uso de suelo usando la herramienta de agua y suelo (SWAT), caso de estudio: Cuenca del Río Coca. *REVISTA*

- HIDROLATINOAMERICANA*, Vol. 3(2019), 9–12. ISSN: 2520-2960. Quito, Ecuador.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Navarro, M. del M. (2019). Evaluación con cambio climático de escenarios de demanda para las masas subterráneas en los acuíferos asociados al campo geotérmico cerritos colorados. Tesis de maestría en ciencias en ingeniería ambiental. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. & Williams, J. (2005). Herramienta de evaluación de suelo y agua documentación teórica. Grassland, Soil and Water Research Laboratory-Agricultural o Agricultural Research Service. Recuperado de <https://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. & Williams, J.R. (2011). Soil and Water assessment tool theoretical documentation. College Station, Water Resources Institute, Texas, USA.
- Nixon, S. W. (1995). Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Journal Ophelia*, 41(1), 100-219. <https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422044>
- Ntanganedzeni, B., Elumalai, V., & Rajmohan, N. (2018). Coastal Aquifer Contamination and Geochemical Processes Evaluation In Tugela Catchment, South Africa-Geochemical and Statical Approaches. *Water*, 10(6), 687. <https://doi.org/10.3390/w10060687>
- Osorio, K.R. y Cerquera, N. (2020). Revisión de aplicaciones del modelo SWAT para simular el transporte de agroquímicos en cuencas hidrográficas. Gestión del recurso hídrico y manejo del agua. Universidad de Antioquía. Medellín, Colombia.
- Parajuli, P. B., Nelson, N.O., Frees, L.D., & Mankin, K.R. (2009). Comparision of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrological Processes*, 23(5), 748-763. <https://doi.org/1002 /hyp.7114>

- Pascual, J. A., y Díaz, M. (2016). Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. Centro para el conocimiento del paisaje, CIVILSCAPE, Instituto IMDEA Agua. Recuperado de https://www.academia.edu/33210718/Gu%C3%ADa_pr%C3%A1ctica_sobre_la_modelizaci%C3%B3n_hidrol%C3%B3gica_y_el_modelo_HEC_HMS
- P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green, & J. G. Arnold. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Panda, C., Das, D. M., Sahoo, B. C., Panigrahi, B., & Singh, K. K. (2021). Spatio-temporal modeling of surface runoff in ungauged sub-catchments of Subarnarekha river basin using SWAT. *MAUSAM*, 72(3), 597–606. <https://doi.org/10.54302/mausam.v72i3.1309>
- Praskievicz, S., & Chang, H. (2009). A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33(5), 650–671. <https://doi.org/10.1177/0309133309348098>
- PNUMA. (2007). Perspectivas del medio ambiente mundial. GEO4 medio ambiente para el desarrollo. Dinamarca 2007.
- Pereira, D.D., Martínez, M.A., Pruski, F.F., & Da Silva, D.D. (2016). Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 7, 14-37. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>
- Pérez, J.A., y Espigares, M. (1999). Estudio sanitario del agua 2ª ed. Granada:Ed. Universidad de Granada. Hispagua Sistema Español de Información sobre el Agua. ISBN: 84-338-2529-1
- Pérez, L.X. (2008). Estudio de la transferencia de nutrientes desde sedimentos sometidos a aireación. Aplicación en los embalses de Beniarrés, Amadorio y Guadalest (Provincia de Alicante). Universidad Politécnica de Valencia..
- Pérez, S.A., Niño, Z. M., Hernández, V., y Hernández, C. (2007). Uso de Enzimas de Tipo Ureasa en el Tratamiento de Aguas Residuales con Alto Contenido en Nitrógeno Orgánico. *Información Tecnológica*, 18(5), 41-48. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642007000500006>

- Pérez, J., y Menéndez, C. (2007). Variantes de procesos de nitrificación-desnitrificación para un sistema de biomasa en suspensión para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 28(3), 57-64.
- Puckett, L.J. (1995). Identifying the major sources of nutrient water pollution. *Environmental Science & Technology*, 29(9), 408A-414A. <https://doi.org/10.1021/es00009a001>
- Ramos, J. (2003). Método para obtener la conductividad del suelo analizando la cubierta edáfica de la República Mexicana y mediciones de la intensidad de campo eléctrico. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- Rodríguez García, R., Martínez Muñoz, C., Hernández Vizcaíno, D., De Lucas Veguillas., y Acevedo de Pedro, M.L. (2003). Calidad del agua de fuentes de manantial en la zona básica de salud de Sigüenza. *Revista Española de Salud Pública*, 77(3), 423-432.
- Rojas-Rodríguez, I. S., Coronado-García, M. A., Rossetti-López, S. R., & Beltrán-Morales, F. A. (2020). Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la actividad agrícola en la cuenca baja del río Mayo en el estado de Sonora, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(2), 247–256. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.642>
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., & Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>
- SEMARNAT. (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticos Ambientales. Indicadores clave y de desempeño Ambiental, ed. 2012. ISBN 978-607-8246-61-8.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México. (2016). Atlas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México. (2016). Informe de Agua. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Museo Virtual SIG Introducción-SIG. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>,

- Secretaria de Salud. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad del agua. Diario oficial de la federación. Ciudad de México, México.
- Secretaria de Salud. (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Diario oficial de la federación. Ciudad de México, México.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (1980). Norma Mexicana NMX-AA-003-1980, Aguas residuales-Muestreo. Gobierno de México. Ciudad de México.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario oficial de la federación. Ciudad de México, México.
- Shwetank, N., Sushas, N., & Chaudary, J.K. (2020). A comparative study fuzzy logic and WQI for groundwater quality assessment. *Procedia Computer Science*, 171, 1194-1203. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.128>
- SIAP. (s/f). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Intención de siembra y cosecha. Gobierno de México. Recuperado el 29 de enero de 2024 de <https://nube.siap.gob.mx/agroprograma>
- Siegel, S. (2015). Estadística No Paramétrica 4.a ed. Trillas Editorial.
- Singer, A., Parnes, S., Gross, Sagi, A., & Brenner, A., (2008). A novel approach to denitrification processes in a zero-discharge recirculating system for small-scale urban aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 39(2-3), 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.07.001>
- Sistema Nacional de Información del Agua, SINA. (2024). Monitoreo de Presas. Comisión Nacional del Agua. Conagua.gob.mx.
- Stumn, W., & Morgan, J.J. (1996). Aquatic Chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters. 3rd ed. *Environmental Science and Technology*. JHONWILEY AND SONS, INC. New York.

- Uribe, N. (2010). SWAT Conceptos básicos y guía rápida del usuario. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Obtenido de <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>.
- United States Department of Agriculture, USDA. (1972). National Engineering Handbook, section 4: Hydrology. Washington, DC, USA.
- United States Environmental Protection Agency. (2021). Oficina de Administración de la Tierra y Gestión de Emergencias (Office of Land and Emergency Management) (5203P) EPA-542-F-21-018S
- Van Liew, M. W., Arnold, J.G., & Garbrecht, J.D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. *Transactions of the ASAE*, 46(6), 1539-1551. <https://doi.org/10.1331/2013.15643>
- Van Rijn, J. (1996). The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture-A review. *Aquaculture*, 139(3-4), 181-201. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01151-x](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01151-x)
- Vargas, A., y Monroy, J.C. (2011). Estudio del comportamiento de modelos hidrológicos bajo un análisis de sensibilidad e incertidumbre. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 10, 65-77.
- Vélez Upegui, J.I. (2013). Estrategia de simulación hidrológica distribuida: Integración conceptual de hidrología y geomorfología. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(144), 393-409, 2013. ISSN 0370-3908.
- Verhulst, N., François, I., Grahmann, K., Cox, R., y Govaerts, B. (2015). Eficiencia del uso del nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. Modernización sustentable de la Agricultura Tradicional. *Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y trigo*. México.
- Villate Corredor, J. J., Gualdrón Alfonso, D. F., Useche De Vega, D. S., Rodríguez Baquero, A. P., Buitrago Pérez, S., Amaya Huertas, D. S., Gil Leguizamón, P. A., Rojas Cruz, C. A., & Rodríguez Moreno, E. R. (2023). *Empleo de herramientas SIG en el desarrollo de proyectos civiles*. Editorial UPTC. <https://doi.org/10.19053/9789586607865>
- Wang, Q., Li, S., Jia, P., Qi, C., & Ding, F. (2013). A Review of Surface Water Quality Models. *The Scientific World Journal*, 2013(1), 231768. <https://doi.org/10.1155/2013/231768>

- World Meteorological Organization (WMO). (1996). *Climate change* 79. Secretariat of the WMO.
- Zhu, S., & Chen, S. (2002). The impact of temperatura on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquacultural Engineering*, 26(4), 221-237. [https://doi.org/10.1016/s0144-8609\(02\)00022-5](https://doi.org/10.1016/s0144-8609(02)00022-5)

Anexo A.- Resultados del análisis de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal en agua.



ORGANISMO OPERADOR DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE MORELIA
SUBDIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CALIDAD DE AGUA
INFORME DE ENSAYOS

**ema**
LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO AG-0781-084/16

IDENTIFICACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO							
No. de Registro:	50	Fecha de Emisión:	31 de enero de 2024				
DATOS GENERALES DEL CLIENTE							
Cliente:	UMSNH						
Dirección:	No proporcionado.						
Contacto:	No proporcionado.						
DATOS DE LA MUESTRA		DATOS DEL MUESTREO					
Ubicación del Muestreo:	Presa Cointzio, Aposento Alto (5m)	Fecha de Muestreo:	13 de enero de 2024				
Matriz:	Agua Cruda	Hora de Muestreo:	13:45				
Fecha de Recepción:	15 de enero de 2024	Muestreado por:	Cliente, E.D.R.				
Hora de Recepción:	19:30	Procedimiento de Muestreo*:	N/A				
		Orden de Trabajo:	N/A				
Observaciones:	El Departamento de Calidad del Agua conformado por las Instalaciones de Vista Bella y Mintzita no se hace responsable de la etapa de muestreo y los resultados emitidos se aplican a las muestras cómo se recibieron.						
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO							
PARÁMETROS	RESULTADO	UNIDADES	INCERTIDUMBRE (%)	METODOLOGÍA ANALÍTICA	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	FIRMA
Nitratos	0.37	mg/L	No Aplica	NMX-AA-079-SCFI-2001	18/01/2024	Carmen María Vargas Arias	
Nitritos	0.01	mg/L	6.2	NMX-AA-099-SCFI-2021	15/01/2024	Ernesto Ponce de León Rodríguez	
Nitrógeno Amoniacal	No detectable	mg/L	No Aplica	NMX-AA-026-SCFI-2010	16/01/2024	Alejandro García Salinas	

Notas:

* Parámetros Acreditados bajo la Acreditación No. AG-0781-084/16 y Aprobado ante CONAGUA bajo la Aprobación No. CNA-GCA-2750.

† Es menor al CMC (Cantidad Mínima Cuantificable en Laboratorio).

‡ Es Mayor al CMC (Cantidad Máxima Cuantificable en Laboratorio).

- Los Análisis Reportados se realizaron bajo las metodologías aquí asentadas.

- La información contenida en este documento es manejada de manera confidencial e imparcial de conformidad a lo establecido en nuestro aviso de privacidad el cuál puede consultarse en la página web: www.coapas.gob.mx.


MCIA. MARIA DEL CARMEN CANO CORREA
REPRESENTANTE AUTORIZADO Y SIGNATARIO ANTE LA ema.

ESTE INFORME DE PRUEBA NO PODRA SER ALTERADO, NI REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS Y ANALIZADAS EN ESTE LABORATORIO.

PLANTA POTABILIZADORA VISTA BELLA

Av. Rey Tanganxoan II No. 695 Colonia Vista Bella CP. 58090 Tel. (443) 3-14-23-75 3-14-26-53 3-14-24-61 Ext. 507 y 509

PLANTA POTABILIZADORA LA MINTZITA (Determinación de todos los parámetros bajo la norma NMX-AA-051-SCFI-2016)

Parcela 27421P78 Poblado Mintzita CP. 58342 Tel. (443) 1-13-22-00 Ext. 805.

e-mail: maria.cano@coapas.gob.mx o roberto.zamora@coapas.gob.mx

MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL DEL TRANSPORTE DEL NITRÓGENO EN LA SUBCUENCA DE LA PRESA DE COINTZIO



ORGANISMO OPERADOR DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y
SANEAMIENTO DE MORELIA

SUBDIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CALIDAD DE AGUA
INFORME DE ENSAYOS



IDENTIFICACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

No. de Registro: 51 Fecha de Emisión: 31 de enero de 2024

DATOS GENERALES DEL CLIENTE

Cliente: UMSNH
Dirección: No proporcionado
Contacto: No proporcionado

DATOS DE LA MUESTRA

Ubicación del Muestreo: Presa Cointzio, Aposento Alto (3m)
Matriz: Agua Cruda
Fecha de Recepción: 15 de enero de 2024
Hora de Recepción: 19:30

DATOS DEL MUESTREO

Fecha de Muestreo: 13 de enero de 2024
Hora de Muestreo: 14:00
Muestreado por: Cliente, E.D.R.
Procedimiento de Muestreo*: N/A
Orden de Trabajo: N/A

Observaciones: El Departamento de Calidad del Agua conformado por las instalaciones de Vista Bella y Mintzita no se hace responsable de la etapa de muestreo y los resultados emitidos se aplican a las muestras cómo se recibieron.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

PARÁMETROS	RESULTADO	UNIDADES	INCERTIDUMBRE (%)	METODOLOGÍA ANALÍTICA	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	FIRMA
Nitratos	0.28	mg/L	No Aplica	NMX-AA-079-SCFI-2001	18/01/2024	Carmen María Vargas Arias	
Nitritos	0.01	mg/L	6.2	NMX-AA-098-SCFI-2021	15/01/2024	Emesto Ponce de León Rodríguez	
Nitrógeno Amomiacal	No detectable	mg/L	No Aplica	NMX-AA-026-SCFI-2010	16/01/2024	Alejandro García Salinas	

Notas:

* Parámetros Acreditados bajo la Acreditación No. AG-0781-084/16 y Aprobado ante CONAGUA bajo la Aprobación No. CNA-GCA-2750.

¹ Es menor al CMC (Cantidad Mínima Cuantificable en Laboratorio).

² Es Mayor al CMC (Cantidad Máxima Cuantificable en Laboratorio).

- Los Análisis Reportados se realizaron bajo las metodologías aquí asentadas.

- La información contenida en este documento es manejada de manera confidencial e imparcial de conformidad a lo establecido en nuestro aviso de privacidad el cual puede consultarse en la página web: www.coapas.gob.mx.

MCIA. MARIA DEL CARMEN CANO CORREA
REPRESENTANTE AUTORIZADO Y SIGNATARIO ANTE LA ema.

ESTE INFORME DE PRUEBA NO PODRÁ SER ALTERADO, NI REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS Y ANALIZADAS EN ESTE LABORATORIO.

PLANTA POTABILIZADORA VISTA BELLA

Av. Rey Tanguanxan II No. 695 Colonia Vista Bella CP. 58090 Tel. (443) 3-14-23-75 3-14-26-53 3-14-24-61 Ext. 507 y 509

PLANTA POTABILIZADORA LA MINTZITA (Determinación de todos los parámetros bajo la norma NMX-AA-051-SCFI-2016)

Parcela 274Z1P78 Poblado Mintzita CP. 58342 Tel. (443) 1-13-22-00 Ext. 805,

e-mail: maria.cano@coapas.gob.mx o roberto.zamora@coapas.gob.mx

MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL DEL TRANSPORTE DEL NITRÓGENO EN LA SUBCUENCA DE LA PRESA DE COINTZIO



ORGANISMO OPERADOR DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y
SANEAMIENTO DE MORELIA

SUBDIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CALIDAD DE AGUA
INFORME DE ENSAYOS



IDENTIFICACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

No. de Registro: 52 Fecha de Emisión: 31 de enero de 2024

DATOS GENERALES DEL CLIENTE

Cliente: UMSNH
Dirección: No proporcionado
Contacto: No proporcionado

DATOS DE LA MUESTRA

Ubicación del Muestreo: Presa Cointzio, Uruapilla (5m)
Matriz: Agua Cruda
Fecha de Recepción: 15 de enero de 2024
Hora de Recepción: 19:30

DATOS DEL MUESTREO

Fecha de Muestreo: 13 de enero de 2024
Hora de Muestreo: 14:35
Muestreado por: Cliente, E.D.R.
Procedimiento de Muestreo*: N/A
Orden de Trabajo: N/A

Observaciones: El Departamento de Calidad del Agua conformado por las instalaciones de Vista Bella y Mintzita no se hace responsable de la etapa de muestreo y los resultados emitidos se aplican a las muestras como se recibieron.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

PARÁMETROS	RESULTADO	UNIDADES	INCERTIDUMBRE (%)	METODOLOGÍA ANALÍTICA	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	FIRMA
Nitratos	0.24	mg/L	No Aplica	NMX-AA-079-SCFI-2001	18/01/2024	Carmen María Vargas Arias	
Nitritos	0.01	mg/L	6.2	NMX-AA-099-SCFI-2021	15/01/2024	Emesto Ponco de León Rodríguez	
Nitrógeno Amomiacal	No detectable	mg/L	No Aplica	NMX-AA-026-SCFI-2010	17/01/2024	Alejandro García Salinas	

Notas:

* Parámetros Acreditados bajo la Acreditación No. AG-0781-084/16 y Aprobado ante CONAGUA bajo la Aprobación No. CNA-GCA-2750.

¹Es menor al CMC (Cantidad Mínima Cuantificable en Laboratorio).

²Es Mayor al CMC (Cantidad Máxima Cuantificable en Laboratorio).

- Los Análisis Reportados se realizaron bajo las metodologías aquí asentadas.

- La información contenida en este documento es manejada de manera confidencial e imparcial de conformidad a lo establecido en nuestro aviso de privacidad el cual puede consultarse en la página web: www.oopas.gob.mx.

MCIA. MARIA DEL CARMEN CANO CORREA
REPRESENTANTE AUTORIZADO Y SIGNATARIO ANTE LA ema.

ESTE INFORME DE PRUEBA NO PODRÁ SER ALTERADO, NI REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS Y ANALIZADAS EN ESTE LABORATORIO.

PLANTA POTABILIZADORA VISTA BELLA

Av. Rey Tangaxoan II No. 695 Colonia Vista Bella CP. 58090 Tel. (443) 3-14-23-75 3-14-26-53 3-14-24-61 Ext. 507 y 509

PLANTA POTABILIZADORA LA MINTZITA (Determinación de todos los parámetros bajo la norma NMX-AA-051-SCFI-2016)

Parcela 274Z1P78 Poblado Mintzita CP. 58342 Tel. (443) 1-13-22-00 Ext. 805.

e-mail: maria.cano@oopas.gob.mx o roberto.zamora@oopas.gob.mx

MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL DEL TRANSPORTE DEL NITRÓGENO EN LA SUBCUENCA DE LA PRESA DE COINTZIO



ORGANISMO OPERADOR DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y
SANEAMIENTO DE MORELIA

SUBDIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CALIDAD DE AGUA
INFORME DE ENSAYOS



IDENTIFICACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

No. de Registro: 53 Fecha de Emisión: 31 de enero de 2024

DATOS GENERALES DEL CLIENTE

Cliente: UMSNH
Dirección: No proporcionado
Contacto: No proporcionado

DATOS DE LA MUESTRA

Ubicación del Muestreo: Presa Cointzo, Uruapan (3m)
Matriz: Agua Cruda
Fecha de Recepción: 15 de enero de 2024
Hora de Recepción: 19:30

DATOS DEL MUESTREO

Fecha de Muestreo: 13 de enero de 2024
Hora de Muestreo: 14:35
Muestreado por: Cliente, E.D.R.
Procedimiento de Muestreo*: N/A
Orden de Trabajo: N/A

Observaciones: El Departamento de Calidad del Agua conformado por las instalaciones de Vista Bella y Mintzita no se hace responsable de la etapa de muestreo y los resultados emitidos se aplican a las muestras como se recibieron.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

PARÁMETROS	RESULTADO	UNIDADES	INCERTIDUMBRE (%)	METODOLOGÍA ANALÍTICA	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	FIRMA
Nitritos	0.23	mg/L	No Aplica	NMX-AA-079-SCFI-2001	18/01/2024	Carmen María Vargas Arias	
Nitritos	0.01	mg/L	5.2	NMX-AA-099-SCFI-2021	15/01/2024	Ernesto Porcos de León Rodríguez	
Nitrógeno Amomiacal	No detectable	mg/L	No Aplica	NMX-AA-026-SCFI-2010	17/01/2024	Alejandro García Salinas	

Notas:

* Parámetros Acreditados bajo la Acreditación No. AG-0781-084/16 y Aprobado ante CONAGUA bajo la Aprobación No. CNA-GCA-2750.

¹ Es menor al CMC (Cantidad Mínima Cuantificable en Laboratorio).

² Es Mayor al CMC (Cantidad Máxima Cuantificable en Laboratorio).

- Los Análisis Reportados se realizaron bajo las metodologías aquí asentadas.

- La información contenida en este documento es manejada de manera confidencial e imparcial de conformidad a lo establecido en nuestro aviso de privacidad el cual puede consultarse en la página web: www.oopas.gob.mx.

MCIA. MARIA DEL CARMEN CANO CORREA
REPRESENTANTE AUTORIZADO Y SIGNATARIO ANTE LA ema.

ESTE INFORME DE PRUEBA NO PODRÁ SER ALTERADO, NI REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS Y ANALIZADAS EN ESTE LABORATORIO.

PLANTA POTABILIZADORA VISTA BELLA

Av. Rey Tanguan II No. 695 Colonia Vista Bella CP. 58090 Tel. (443) 3-14-23-75 3-14-26-53 3-14-24-61 Ext. 507 y 509

PLANTA POTABILIZADORA LA MINTZITA (Determinación de todos los parámetros bajo la norma NMX-AA-051-SCFI-2016)

Parcela 27421P78 Poblado Mintzita CP. 58342 Tel. (443) 1-13-22-00 Ext. 805.

e-mail: maria.cano@oopas.gob.mx o roberto.zamora@oopas.gob.mx

MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL DEL TRANSPORTE DEL NITRÓGENO EN LA SUBCUENCA DE LA PRESA DE COINTZIO



ORGANISMO OPERADOR DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y
SANEAMIENTO DE MORELIA

SUBDIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CALIDAD DE AGUA
INFORME DE ENSAYOS



IDENTIFICACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

No. de Registro: 54 Fecha de Emisión: 31 de enero de 2024

DATOS GENERALES DEL CLIENTE

Cliente: UMSNH
Dirección: No proporcionado
Contacto: No proporcionado

DATOS DE LA MUESTRA

Ubicación del Muestreo: Presa Cointzio, Santiago Undameo (3m)
Matriz: Agua Cruda
Fecha de Recepción: 15 de enero de 2024
Hora de Recepción: 19:30

DATOS DEL MUESTREO

Fecha de Muestreo: 13 de enero de 2024
Hora de Muestreo: 15:10
Muestreado por: Cliente, E.D.R.
Procedimiento de Muestreo*: N/A
Orden de Trabajo: N/A

Observaciones: El Departamento de Calidad del Agua conformado por las instalaciones de Vista Bella y Mintzita no se hace responsable de la etapa de muestreo y los resultados emitidos se aplican a las muestras como se recibieron.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

PARÁMETROS	RESULTADO	UNIDADES	INCERTIDUMBRE (%)	METODOLOGÍA ANALÍTICA	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	FIRMA
Nitratos	0.14	mg/L	No Aplica	NMX-AA-079-SCFI-2001	18/01/2024	Carmen María Vargas Arias	
Nitritos	0.01	mg/L	6.2	NMX-AA-099-SCFI-2021	15/01/2024	Emesto Ponce de León Rodríguez	
Nitrógeno Amoniacal	No detectable	mg/L	No Aplica	NMX-AA-026-SCFI-2010	17/01/2024	Alejandro García Salinas	

Notas:

* Parámetros Acreditados bajo la Acreditación No. AG-0781-084/16 y Aprobado ante CONAGUA bajo la Aprobación No. CNA-GCA-2750.

¹Es menor al CMC (Cantidad Mínima Cuantificable en Laboratorio).

²Es Mayor al CMC (Cantidad Máxima Cuantificable en Laboratorio).

- Los Análisis Reportados se realizaron bajo las metodologías aquí asentadas.

- La información contenida en este documento es manejada de manera confidencial e imparcial de conformidad a lo establecido en nuestro aviso de privacidad el cual puede consultarse en la página web: www.ooapas.gob.mx.

MCIA. MARIA DEL CARMEN CANO CORREA
REPRESENTANTE AUTORIZADO Y SIGNATARIO ANTE LA ema.

ESTE INFORME DE PRUEBA NO PODRA SER ALTERADO, NI REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS Y ANALIZADAS EN ESTE LABORATORIO.

PLANTA POTABILIZADORA VISTA BELLA

Av. Rey Tangaxoan II No. 695 Colonia Vista Bella CP. 58090 Tel. (443) 3-14-23-75 3-14-26-53 3-14-24-61 Ext. 507 y 509

PLANTA POTABILIZADORA LA MINTZITA (Determinación de todos los parámetros bajo la norma NMX-AA-051-SCFI-2016).

Parcela 274Z1P78 Poblado Mintzita CP. 58342 Tel. (443) 1-13-22-00 Ext. 805.
e-mail: maria.cano@ooapas.gob.mx o roberto.zamora@ooapas.gob.mx

MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL DEL TRANSPORTE DEL NITRÓGENO EN LA SUBCUENCA DE LA PRESA DE COINTZIO



ORGANISMO OPERADOR DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y
SANEAMIENTO DE MORELIA

SUBDIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CALIDAD DE AGUA
INFORME DE ENSAYOS



IDENTIFICACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

No. de Registro: 55 Fecha de Emisión: 31 de enero de 2024

DATOS GENERALES DEL CLIENTE

Cliente: UMSNH
Dirección: No proporcionado
Contacto: No proporcionado

DATOS DE LA MUESTRA

Ubicación del Muestreo: Presa Cointzio, Canal Santiago Undameo (superficial)
Matriz: Agua Cruda
Fecha de Recepción: 15 de enero de 2024
Hora de Recepción: 19:30

DATOS DEL MUESTREO

Fecha de Muestreo: 13 de enero de 2024
Hora de Muestreo: 16:45
Muestreado por: Cliente, E.D.R.
Procedimiento de Muestreo: N/A
Orden de Trabajo: N/A

Observaciones: El Departamento de Calidad del Agua conformado por las instalaciones de Vista Bella y Mintzita no se hace responsable de la etapa de muestreo y los resultados emitidos se aplican a las muestras cómo se recibieron.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

PARÁMETROS	RESULTADO	UNIDADES	INCERTIDUMBRE (%)	METODOLOGÍA ANALÍTICA	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA	FIRMA
Nitratos	0.32	mg/L	No Aplica	NMX-AA-079-SCFI-2001	18/01/2024	Carmen María Vargas Arias	
Nitritos	0.02	mg/L	6.2	NMX-AA-099-SCFI-2021	15/01/2024	Ernesto Ponce de León Rodríguez	
Nitrógeno Amomiacal	No detectable	mg/L	No Aplica	NMX-AA-026-SCFI-2010	17/01/2024	Alejandro García Salinas	

Notas:

* Parámetros Acreditados bajo la Acreditación No. AG-0781-084/16 y Aprobado ante CONAGUA bajo la Aprobación No. CNA-GCA-2750.

¹Es menor al CMC (Cantidad Mínima Cuantificable en Laboratorio).

²Es Mayor al CMC (Cantidad Máxima Cuantificable en Laboratorio).

- Los Análisis Reportados se realizaron bajo las metodologías aquí asentadas.

- La información contenida en este documento es manejada de manera confidencial e imparcial de conformidad a lo establecido en nuestro aviso de privacidad el cuál puede consultarse en la página web: www.ooapas.gob.mx.

MCIA. MARIA DEL CARMEN CANO CORREA
REPRESENTANTE AUTORIZADO Y SIGNATARIO ANTE LA ema.

ESTE INFORME DE PRUEBA NO PODRA SER ALTERADO, NI REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS Y ANALIZADAS EN ESTE LABORATORIO.

PLANTA POTABILIZADORA VISTA BELLA

Av. Rey Tanagerxoan II No. 695 Colonia Vista Bella CP. 58090 Tel. (443) 3-14-23-75 3-14-26-53 3-14-24-61 Ext. 507 y 509

PLANTA POTABILIZADORA LA MINTZITA (Determinación de todos los parámetros bajo la norma NMX-AA-051-SCFI-2016)

Parcela 274Z1P78 Poblado Mintzita CP. 58342 Tel. (443) 1-13-22-00 Ext. 805.

e-mail: maria.cano@ooapas.gob.mx o roberto.zamora@ooapas.gob.mx

Anexo B.- Resultados del análisis de nitrógeno amoniacal en sedimentos.



INFORME DE ENSAYO

FR-19-03
Revisión: 01
Entrada en vigor: 17/01/2024

Identificación del documento			
No. Ensayo	E007-S-2024	Fecha de emisión	25/01/2024
Datos del Cliente			
Nombre	María del Carmen Cano Correa	Huerto/Predio	N.A.
Dirección	No proporcionado	No. Cotización	S_002_2024 ver. 01
Datos del Muestreo			
Procedencia	Aposento Alto	Determinación solicitada	Nitrógeno amoniacal ¹
Tipo de muestra	Puntual		
Georreferencia	19.625810, -101.247695	Cantidad de Muestra	N.A.
ID Interno	004s	Procedimiento	NOM-021-RECNAT-2000
Muestreador	Cliente	Interpretación de datos	No aplica
Fecha e información adicional			
Toma de la muestra	13/01/2024	Recepción de la muestra	15/01/2024
Hora de la Toma de muestra	No Proporcionado	Observaciones	Muestra de lodos

RESULTADOS DE LA MUESTRA					
ID MUESTRA	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA
Aposento Alto (004s)	41.50	mg/kg	AS-08 Nitrógeno	19/01/2024	HERL
Notas: ¹ Parámetro no acreditado. HERL Tec. Hugo Eduardo Rosas Linares					

IBQ Cristina Juárez Contreras
COORDINADOR SGC

Los resultados obtenidos solo aplican a la muestra ensayada.
Este documento es válido sólo en su forma original (impreso o electrónico) con la correspondiente firma. No debe reproducir este informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio de Úkua Lab.
ÚKUA LAB S.C.
ANÁLISIS DE AGUA, SUELOS Y MUESTRAS AMBIENTALES E INDUSTRIALES
Periférico 3140-1, Col. Ex Hacienda la Huerta (Entrada por plaza GEA) C.P. 58058 MORELIA, Mich., México
Contacto: 4433354850

Página 1 de 1



INFORME DE ENSAYO

FR-19-03
Revisión: 01
Entrada en vigor: 17/01/2024

Identificación del documento			
No. Ensayo	E006-S-2024	Fecha de emisión	25/01/2024
Datos del Cliente			
Nombre	María del Carmen Cano Correa	Huerto/Predio	N.A.
Dirección	No proporcionado	No. Cotización	S_002_2024 ver. 01
Datos del Muestreo			
Procedencia	Uruapilla	Determinación solicitada	Nitrógeno amoniacal ¹
Tipo de muestra	Puntual		
Geoferencia	19.615599, -101.269754	Cantidad de Muestra	N.A.
ID Interno	003s	Procedimiento	NOM-021-RECNAT-2000
Muestreador	Cliente	Interpretación de datos	No aplica
Fecha e información adicional			
Toma de la muestra	13/01/2024	Recepción de la muestra	15/01/2024
Hora de la Toma de muestra	16:50 hrs	Observaciones	Muestra de lodos

RESULTADOS DE LA MUESTRA					
ID MUESTRA	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO	FECHA DE ANÁLISIS	ANALISTA
Uruapilla (003s)	27.75	mg/kg	AS-08 Nitrógeno	19/01/2024	HERL
Notas: ¹ Parámetro no acreditado. HERL Tec. Hugo Eduardo Rosas Linares					

IBQ Cristina Juárez Contreras
COORDINADOR SGC

Los resultados obtenidos solo aplican a la muestra ensayada.
Este documento es válido sólo en su forma original (impreso o electrónico) con la correspondiente firma. No debe reproducir este informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio de Úkua Lab.
ÚKUA LAB S.C.
ANÁLISIS DE AGUA, SUELOS Y MUESTRAS AMBIENTALES E INDUSTRIALES
Periférico 3140-1, Col. Ex Hacienda la Huerta (Entrada por plaza GEA) C.P. 58058 MORELIA, Mich., México
Contacto: 4433354850

37% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 33%  Fuentes de Internet
- 21%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

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 hidrológica superficial del transporte de nitrógeno en la subcuenca de la presa de Cointzio	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Estefany Durán Rojas	1025246x@umich.mx
Director	Dr. Julio César Orantes Ávalos	julio.orantes@umich.mx
Codirector	Dr. Jesús Pardo Loaiza	jesus.pardo@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Hugo Luis Chávez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

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	n/a
Traducción a otra lengua	no	n/a
	no	n/a
Revisión y corrección de estilo		
Análisis de datos	no	n/a
Búsqueda y organización de información	no	n/a
Formateo de las referencias bibliográficas	no	n/a
	no	n/a
Generación de contenido multimedia		
Otro	no	n/a

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Estefany Durán Rojas / n / v
Lugar y fecha	Morelia Michoacán a 28 de enero de 2025