



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

LIMNOLOGÍA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON EL USO DEL SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO NEXAPA

TESIS

Que para obtener el título de:

BIÓLOGO

PRESENTAN

Morales Vázquez Guadalupe

Reyes Rosales Adamari Natalia

JURADO DE TESIS

Directora: *Dra. Eloisa Adriana Guerra Hernández*

Asesor: *Dr. Gerardo Cruz Flores*

Asesor: *Dr. Justo Salvador Hernández Avilés*

Sinodal: *Dr. Guillermo Artemio Blancas Arroyo*

Sinodal: *M. en C. Alma Bella López López*



CIUDAD DE MÉXICO

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



SOLICITUD DE SINODALES

DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD
 DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
 Presente

Me dirijo a ustedes para solicitarle la asignación de **SINODALES** del siguiente trabajo de titulación en la modalidad de: **TESIS**

Limnología fluvial y su relación con el uso del suelo en la subcuenca del Rio Nexapa

Director del trabajo DRA. GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA

Asesor DR. CRUZ FLORES GERARDO

Asesor DR. HERNANDEZ AVILES JUSTO SALVADOR

Propuesta de sinodales:

Sinodal M. EN C. LOPEZ LOPEZ ALMA BELLA

Sinodal DR. BLANCAS ARROYO GUILLERMO ARTEMIO

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"


 DRA. GUERRA HERNÁNDEZ ELOISA
 ADRIANA
 Director(a) del proyecto


 MORALES VAZQUEZ GUADALUPE
 No. Cuenta: 314051471


 DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD
 DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS
 SUPERIORES ZARAGOZA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
CARRERA DE BIOLOGÍA



SOLICITUD DE SINODALES

DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
Presente

Me dirijo a ustedes para solicitarle la asignación de **SINODALES** del siguiente trabajo de titulación en la modalidad de: **TESIS**

LIMNOLOGÍA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON EL USO DEL SUELO EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO NEXAPA

Director del trabajo DRA. GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA
Asesor DR. CRUZ FLORES GERARDO
Asesor DR. HERNANDEZ AVILES JUSTO SALVADOR

Propuesta de sinodales:

Sinodal DR. BLANCAS ARROYO GUILLERMO ARTEMIO
Sinodal M. EN C. LOPEZ LOPEZ ALMA BELLA

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"


DRA. GUERRA HERNANDEZ ELOISA
ADRIANA
Director(a) del proyecto


REYES ROSALES ADAMARI NATALIA
No. Cuenta: 314169996


DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
CARRERA DE BIOLOGÍA
FORMATO F-3
DESIGNACIÓN SINODO



SUSTENTANTE: **MORALES VAZQUEZ GUADALUPE**

TITULO DEL TRABAJO:

Limnología fluvial y su relación con el uso del suelo en la subcuenca del Rio Nexapa

MODALIDAD: **TESIS**

DIRECTOR: **GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA**

ÁREA:

Le comunico que el jurado que le examinará con motivo de su examen profesional estará formado por los siguientes

SINODALES	FECHA DE INGRESO A LA UNAM
DR. BLANCAS ARROYO GUILLERMO ARTEMIO (Presidente)	1982-04-16
DRA. GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA (Vocal)	1984-11-12
DR. CRUZ FLORES GERARDO (Secretario)	1985-07-16
DR. HERNANDEZ AVILES JUSTO SALVADOR (Suplente)	1989-02-13
M. EN C. LOPEZ LOPEZ ALMA BELLA (Suplente)	2015-09-01

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
CDMX, a 22 de Marzo de 2023

DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
CARRERA DE BIOLOGÍA
FORMATO F-3
DESIGNACIÓN SINODO



SUSTENTANTE: REYES ROSALES ADAMARI NATALIA

TITULO DEL TRABAJO:

LIMNOLOGÍA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON EL USO DEL SUELO EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO NEXAPA

MODALIDAD: TESIS

DIRECTOR: GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA

ÁREA:

Le comunico que el jurado que le examinará con motivo de su examen profesional estará formado por los siguientes

SINODALES		FECHA DE INGRESO A LA UNAM
DR.	BLANCAS ARROYO GUILLERMO ARTEMIO (Presidente)	1982-04-16
DRA.	GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA (Vocal)	1984-11-12
DR.	CRUZ FLORES GERARDO (Secretario)	1985-07-16
DR.	HERNANDEZ AVILES JUSTO SALVADOR (Suplente)	1989-02-13
M. EN C.	LOPEZ LOPEZ ALMA BELLA (Suplente)	2015-09-01

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
CDMX, a 27 de Marzo de 2023

DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por brindarnos la oportunidad de realizar nuestros estudios de licenciatura y por proporcionarnos los recursos necesarios para llevar esta investigación.

A la **Dra. Eloisa Adriana Guerra Hernández** directora de esta tesis, por su paciencia dedicación y apoyo durante todo este proceso, pese a las dificultades siempre nos brindó las herramientas para concluir este proyecto.

Al **Dr. Gerardo Cruz Flores** por todo el tiempo que nos dedicó, sus consejos y conocimientos siempre nos acompañaran. Ha sido un gusto compartir experiencias de campo.

Al **Dr. Justo Salvador Hernández Avilés, Dr. Guillermo Artemio Blancas Arroyo** y la **M. en C. Alma Bella López López**. Por sus valiosos comentarios y sugerencias para enriquecer esta investigación, cada aprendizaje nos ayudó a estar un paso más cerca de la meta.

Al laboratorio de calidad de agua y ecohidrología, que nos permitió conocer a buenos amigos, nos dio nuevos conocimientos y enseñó a superar las dificultades que se presentaban. Nos llevamos grandes recuerdos, experiencias y anécdotas, de todos aquellos con los que convivimos.

Dedicatorias

Guadalupe

A mi madre Margarita, no hay palabras que sean suficientes para agradecerle por cada abrazo, sonrisa y palabra de aliento, todo eso me motivo a seguir adelante, no podría ser más afortunada de tener una mamá como usted, gracias por ayudarme a cumplir mis sueños. Te amo, gracias mamá por estar siempre.

A mi padre Matias, me ha demostrado que ante cualquier adversidad podemos salir adelante, gracias por todo el esfuerzo para que pudiera realizarme profesionalmente, espero que con este triunfo pueda ser tan feliz como yo. Me llena de dicha, tenerlo presente en la culminación de una etapa tan importante.

A mis hermanos Manuel, Carlos, José Luis y Alejandro, cada día pienso en lo afortunada que soy de tenerlos en mi vida, gracias por apoyarme en cada paso, por lo bueno y lo malo, no podría ser más feliz de compartir esto con ustedes, estoy muy orgullosa de cada uno, no hay manera suficiente para decirles lo muchos que los quiero. Somos un equipo, si uno lucha, luchamos todos, si alguien triunfa, triunfamos todos.

A mis cuñadas, cada una me ha enseñado que en la vida hay de todo un poco y que la primera impresión no siempre es la correcta. Gracias por estar y acompañarme en este camino.

A mis niños Valeria, Toni, Joselin, Mateo y Mia, cada uno, a su muy particular manera me motiva a no rendirme, llegaron a cambiar todo en mi vida, tal vez ni siquiera se dan cuenta pero cada sonrisa y abrazo hace que todo valga la pena. Nunca pensé que ser tía me alegraría la vida, los quiero mucho y deseo estar ahí para verlos crecer.

A Yuni, te has convertido en alguien muy especial, eres como una hermana mayor de quien aprender, gracias por tu presencia, por tu apoyo incondicional y sobre todo por compartir mis alegrías y tristezas. Te quiero demasiado a ti y a tus criaturas.

A mis tíos, que aún en la distancia me alientan a seguir día con día, por su tiempo y amor muchas gracias. A mi tío Lorenzo, me hubiera encantado que estuvieras aquí para celebrarlo, perdón por tardar, pero donde sea que te encuentres espero que te sientas orgulloso de mi.

A Cesar, Laura, Malena, Ana María, Luisa y Laura siempre confiaron en que podría lograrlo y ahora puedo decirles que sí, si pude. Aun cuando la vida nos ha llevado por distintos caminos y la edad nos separa, ha sido un placer coincidir con ustedes, los quiero.

A Kevin, no hay nada que pueda escribir que sea una digna respuesta, resumir una década en unas cuantas líneas no sería justo, así que de momento puedo decirte gracias por todo lo que has hecho, gracias por ser mi brújula en este arduo camino, me has llevado en la dirección correcta, no me soltaste en el peor momento y hoy, compartimos

un logro más. Te amo con todo el corazón.

A Natalia, que bonito es coincidir con personas tan lindas, desafortunadamente a mí me tocó conocerte a ti, con altas y bajas, pero siempre dispuestas a dar lo mejor, se siente bien padre decirte amiga. Decirte que te quiero es poco, gracias por recorrer este camino conmigo, por todo lo compartido y sobre todo por su amistad, te quiero tres millones pequeña, que sean muchos años más. *Si me preguntan por ti, diré que es mentira que toda una vida he soñado contigo.*

A Victor, contigo me quedó claro que la vida te da sorpresas y lo agradezco, te quiero mucho mi pequeño amigo, deseo que sean más años en los que podamos compartir muchos recuerdos.

A Dani, de día mi querido asesor externo y de noche mi buen vecino el hombre araña, gracias por la sabiduría impuesta en este trabajo, creo que las desveladas haciendo la tesis no hubieran sido las mismas, que padre coincidir contigo.

A Luis pese al tiempo y la distancias, eres de lo más bonito que me dejó la prepa, no es coincidencia que la vida nos volviera a cruzar, estoy deseosa de verte triunfar, gracias por celebrar este triunfo conmigo.

A Mariana y Ximena, han pasado los años y seguimos aquí celebrando nuestras victorias y ayudándonos cuando todo parece ir mal, siempre pendientes. Las quiero infinitamente.

A Francisco, toda una vida juntos, siendo compañeros, amigos y hermanos por elección, que dicha es vernos cumplir todo aquello que parecía un sueño, que sean más y mejores cosas, te quiero mucho hermanito.

A Roberto, Eduardo, Brayan, Antonio, Viri, Cesar y Damian, me llevó recuerdos muy gratos de cada uno de ustedes.

A Olmos y Policarpo, mis queridos profesores, confiaron que lograría mucho, hoy estoy un paso más cerca, quiero dedicárselos, porque aunque ya no estén aquí, los recuerdo con alegría y su recuerdo me acompaña.

Finalmente quiero dedicarles este trabajo a todas las personas que en mayor o menor medida, colocaron un escalón para que pudiera llegar a culminar mis estudios profesionales.

Dedicatorias

Natalia

Mami. No puedo plasmar con simples palabras lo agradecida que estoy por todo tu fuerza y apoyo, sola lograste sacarnos adelante, espero poder darte un poquito de todo eso por lo que has superado durante tantos años y por lo que estoy tan orgullosa de ti. No te dedico esta tesis, te dedico mi vida entera, te escribo esto para recordarte que tu pequeña hija llegó tan lejos gracias a ti, que sigamos disfrutando la vida y que podemos lograr todos los sueños que tenemos. Mom, te amo con todo mi ser, eres mi todo.

Abuelita Alicia, siempre has sido el soporte, quien nos da fuerza para seguir adelante, siempre estaré agradecida por todo el apoyo que me has brindado, aunque quisiera regresártelo sería imposible; eres la mejor abuelita del mundo y siempre estás en mis pensamientos, deseo poder compartir y disfrutar mucho más tiempo de mi vida contigo abue.

Hermano, me has dado grandes lecciones de vida, siempre he creído que todo sucede a su tiempo y nuestra relación lo comprueba, te agradezco mucho tus consejos y peleas, a nuestra manera creo que nos demostramos el amor que nos tenemos, pero aprovecho para decírtelo, gracias por estar conmigo.

Tía Paola, tío Alberto, Ángel, Danna, Ximena, Carlos, han sido una verdadera familia para mí, gracias por su apoyo, sus platicas, sus bromas, por escucharme y hacerme sentir querida sin importar mis defectos. Los amo mucho.

Dani, gracias por estos años a tu lado, me has impulsado a seguir adelante y lograr mis metas, a experimentar nuevas cosas sin miedo al fracaso porque de todos modos estarás ahí para mí, apoyándome en cada uno de los pasos que dé. Aunque el camino juntos no ha sido fácil eres mi fuente de energía y compañero de aventuras. Te amo.

Lu, el largo camino desde el primer día de clases hasta hoy ha sido mucho mejor contigo a mi lado, pasamos por muy buenos y malos momentos, nos vimos crecer, madurar y aprender, no solo académicamente sino en la vida. Estoy infinitamente agradecida por poder finalizar esta etapa junto a ti, que nuestros metas y sueños se cumplan y los podamos seguir compartiendo. "Te miro, me miras y el mundo no gira..."

Kevin, no sabes todo lo lindo que he vivido a tu lado, nunca olvidaré todos los momentos juntos que nos hicieron sentirnos en familia, sin las peleas y todas las terea que me pasabas no hubiera soportado la universidad, prometo ya no regañarte tanto y sobre todo espero que esta amistad siga por todos los años que me queden de vida. Te quiero tres millones.

Ustedes dos me enseñaron que los amigos son la familia que nosotros escogemos. "Ohana significa familia y tu familia nunca te abandona ni te olvida".

Víctor, pensar que todo empezó con un "valar morghulis" y después de tanto seguimos aquí, compartiendo experiencias, logros y derrotas en la vida. Eres un gran amigo y

espero continúe siendo así. Te quiero

Paco, desde la secundaria hemos estado presentes en la vida del otro, en momentos importantes y en los difíciles, gracias por siempre escucharme y aconsejarme. Aunque no lo digo muy seguido sabes que te quiero.

A mis amigos Alan, Roberto, Lalo, Brayan, Viri, César y todas las personitas que han dejado huella en mi vida, aunque no los vea frecuentemente han sido parte importante para mi, las salidas a campo, a comer, los viajes o simplemente el tiempo compartido, me dieron momentos de alegría y diversión que nunca olvidaré, gracias por sus consejos y saben que siempre les desearé todo el éxito en sus vidas.

A mis preciosos gatitos Bishita, Tommy, Cersie, Güerito, Galleta, Aegon, Oreo, Gray y Nomi, y perritas Keysi, Blacky, Tory, Kiara, Cali y Milo, el verdadero amor siempre lo he recibido de mi familia de cuatro patitas.

Gracias a todos por ayudarme a forjar un corazón de acero.

INDICE

Introducción	1
Marco teórico	2
Planteamiento del problema	11
Hipótesis	11
Objetivo general	11
Objetivos particulares	11
Método	12
Trabajo de campo	13
Trabajo/Manejo estadístico	17
Resultados	17
Comportamiento hídrico	24
Análisis estadístico	41
Prueba de comparación de medianas de Kruskal-Wallis	43
Discusión de resultados	49
Conclusiones	55
Referencias	56
Anexos	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Uso de suelo pradera de alta montaña.	18
Figura 2. Uso de suelo forestal-pradera de alta montaña	19
Figura 3. Uso de suelo forestal.	20
Figura 4. Uso de suelo forestal-recreativo	21
Figura 5. Uso de suelo agrícola-urbano.	22
Figura 6. Uso de suelo agrícola-urbano-minero.	24
Figura 7. Promedio de la temperatura de cada uso de suelo en épocas de lluvias y estiaje.	27
Figura 8. Promedio del pH en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	28
Figura 9. Promedio de STD en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	29
Figura 10. Promedio del oxígeno disuelto en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	30
Figura 11. Promedio del Caudal de cada sitio de estudio y uso de suelo en las épocas de lluvias y estiaje.	31
Figura 12. Promedio de los SS en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	33
Figura 13. Promedio de los nitratos en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	34
Figura 14. Promedio de los nitritos en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje	35
Figura 15. Promedio del amonio en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	36
Figura 16. Promedio del fósforo total en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	37
Figura 17. Promedio de los ortofosfatos en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	38
Figura 18. Promedio de los sulfuros en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	39
Figura 19. Promedio de los sulfatos en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	40
Figura 20. Clasificación de la calidad del agua, basada en la medida de DQO, propuesta por CONAGUA	41
Figura 21. Promedio de la DQO en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.	41
Figura 22. Variación de la temperatura en los diferentes usos de suelo.	44
Figura 23. Variación del pH en los usos de suelo.	45
Figura 24. Variación del Oxígeno disuelto en los usos de suelo.	46
Figura 25. Variación de STD en diferentes usos de suelo.	46
Figura 26. Variación de SS en diferentes usos de suelo.	47
Figura 27. Variación de Amonio en diferentes usos de suelo.	48
Figura 28. Variación del Fósforo total en diferentes usos de suelo.	48
Figura 29. Variación de la DQO en diferentes usos de suelo.	49

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sitios de muestreo, descripción y uso de suelo

Tabla 2. Valores máximos, mínimos y promedio registrados en los diferentes usos de suelo en la época de lluvia.

Tabla 3. Valores máximos, mínimos y promedio registrados en los diferentes usos de suelo en la época de estiaje.

Tabla 4. Perfil batimétrico de los usos de suelo de la subcuenca del río Nexapa.

Tabla 5. Significancia y valores estadísticos de los parámetros hídricos en temporada de lluvia y estiaje

RESUMEN

En esta investigación se evaluó la variación de las características físicas y químicas del agua, en diferentes condiciones de uso de suelo a través del tiempo, en la subcuenca del río Nexapa. La corriente principal, que fluye por esta subcuenca nace al oriente del volcán Iztaccíhuatl y desciende a través de diferentes tipos de vegetación y localidades con distintos usos de suelo desde una altura de 4010 a 2040 m s.n.m. Para poder llevar a cabo esto, se seleccionaron ocho sitios donde se realizaron muestreos bimensuales de los parámetros (temperatura, pH, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, sólidos disueltos, nitritos, nitratos, amonio, fósforo total, ortofosfatos, sulfuros, sulfatos, DQO, caudal), en las épocas de lluvia y estiaje entre agosto de 2019 y febrero de 2020. Se identificaron seis usos de suelo: pradera de alta montaña (PM), forestal-pradera de alta montaña (FPM), Forestal (F), Forestal-Recreativo (FR), Agrícola-Urbano (AU) y Agrícola-Urbano-Minero (AUM). Respecto a la calidad física y química del agua, se vio disminuida en los usos de suelo AU y AUM lo cual es consecuencia de la perturbación del ecosistema, por actividades agrícolas, mineras y descargas de aguas municipales. Se realizó una correlación de Spearman para determina la asociación entre las variables, posteriormente se llevó a cabo la prueba de Kruskal-Wallis de aquellos parámetros que presentaron correlación con la intención de comparar las medianas en diferentes condiciones de uso de suelo. Al analizar los resultados es posible determinar que el uso de suelo en conjunto con el régimen pluvial, son factores que impactan en la calidad del agua, esto se puede ver reflejado en los usos de suelo con influencia antropogénica que disminuyen/merman la calidad del agua. Por ello es importante que se realice un monitoreo continuo de la zona, con el fin de identificar puntos críticos de contaminación que puedan ser rehabilitados.

Introducción

Las aguas superficiales y sus ecosistemas asociados en las cuencas hidrológicas han provisto por miles de años los servicios ambientales necesarios para el desarrollo social y económico de las poblaciones humanas (Navarro *et al.*, 2017). El agua que circula a través de las cuencas proviene de diferentes fuentes como el deshielo, el manto freático, la condensación y la precipitación pluvial. Sus propiedades dependen de la fuente de origen y de los procesos de mezcla durante su trayectoria, donde se realiza el intercambio continuo de elementos por precipitación o disolución, en los que intervienen diversos factores físicos, químicos y biológicos, derivados de procesos naturales y sociales (Guerra- Hernández y Campos-Lince, 2017).

Muchas de las características de los sistemas de agua corriente derivan del uso de suelo adyacente, el cual se determina por los arreglos y actividades que se realizan en un determinado tipo de cobertura (Soria, 2016), su uso correcto es un factor determinante para mantener la sostenibilidad de los sistemas (IARNA, 2003), sin embargo, la pérdida y degradación de la vegetación natural generada por el cambio de uso de suelo provocan la fragmentación del ecosistema y su rápido deterioro.

Las interacciones entre el agua y el uso de la tierra en una cuenca hidrográfica son cruciales para la conservación de la calidad del agua (de Mello *et al.*, 2018) y para el desarrollo sostenible de la comunidad (Gu *et al.*, 2019), por lo que describir la relación entre ellas aumentaría en gran medida el conocimiento sobre las influencias antropogénicas (Park *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2016) y el desarrollo de prácticas adecuadas de uso de suelo (Lu *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 2017).

El cambio en las condiciones ambientales de la cuenca, la transformación del uso de suelo y la adición de contaminantes al río son solo algunas de las afectaciones, que trae consigo el crecimiento urbano y las actividades industriales, agrícolas, mineras, etc. Esta investigación se desarrolló en la subcuenca del río Nexapa donde se analizaron las características físicas y químicas de afluentes en distintas condiciones de uso de suelo con la finalidad de conocer la repercusión hidrológica causada por dichos cambios.

Marco teórico

Limnología fluvial

La Limnología según Margalef (1983) estudia todas las aguas epicontinentales, como los lagos y lagunas, los ríos, las aguas fluyentes, el orden de comunidades fluviales, la contaminación de los cursos hídricos y los embalses. La visión del estudio de los cuerpos de agua es interdisciplinaria, requiere de la física, la química, la geología y la biología para evaluar la calidad del agua. Cada clase de variable permite aproximarse al estado actual de los cuerpos de agua desde perspectivas diferentes. La limnología juega un papel central en la conservación de los recursos hídricos, ya que al conocer la dinámica de los ecosistemas brinda las bases para reducir el impacto antrópico, el mantenimiento y la restauración de los sistemas acuáticos alterados (Martínez y Pinilla, 2018).

Cuenca

Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formando una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica). En estos territorios hay una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación y las instituciones (Cotler *et al.*, 2013).

Pueden caracterizarse a través de ciertos parámetros descriptivos (Wanielista *et al.*, 1997) estos definirán la forma y magnitud de cualquier cuenca. No obstante, el agua que fluye sobre la tierra a un sistema natural de drenaje, la pendiente del canal o cauce, la rugosidad hidráulica, el almacenamiento de canal o la longitud, el área impermeable, el volumen de infiltración y la morfología de la cuenca, afectan la forma de la cuenca. Las cuencas hidrográficas están estructuradas jerárquicamente, se subdividen en una o más subcuencas y varias microcuencas, desde el punto de vista espacial se considera que la cuenca abarca un territorio mayor a 50,000 hectáreas, mientras que una

subcuenca, entre 5,000 y 50,000 y una microcuenca menos de 5,000 hectáreas (IMTA, 2019). Al interior de cada subcuenca se ubican las microcuencas, cuyos límites pueden incluir o no límites administrativos, como los de un ejido o un municipio (Cotler *et al.*, 2013). La elección de los niveles jerárquicos dependerá de los objetivos, de los problemas a resolver, así como del manejo y gestión que se haga de la cuenca.

Ecosistema de montaña

Los ecosistemas montañosos, constituyen un tercio de toda la cubierta forestal natural del mundo, son definidos en primer lugar por la pendiente, la elevación de las montañas, la altitud y proximidad de los océanos para caracterizar el clima (Cabrera *et al.*, 2019). Poseen casi todo el año agua suficiente para mantener una alta riqueza de especies y de endemismos en el país; las condiciones climáticas favorables derivadas de la suficiencia de agua en estas regiones permiten el establecimiento de diversos tipos de vegetación (Cruz-Flores y Guerra-Hernández, 2017).

Están entre los ecosistemas más importantes del mundo ya que proporcionan numerosos e importantes beneficios ecológicos, hidrológicos, sociales y económicos, como la protección y fertilidad de suelos, el control de la erosión, la transferencia de biomasa, la purificación del agua y aire, el suministro de productos para la vida humana, actividades recreativas, turísticas y desarrollo rural (Moon y Solomon, 2019), también forman parte del paisaje cultural el cual les otorga una identidad a las comunidades nativas.

Los bosques de montaña son un componente clave de la gestión integrada de las cuencas hidrográficas, ya que ayudan a proteger y regenerar el suelo, reducir la concentración de sedimentos aguas abajo, así como a almacenar altas cantidades del agua de lluvia infiltrada y coadyuvando a la reducción de las tasas de escorrentía, gracias a esa capacidad de infiltración de los suelos ribereños. En definitiva, estos ecosistemas desempeñan un papel vital para garantizar la calidad y cantidad de los flujos de agua dulce. Sin embargo, es importante destacar que la capacidad de un bosque de montaña para cumplir estas funciones de protección dependerá de su estructura, densidad, salud, y riqueza de especies y edades.

Ecosistemas ribereños

La zona riparia o ribereña es la región de transición e interacción entre los medios terrestre y acuático, estas áreas sostienen ecosistemas que son muy productivos en biomasa animal y vegetal, se caracterizan por una flora y fauna de gran diversidad, cuya composición está fuertemente determinada por la intensidad luminosa, el contenido en agua y la granulometría del suelo (Granados-Sánchez *et al.*, 2006).

Al encontrarse entre ambientes acuáticos y terrestres, poseen características singulares y desempeñan funciones primordiales (Fernández *et al.*, 2009), como servicios ecosistémicos beneficiosos para el bienestar social, entre ellos los servicios de producción, de regulación (hídrica, microclimática, retención y formación edáfica, buffer biológico), de información y de hábitat, entre otros (Nahuelhual y Núñez, 2011).

Actualmente, las zonas ribereñas están dentro de los ecosistemas más amenazados a nivel global, lo que se evidencia a través de la pérdida de la cobertura vegetal, generando la degradación de los cuerpos de agua y afectando sustancialmente las funciones, servicios y bienes que estos ecosistemas proporcionan (Muotka & Laasonen, 2002). Las múltiples funciones ambientales de la vegetación ribereña realzan su utilidad como un buen indicador en la gestión y planificación territorial, permitiendo su inclusión como elemento clave para la calificación del estado ecológico de los ecosistemas acuáticos (Carrasco *et al.*, 2014).

La expansión de actividades agrícolas hacia los suelos fértiles de las zonas de ribera, la sobreextracción de aguas y desvió de cauces, el saqueo de plantas medicinales, alimenticias, ornamentales y la extracción de madera; hacen que los hábitats ribereños ya no presenten su vegetación original y estén entre los ecosistemas más transformados de México (Gerritsen *et al.*, 2005).

Función de los ecosistemas ribereños

La naturaleza cuenta con un sistema de amortiguamiento llamado resiliencia que le ayuda a resistir los cambios bruscos en el ambiente, por concepto “se refiere a la capacidad de los ecosistemas y/o comunidades para regresar al su estado original después de un cambio en su dinámica”; sin embargo, con el paso del tiempo le será

imposible al ecosistema recuperarse de los impactos acumulativos que se generen, por lo que es importante tener en cuenta que los recursos naturales no son eternos (Cuevas, 2010).

La vegetación ribereña funciona como corredor biológico, proporcionando diversos servicios ecosistémicos: regula la entrada de luz, la temperatura y oxigenación del agua; aporta materia orgánica al río y tiene gran incidencia sobre la forma del cauce, al limitar la erosión de sus márgenes (Elosegi & Díez, 2009); cumple importantes funciones de filtrado, reteniendo sedimentos, contaminantes y nutrientes, favoreciendo la calidad del agua (Karmakar *et al.*, 2019) y frenando su eutrofización.

Estos sistemas vegetales funcionan como complejas fuentes sustentadoras de biodiversidad, a través de los patrones sucesionales y disposiciones verticales en estratos, además de ser reservorios genéticos de las especies que los ocupan debido al gran número de hábitats y microhábitats (Granados-Sánchez *et al.*, 2006), que conforman estos ecosistemas riparios, en ellos diversas especies vegetales y animales desarrollan de manera total o parcial su ciclo de vida.

En conclusión, la vegetación cumple con un gran número de funciones que ayudan a mantener la estabilidad y el correcto funcionamiento del intercambio de materia y energía cuenca arriba-cuenca abajo. Zonas ribereñas bien preservadas pueden proveer de valiosos servicios ecosistémicos, sin embargo, la pérdida y degradación de la vegetación natural, así como la velocidad a la que están ocurriendo estos cambios, compromete dichos beneficios en las cuencas, como la estabilización del suelo, la regulación del volumen y periodicidad de los caudales y la purificación e infiltración del agua (Cuevas, 2010).

Río

Los ríos son sistemas de agua con movimiento constante unidireccional sobre la superficie terrestre; se reabastecen de agua con la precipitación y los escurrimientos superficiales, los mantos freáticos y el deshielo de las altas montañas. En México, los ríos constituyen una red hidrográfica de 633,000 km de longitud, donde fluyen aproximadamente 399 km³ de agua cada año (CONAGUA, 2011). Se consideran de gran

importancia en el planeta, al ser esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas, estos sistemas fluviales, albergan gran diversidad de especies animales y vegetales; desempeñan un papel fundamental desde el punto de vista ecológico y es necesario atender los problemas relativos a su integridad, sostenibilidad y a la supervivencia de especies (Aguilar, 2003).

Estos sistemas lóticos se mantienen conectados, lo que permite el movimiento de los componentes físicos, químicos y sobre todo biológicos (fauna y flora) a todos los hábitats que conforman el paisaje y que los organismos requieren para las etapas de su ciclo de vida (Taylor et al., 1993). Esta conectividad, se mantiene siempre y cuando el flujo de materia y energía permanezca constante, para que se lleven a cabo distintos procesos necesarios para la dinámica del río, la cual deberá conservarse a través de las vías de flujo.

Dentro de los servicios que brinda se encuentra la regulación del clima, la fertilidad de los suelos, el control de inundaciones, la purificación del agua, la conservación de la biodiversidad y la estabilidad a los ecosistemas, entre otros (Mendoza *et al*, 2014). El uso intensivo de los ríos pone en riesgo su integridad ecológica, relacionada con la calidad y el funcionamiento del ecosistema asociado al agua superficial, las condiciones naturales del entorno y las presiones humanas, que los afectan negativamente (Stoddard *et al.*, 2006), los efectos más visibles de la alteración de la salud de los ecosistemas acuáticos son la pérdida de la calidad del agua, la belleza escénica y la biodiversidad.

Uso de suelo

Los diferentes usos en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal se conocen como usos del suelo (SEMARNAT, 2010). El conocimiento de la cobertura y uso del suelo constituye uno de los aspectos más importantes para el ordenamiento territorial (Aguayo *et al.*, 2009), por su influencia en la formación y evolución de los suelos, así como en el impacto sobre la provisión de servicios ecosistémicos (Farley, 2007). A escala local, estos cambios inducen el deterioro y degradación de suelos, así como modificaciones en nichos ecológicos y resiliencia de los componentes ambientales

(Nájera *et al.*, 2010). Los cambios en la cobertura vegetal propician la disminución de las aportaciones hídricas debido a la pérdida de su capacidad de infiltración ocasionando impactos negativos en la disponibilidad y recarga de este recurso. Desde el punto de vista geográfico, los diferentes usos de suelo y su grado de explotación influyen en las variedades del paisaje (Fernández Núñez y Prados Velasco, 2010). De esta forma, la estructura que tiene el suelo en conjunto con otros factores, como los ambientales, demográficos, económicos y socioculturales (Bocco, 2001) provocan la conservación o deterioro de la calidad del agua que circula dentro de la cuenca.

El uso correcto del suelo es un factor determinante para mantener la sostenibilidad de los sistemas productivos, sin embargo, debido a la presión que existe sobre el recurso para fines agrícolas, la expansión e intensificación de la frontera agrícola ha causado crecientes procesos de deforestación a nivel nacional (IARNA, 2003). Esto implica transformaciones del territorio, por la pérdida y reemplazo de la vegetación natural, alterando el equilibrio del ciclo hidrológico lo que puede conllevar a inundaciones, aumento de los niveles de contaminación, modificación en los patrones de flujo y destrucción o degradación del ecosistema (Postel y Thompson, 2005; Wang *et al.*, 2008).

Degradación del suelo

La degradación del suelo implica la pérdida del hábitat de diversas especies, así como de su productividad (FAO, 2015). Los suelos pueden ser más vulnerables dependiendo de las condiciones de cada sitio, sin embargo, en gran medida la degradación se debe a diversos factores ambientales, sociales y económicos relacionados entre sí (Castro *et al.*, 2012).

La degradación del suelo como un proceso inducido por el ser humano influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas de este recurso. Con el paso del tiempo puede disminuir la capacidad de sus funciones actuales y futuras, de igual modo, se afecta la provisión de bienes y servicios hacia las personas y a los ecosistemas, convirtiéndose en un problema ambiental a diferente escala (local, regional y global), el cual va en aumento (Bautista, 2005).

Un criterio que ayuda a determinar el grado de degradación es la valoración de su calidad (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997). Cuando el suelo se encuentra en condiciones óptimas puede mantener vegetación, mejorar la calidad del agua, almacenar y reciclar nutrientes, así como filtrar, amortiguar, degradar e inmovilizar contaminantes. El 45.2% de la superficie del país presenta degradación inducida por el hombre, el nivel predominante es de ligero a moderado, mientras que los procesos con mayor impacto son la degradación química (principalmente por la pérdida de fertilidad), la erosión hídrica y eólica (SEMARNAT-COLPOS 2003).

Calidad de agua

El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente. Dado que el agua es indispensable para la vida, la gestión eficaz de los recursos hídricos requiere un enfoque integrado que concilie el desarrollo económico y social y la protección de los ecosistemas naturales. La vigilancia de la calidad del agua es una función esencial de salud, forma parte de la evaluación de riesgos y es estratégica para el desarrollo de políticas públicas orientadas al desarrollo sostenible (Villena, 2018).

Desde el punto de vista ecosistémico, la calidad del agua hace referencia a las condiciones que debe presentar el sistema acuático para mantener un ecosistema equilibrado midiéndose de acuerdo a distintos parámetros químicos, físicos y biológicos mediante los cuales se cuantifica el grado de alteración de sus cualidades naturales y se clasifica para un uso determinado. Por ello, se considera una variable descriptiva del medio ambiente hídrico, desde el punto de vista de su caracterización ambiental, hasta la perspectiva de la planificación y gestión hidrológica, ya que delimita la aptitud del agua para mantener los ecosistemas y atender las diferentes demandas (De las Heras, 2013).

Uno de los factores que intervienen en la calidad del agua es el uso de suelo, debido a que la agricultura, la industria, la urbanización y la deforestación representan las principales fuentes de contaminación. Muchas actividades en la superficie de las cuencas también repercuten en el agua subterránea (Saldívar, 2007). Su gestión eficaz

establece una relación entre el uso del suelo y el aprovechamiento del agua en la totalidad de una cuenca o acuífero (Villena, 2018).

Calidad de agua en México

Las propiedades químicas, físicas y biológicas de los sistemas acuáticos determinan su calidad. A pesar de que no existe oficialmente un índice estandarizado para el agua que se aplique a nivel nacional, hay parámetros que ayudan a determinar, de acuerdo con su concentración, los límites máximos que debe contener un cuerpo de agua para que no represente un riesgo ambiental y social (Ibarrarán *et al.*, 2017).

En México los parámetros de mayor manejo para evaluar la calidad del agua se integraban en un índice de calidad que consideraba alcalinidad, coliformes fecales, conductividad, dureza, pH, sólidos suspendidos y disueltos, fósforo, nitrógeno, DBO5, oxígeno disuelto, entre otros. Este criterio se modificó en 2001 y actualmente se usa un nuevo índice con dos parámetros: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y la demanda química de oxígeno (DQO), los cuales permiten reconocer gradientes de agua en condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana, hasta indicios o aportaciones importantes de aguas residuales de tipo doméstico, industrial o una mezcla de ambas (CNA, 2008).

La calidad y la disponibilidad del agua de los ríos en México es un tema de gran relevancia para el desarrollo regional y nacional, sin embargo, los problemas en el sector son graves. Esto se debe a que en el país sólo se trata el 20% de las aguas residuales; esto significa que la mayoría de éstas se vierten sin tratamiento ocasionando contaminación, reduciendo la disponibilidad de agua limpia (SEMARNAT, 2005). Peña Ramírez (2004) indica que entre las industrias más contaminantes se encuentran la del papel y celulosa, la química y petroquímica, la de pinturas y la refresquera.

En México se han promulgado leyes para la protección del agua e implementado planes y proyectos para regular la contaminación, y en ellos se establecen medidas específicas a partir de la identificación de los problemas que en la actualidad contaminan más el agua. El objetivo principal es mejorar el funcionamiento de las instituciones, ampliar la cobertura de servicios como alcantarillado y el acceso al agua potable, así como

imponer una penalización a las personas físicas o morales que infrinjan las leyes y ocasionen contaminación (Ibarrarán *et al.*, 2017).

Calidad de agua internacional

La Organización Mundial de la Salud (OMS), elabora Guías para la calidad del agua de consumo humano, que proporcionan recomendaciones para gestionar el riesgo de los peligros que pueden comprometer la seguridad del agua de consumo humano. Muchos países a nivel internacional han adoptado los valores guía de la OMS como valores específicos para sus normas nacionales (OMS, 2018).

Para definir límites obligatorios es preferible considerar los valores de referencia en el contexto de las condiciones locales o nacionales de tipo ambiental, social, económico y cultural. El motivo principal para no promover la adopción de normas internacionales sobre la calidad del agua de consumo es que es preferible crear normas y reglamentos nacionales basados en un método de análisis de riesgos y beneficios. Además, el mejor modo de aplicar las guías es por medio de un marco integrado de gestión preventiva de la seguridad, aplicado desde la cuenca de captación hasta el consumidor (OMS, 2006).

Degradación de la calidad del agua

La calidad de cualquier cuerpo acuático superficial o subterráneo está en función de los procesos naturales y las actividades humanas que se llevan a cabo a lo largo del sistema. Sin la influencia humana, la calidad del agua sería determinada por la meteorización del material geológico, por procesos atmosféricos de evapotranspiración, lixiviación de materia orgánica y nutrientes del suelo, escorrentía, procesos biológicos dentro del medio acuático, además de factores hidrológicos determinados que modifican la composición física y química del agua (PNUMA, 2008).

Muchas actividades económicas están ligadas a los ecosistemas acuáticos, de modo que la contaminación de cuerpos de agua río arriba repercute río abajo y en consecuencia las actividades dependientes de una buena calidad del agua corren el riesgo de reducir su potencial productivo (Saldívar, 2007). La agricultura es uno de los factores que ha propiciado la erosión del suelo, provocando la degradación de la calidad del agua, por

el aumento de material particulado que entra a los ecosistemas acuáticos, por otra parte, la carga elevada de nutrimentos acelera el proceso de eutrofización.

Planteamiento del problema

La Subcuenca del Río Nexapa, se encuentra ubicada en la Región Hidrológica 18, del río Balsas (subregión alto Balsas), cuenca del Atoyac. La corriente superficial más importante es el río Nexapa que nace en la vertiente oriental del volcán Iztaccíhuatl, la distribución de la vegetación dentro de esta área es muy diversa y pertenece a la Reserva de la Biosfera los Volcanes, se puede encontrar desde pastizales de alta montaña y bosques de pino, hasta suelos agrícolas y zonas urbanas en la parte baja del río. En esta zona se desarrollan actividades como: la minería, la agricultura, la ganadería y el turismo las cuales generan cambios en el uso de suelo, así como en el intercambio de materia y energía, de modo que la dinámica del ecosistema se verá modificada, provocando el deterioro del suelo, agua y vegetación en la cuenca.

Hipótesis

La intervención antrópica y el crecimiento económico e industrial dan lugar a diversos cambios entre los que se encuentran la incorporación de aguas residuales a los ríos, la modificación del uso de suelo y la pérdida de la vegetación ribereña, lo que provoca el aumento de nutrientes, sólidos y DQO, así como la disminución del oxígeno disuelto, provocando que el agua no sea apta para consumo ni uso, debido a la pérdida de su calidad.

Objetivo general

Evaluar y determinar la variación espacio temporal de los parámetros físicos y químicos del agua en diferentes condiciones de uso de suelo en la subcuenca del río Nexapa.

Objetivos particulares

- Identificar los usos de suelo en cada uno de los sitios de estudio.

- Evaluar el comportamiento limnológico a través de parámetros físicos (temperatura, área, velocidad) y químicos (pH, sólidos disueltos, sedimentables, DQO, oxígeno disuelto, sulfuros y sulfatos) del agua, en diferentes condiciones de uso de suelo.
- Determinar el comportamiento de las formas inorgánicas del nitrógeno (nitratos, nitritos, amonio) y fósforo (ortofosfatos, fósforo total) presentes en el agua.

Método

Área de estudio

La subcuenca del Río Nexapa que se encuentra ubicada en la Región Hidrológica 18, correspondiente a la cuenca alta del río Balsas, dentro de la cuenca tributaria del río Atoyac. Comprende desde el nacimiento del Río Nexapa en la vertiente oriental del volcán Iztaccíhuatl, es de régimen permanente alimentado en su porción alta por los deshielos del volcán (Navarro *et al.*, 2007), tiene una superficie de aportación de 4,214.25 km².

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP) se encuentra en la parte centro oriental del Eje Volcánico Transversal, ocupa una parte sustancial de la Sierra Nevada. Se localiza entre las coordenadas 18°59'00.43" y 19°28'09.44" de Latitud Norte y 98°34'55.88" y 98°46'40.95" de Longitud Oeste. Su rango altitudinal va desde los 3 mil a los 5 mil 480 metros sobre el nivel del mar. Abarca una superficie de 39 mil 819.086 hectáreas dividida entre los Estados de México, Puebla y Morelos (CONANP, 2013).

La Sierra Nevada se encuentra rodeada en su mayor parte por asentamientos humanos por debajo de la cota altitudinal de los 2500 m s.n.m., posteriormente se encuentra una zona de transición con presencia de actividades agrícolas y pecuarias que va desde los 2300 a los 3000 m s.n.m., donde se nota poca vegetación natural. Una tercera zona que corresponde al uso de suelo forestal que inicia a los 3000 m s.n.m. y una última zona que se encuentra por arriba de los 3600 m s.n.m. hasta la cumbre de ambos volcanes (CONANP, 2013).

Trabajo de campo

El estudio se realizó dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y zonas aledañas pertenecientes al estado de Puebla, específicamente en los municipios de San Nicolás de los Ranchos, Nealtican y Santa Isabel Cholula, en los que se presentan diferentes usos de suelo. Se establecieron 8 sitios de muestreo, tres dentro del parque y cinco más en zonas de influencia, en los que se realizaron muestreos bimensuales, discrepando entre épocas de lluvia y estiaje en los meses de agosto de 2019 a febrero de 2020.

Para cada localidad se obtuvieron datos de georreferencia y uso de suelo dominante, de manera paralela y antes de la toma de muestras, se realizó la determinación de parámetros in situ como temperatura, pH, sólidos totales disueltos y oxígeno disuelto. Las muestras se tomaron superficialmente y fueron preservadas en refrigeración (4°C) para su transporte y posterior análisis.

Determinación de parámetros in situ

Temperatura

Es un factor determinante de la calidad del agua en el sistema hídrico, sus variaciones afectan la solubilidad de gases y sales, así como la precipitación de materia orgánica. Es una de las variables más significativas en los cuerpos de agua, sirviendo como indicador de la estabilidad ecológica del sistema. Las variaciones de este parámetro generan cambios en los cuerpos de agua, elevando el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas (Gualdrón, 2016). Se registró in situ, por medio de un oxímetro modelo YCI55.

pH

Es una escala numérica utilizada para especificar la acidez o alcalinidad de una solución acuosa, representada por el logaritmo negativo en base 10 de la actividad del ion hidrógeno. Este parámetro se ve influenciado por la naturaleza de los suelos en donde se ubica la cuenca. El intervalo para que se desarrolle la vida acuática varía entre el 6.5 a 9 unidades, en esta investigación se determinó con un multiparámetro Combo HANNA modelo HI-98129.

Sólidos totales disueltos (STD)

Son un conjunto de compuestos inorgánicos que se encuentran en el agua en forma sales, de metales pesados y de algunos compuestos orgánicos que se disuelven en el agua. Algunos de estos compuestos o sustancias pueden ser esenciales para la vida, sin embargo, en grandes cantidades pueden llegar a ser tóxicos (Severiche, 2013). Su medición se realizó en campo mediante un conductímetro combo Hanna modelo HI98129.

Oxígeno disuelto (OD)

Es indispensable para la vida acuática y depende de las condiciones ambientales; en un cuerpo de agua se produce y a la vez se consume oxígeno, su producción está relacionada con la fotosíntesis, mientras el consumo dependerá de la respiración, descomposición de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas, también puede intercambiarse oxígeno con la atmósfera por difusión, por lo que la concentración total de OD dependerá del balance entre todos estos fenómenos (CORTOLIMA, 2000). Se determinó in situ, por medio de un oxímetro modelo YSI-55.

Caudal

Corresponde al volumen de agua que pasa por un lugar en cierta cantidad de tiempo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). Para realizar su cálculo, primero se midió el ancho, la batimetría y la velocidad del cauce, posteriormente se obtiene el área de este y es multiplicada por la velocidad.

Trabajo de laboratorio

Sólidos sedimentables (ss)

Es la cantidad de sólidos de una muestra de agua que se depositan en el fondo después de un periodo de tiempo en condiciones estáticas (Carrillo, 2021). La determinación de este parámetro se llevó a cabo mediante el uso de conos Imhoff, empleando una muestra de un litro, la cual se dejó sedimentar por dos horas, para finalmente obtener el volumen de sólidos (mL L^{-1}) (NMX-AA-004-SCFI-2013).

Nitratos

Son la forma más oxidada del nitrógeno, las concentraciones encontradas en el agua son resultado del contacto y disolución de las rocas del subsuelo por donde pasa el agua

subterránea. El nitrato es un indicador de la calidad del sistema, que se encuentra relacionado con el ciclo del nitrógeno en suelo y plantas superiores (Pacheco y Cabrera, 2003). Para la determinación se utilizó el método del ácido fenoldisulfónico que reacciona con el nitrato produciendo un compuesto de color amarillo, la intensidad de este será proporcional a la concentración de nitratos (NMX-AA-079-SCFI-2001).

Nitritos

Son la forma más inestable dentro del ciclo del nitrógeno, pues su química lo hace muy reactivo, al ser el estado intermedio en la oxidación, se encuentran en bajas concentraciones, su presencia es indicativa de contaminación fecal reciente (Arredondo, 1986; Romero et al., 1992). Se determinaron por el método del ácido sulfanílico, que se basa en la formación de un compuesto color púrpura rojizo, producido a pH 2-2.5 por unión de ácido sulfanílico con el clorhidrato de naftilamina (NMX-AA-154-SCFI-2011).

Amonio

El nitrógeno amoniacal, se encuentra naturalmente en trazas, es decir en pequeñas cantidades, pues si estuviera en valores elevados significaría contaminación por materia orgánica (Robles *et al.*, 2004). El análisis se realizó mediante el método de fenato el cual se fundamenta en la reacción entre el amonio, hipoclorito de sodio y el fenol, produciendo un compuesto de color azul (APHA-AWWA-WPCF 1992).

Ortofosfatos

Son nutrientes esenciales para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de agua puede estimular el crecimiento de micro y macroorganismos acuáticos fotosintéticos en cantidades nocivas (APHA, 2005). Se empleó el método de fosfomolibdato, que transforma a los ortofosfatos en un complejo de color azul, como resultado de la reacción del fosfomolibdato con el molibdato de amonio (APHA-AWWA-WPCF 1992, NMX-AA-029-SCFI-2001).

Fósforo total

El fósforo es uno de los nutrientes fundamentales de todos los seres vivos, de forma que, altas concentraciones de estos en el agua pueden producir un crecimiento

incontrolado de la biomasa acuática (Aznar, 2000). Este parámetro se determinó con el método de digestión con persulfato, en el cual las diferentes formas de fósforo son hidrolizadas a fosfatos por tratamiento con ácido, calentamiento y presión, finalmente se aplica el método de fosfomolibdato (NMX-AA-029-SCFI-2001).

Sulfuros

Su presencia es indicativa de condiciones reductoras en el medio acuático o de la actividad volcánica cercana (Guerra-Hernández, 2020). El análisis se realizó con el método yodométrico, que se basa en la reacción del yodo con sulfuro en solución ácida, oxidándose hasta azufre (APHA-AWWA-WPCF 1992), la muestra se fijó en campo con acetato de zinc.

Sulfatos

El ion SO_4^{2-} , es uno de los más frecuentes en la naturaleza, generalmente se depositan en las aguas naturales. Las concentraciones que se pueden encontrar en el agua dulce son muy variables y dependen del suelo en el que se encuentre el río (APHA, AWWA Y WEF, 2012). Para su determinación se utilizó el método turbidimétrico, en el que, el ion sulfato precipita con cloruro de bario, en medio ácido, formando cristales de sulfato de bario, que causan cierto grado de turbidez en la solución proporcional a la concentración de sulfatos (APHA-AWWA-WPCF 1992).

Demanda química de oxígeno (DQO)

Este parámetro indica la cantidad de oxígeno ($mg L^{-1}$) que es consumido en la oxidación de materia orgánica y materia inorgánica. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales, proporciona información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales. Su análisis se efectuó con el método colorimétrico de reflujo cerrado, en el que se utiliza dicromato de potasio y ácido sulfúrico como reactivo oxidante (APHA, 2005).

Uso de suelo

Respecto a los sitios de muestreo estos fueron determinados con ayuda del mapa de uso de suelo y vegetación de INEGI 2019 y la clasificación presentada por Guerra (2020), además de considerar su altitud y distribución en el afluente. Una vez en campo

y tomando en cuenta las características generales de cada punto se realizó la caracterización de cada uso de suelo.

Trabajo estadístico

Con los datos obtenidos a partir del muestreo de agua en los diferentes puntos de estudio, se realizó una base de datos con ayuda del software Microsoft Office Excel. Posteriormente se elaboró una correlación de Spearman empleando los valores de cada uno de los parámetros, con el objetivo de seleccionar aquellas variables que presentaran mayor correlación. Subsecuentemente se llevó a cabo la comparación de las medianas por medio de la prueba de Kruskal-Wallis.

Resultados

Uso de suelo

Con base en la caracterización y los datos obtenidos en campo para cada uno de los sitios y de acuerdo a la información previamente consultada se determinaron seis usos de suelo, en la tabla 1 se presenta un resumen de los puntos de muestreo y sus características generales, así como el uso de suelo asignado.

Tabla 1. Sitios de muestreo, descripción y uso de suelo

Sitio	Municipio	Altitud (m s.n.m.)	Orden de corriente	Material parental	Uso de suelo
Cascada (C)	Amecameca	4010	1	Andesita	Pradera de alta montaña (PM)
Vallecito (V)	Amecameca	3850	2	Andesita	Forestal- Pradera de alta montaña (FPM)
Apatlaco (A)	San Nicolás de los Ranchos	3650	3	Andesita	Forestal (F)
Buenavista (B)	San Nicolás de los Ranchos	3320	3	Andesita	Forestal- Recreativo (FR)
Xalizintla (X)	San Nicolás de los Ranchos	2580	4	Toba andesítica	Agrícola- Urbano (AU)
Nealtican (N)	Nealtican	2260	4	Toba andesítica	Agrícola- Urbano- Minero (AUM)
Sta. Isabel Cholula (S1)	Sta. Isabel Cholula	2040	5	Toba andesítica	Agrícola- Urbano (AU)
Sta. Isabel Cholula (S2)	Sta. Isabel Cholula	2040	5	Toba andesítica	Agrícola- Urbano (AU)

Pradera de alta montaña

Se localiza por encima de los 4000 m s.n.m., la presencia de árboles es mínima, siendo predominante el estrato herbáceo dado por la abundancia de gramíneas, el sitio se encontró conservado, a pesar del tránsito de alpinistas que visitan la zona (Figura 1). Géneros como *Agrostis*, *Bromus*, *Calamagrostis*, *Festuca* y *Muhlenbergia* se distribuyen en la zona (Rzedowski, 2006), los zacatales prosperan sobre laderas con pendientes pronunciadas.



Figura 1. Uso de suelo pradera de alta montaña.

Forestal-Pradera de alta montaña

El estrato arbóreo representado por *Pinus hartwegii* tienen mayor presencia, compartiendo espacio con herbáceas de distintos tamaños, sin embargo, debido a la altitud sigue predominando el zacatonal o pradera de alta montaña (Figura 2). Los pinares dominados por una sola especie pueden desarrollarse sobre pendientes pronunciadas y sobre peñascos, sin mayor intervención de otros elementos leñosos, por lo que prácticamente solo existe un estrato arbóreo, uno herbáceo y uno rasante (Leñero, 2004). Con relación al estrato arbóreo el bosque de *Pinus hartwegii* puede

tolerar temperaturas bajas, por lo que la altitud y condiciones de la zona facilitan su establecimiento. En cuanto al estrato herbáceo, Rzedowski (2006) reporta la presencia de gramíneas rígidas y amacolladas de los géneros *Calamagrostis*, *Festuca* y *Muhlenbergia* las cuales protegen el suelo y permite una buena infiltración.



Figura 2. Uso de suelo forestal-pradera de alta montaña

Forestal

En el área coexisten diferentes especies, en el estrato arbóreo *Pinus hartwegii* es la especie dominante, en los herbazales se pueden distinguir géneros como *Festuca* y *Muhlenbergia*, así mismo *Cirsium* y *Lupinus* son otros géneros que se distribuyen en la zona, pero en menor proporción (Figura 3), es importante mencionar que dentro del cauce del río se desarrollan hepáticas y musgos que crecen sobre las rocas. De acuerdo con Rzedowski (2006) el bosque de *P. hartwegii* constituye por lo general un piso altitudinal definido en las montañas, aun cuando su presencia está condicionada por la alta humedad, se ubican entre los 3300 y más de 3500 m de altitud, coincidiendo con el nivel usual del techo de nubosidad. Dentro del área natural el bosque de Pino se ubica entre los 3400 y 4000 m de altitud (CONANP, 2013) coincidiendo con el nivel usual del techo de nubosidad.



Figura 3. Uso de suelo forestal.

Forestal-recreativo

Este uso de suelo corresponde a un sitio cercano a un sendero con circulación vehicular, dentro de la zona se presenta un fraccionamiento de cabañas, donde se realizan actividades ecoturísticas y económicas relacionadas con la piscicultura; así como, las herbáceas y pastos siguen presentes impidiendo que el suelo quede expuesto a la erosión; sin embargo, sigue dominando el estrato arbóreo con organismos como pinos, encinos, y oyamel (Figura 4). En altitudes superiores a los 3000 m s.n.m. se extiende el bosque de pino-encino, donde destacan especies de los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Abies*, *Arbutus*, *Alnus*, *Salix* y *Buddleia* (Leñero, 2004). Estas comunidades vegetales con características de las zonas montañosas de México constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de áreas de clima templado y semihúmedo (Rzedowski, 2006), aunque algunos de ellos son indicadores de la perturbación del sistema. La gran biodiversidad y belleza natural de estos lugares las convierten en zonas de gran atractivo paisajístico,

donde se realizan diversas actividades ecoturísticas, culturales y deportivas, entre otras.



Figura 4. Uso de suelo forestal-recreativo

Agrícola-Urbano

La zona presenta vegetación secundaria, en el estrato arbóreo se registraron *Pinus teocote*, *P. ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *Quercus sp.*, *Arbutus xalapensis* abundante vegetación arbustiva y herbácea (Monfil, 2020). Sin embargo, este espacio está destinado a la producción agrícola, por lo que plantíos de maíz, frijol y calabaza se han integrado al paisaje lo que en conjunto con los asentamientos humanos y vialidades han modificado el suelo, la flora y la dinámica del ecosistema (Figura 5). El crecimiento urbano es un fenómeno que surge como consecuencia del crecimiento poblacional, y como tal, merece ser orientado de acuerdo con una planificación previa, de lo contrario su impacto en el medio ambiente resulta desfavorable (Concha, 2013), por otra parte, la agricultura puede ocasionar alteraciones altamente significativas, mientras no se

empleen practicas correctas durante el uso de fitosanitarios, aplicación de abonos, gestión de residuos, etc. Moreno *et al.* (2015), menciona que ambos ecosistemas, agrarios y naturales, intercambiarán materia y organismos intentando de este modo crear un equilibrio, por lo tanto, las alteraciones que soporte uno de los ecosistemas y los cambios que sucedan en el mismo terminarán afectando en mayor o menor grado al segundo



Figura 5. Uso de suelo agrícola-urbano.

Agrícola-urbano-minero

En esta zona se desarrollan actividades agrícolas principalmente la siembra de milpa (maíz, frijol y chilacayote o calabaza), lo que ha desplazado a la vegetación nativa, sin embargo, aún se tiene presencia de *pinos Pinus teocote* y *P. pseudostrobus*, *Buddleja*, *Ricinus communis* (higuerilla), *Prunus serotina*, *Wiganda urens*, entre otra gran variedad de arbustos y herbáceas (Monfil, 2020). El sitio se encuentra inmerso en un área de extracción pétreo de la cantera mediante el uso de explosivos, por lo que el paso continuo de vehículos, la presencia de basura en el río son solo algunas de las consecuencias del crecimiento poblacional, el cual ha generado la expansión urbana hacia estas áreas, combinando la habitación y las actividades agrícolas y extractivas (Figura 6).

La constante expansión urbana puede provocar cambios en el ecosistema tales como la conversión de áreas con vegetación natural en áreas cultivables y la construcción de viviendas, industrias, carreteras, etcétera, afectando a la flora y fauna. Respecto a la actividad minera, Arango-Aramburo (2012) explica que las explosiones a cielo abierto pueden producir alteraciones sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, tanto en calidad como en cantidad. Modifican el funcionamiento natural de los procesos de desplazamiento de materiales por erosión, arrastre y sedimentación. Por consiguiente, la eliminación de la capa vegetal, aunada a la suma de las actividades mineras y antrópicas dan como resultado la pérdida del ecosistema acuático.



Figura 6. Uso de suelo agrícola-urbano-minero.

Comportamiento hídrico

En la Tabla 2 y 3 se muestran los valores mínimo, máximo y promedio de los parámetros evaluados para cada uso de suelo, en época de lluvia y estiaje.

Tabla 2. Valores máximos, mínimos y promedio registrados en los diferentes usos de suelo en la época de lluvia. (MIN: mínimo, : promedio, MAX: máximo, D.E.: desviación estándar)

LLUVIA		USO DE SUELO					
PARAMETRO		PM	FPM	F	FR	AU	AUM
TEMPERATURA (°C)	MIN	5.8	7.9	5.2	9.2	12.6	15.2
	\bar{x}	6.12	8.08	7.33	10.25	16.9	16.85
	MAX	6.6	8.2	11.6	11.3	19.9	18.5
	D.E.	0.44	0.16	3.3	1.21	2.73	1.91
pH	MIN	6.3	6.6	6.9	7.1	7	7.3
	\bar{x}	6.54	6.84	7.06	7.25	7.4	7.3
	MAX	6.9	7	7.4	7.4	8	7.3
	D.E.	0.329	0.219	0.258	0.173	0.359	0
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (ppm)	MIN	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7
	\bar{x}	51.4	42.4	39.6	39.5	129	193
	MAX	59	48	40	40	188	193
	D.E.	10.40	7.668	0.516	0.577	62.167	0
OXÍGENO DISUELT (mg O ₂ L ⁻¹)	MIN	7.65	7.62	7.3	7.41	4.6	3.51
	\bar{x}	8.53	8.26	8.49	7.66	7.32	5.5
	MAX	9.08	8.69	9.09	7.96	8.4	7.5
	D.E.	0.744	0.586	0.924	0.282	1.27	2.304
CAUDAL (m ³ /s)	MIN	0.006	0.019	0.113	0.19	0.015	0.04
	\bar{x}	0.006	0.023	0.14	0.21	0.12	0.07
	MAX	0.007	0.028	0.19	0.23	0.59	0.1
	D.E.	0.001	0.005	0.041	0.024	0.177	0.037
SÓLIDOS SEDIMENTABLES (ml L ⁻¹)	MIN	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7
	\bar{x}	0.1	0.1	0.1	0.2	0.44	1.35
	MAX	0.1	0.1	0.1	0.3	1.4	2
	D.E.	0	0	0	0.115	0.388	0.751
NITRATOS (mg N-NO ₃ L ⁻¹)	MIN	0.001	0.001	0.001	0.003	0.023	0.116
	\bar{x}	0.083	0.01	0.125	0.065	0.209	0.393
	MAX	0.219	0.036	0.305	0.16	1.377	0.567
	D.E.	0.09	0.15	0.11	0.069	0.307	0.194
NITRITOS (mg N-NO ₂ L ⁻¹)	MIN	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	\bar{x}	0.001	0.001	0.001	0.001	0.17	0.007
	MAX	0.001	0.001	0.001	0.001	0.035	0.014
	D.E.	0	0	0	0	0.013	0.008
AMONIO (mg N-NH ₄ ⁺ L ⁻¹)	MIN	0	0.024	0.001	0.008	0.012	0.398
	\bar{x}	0.034	0.148	0.097	0.306	1.279	2.288
	MAX	0.089	0.397	0.258	1.028	2.872	5.603
	D.E.	0.047	0.165	0.11	0.486	1.041	2.442
FÓSFORO TOTAL (mg P-total L ⁻¹)	MIN	0.536	0.584	0.001	0.406	0.425	0.977
	\bar{x}	0.753	0.758	0.942	0.672	1.466	1.831
	MAX	1.314	1.229	0.654	1.251	2.82	2.686
	D.E.	0.317	0.268	0.281	0.395	0.813	1.208
ORTOFOSFATOS (mg P-PO ₄ ³⁻ L ⁻¹)	MIN	0.046	0.032	0.001	0	0.001	0.316
	\bar{x}	0.062	0.057	0.02	0	0.43	0.519
	MAX	0.076	0.08	0.056	0.045	0.894	0.716
	D.E.	0.014	0.02	0.024	0.064	0.307	0.227
SULFUROS (mg S-S ²⁻ L ⁻¹)	MIN	0.025	0.025	0.001	0.025	0.001	0.001
	\bar{x}	0.855	1.201	0.01	0.047	0.016	0.078
	MAX	1.986	1.986	0.025	0.112	0.112	0.199
	D.E.	0.836	1.074	0.012	0.044	0.027	0.096
SULFATOS (SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹)	MIN	0.001	0.001	5.534	0.001	0.001	6.72
	\bar{x}	5.575	0.042	8.437	6.83	20.86	30.18
	MAX	18.31	0.205	13.68	13.79	44.11	73.35
	D.E.	8.236	0.091	3.282	7.887	11.93	31.42
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (mg L ⁻¹)	MIN	4.1	0	8.21	4.1	12.3	57.47
	\bar{x}	8.8	3.77	11.49	6.3	46.5	80.8
	MAX	14.77	14.77	15.5	9.8	123.9	99.34
	D.E.	4.587	6.402	2.983	2.452	32.104	19.24

Tabla 3. Valores máximos, mínimos y promedio registrados en los diferentes usos de suelo en la época de estiaje. (MIN: mínimo, \bar{x} : promedio, MAX: máximo, D.E.: desviación estándar).

ESTIAJE		USO DE SUELO					
PARAMETRO		PM	FPM	F	FR	AU	AUM
TEMPERATURA (°C)	MIN	5	4.1	7	6.3	11.3	13.4
	\bar{x}	5	4.1	7	6.3	13.13	11.2
	MAX	5	4.1	7	6.3	15	15.2
	D.E.	0	0	0	0	0.416	0.173
pH	MIN	6.5	6.7	6.5	6.8	6.6	7.3
	\bar{x}	6.5	6.7	6.5	6.8	7.3	7.45
	MAX	6.5	6.7	6.5	6.8	7.8	7.6
	D.E.	0	0	0	0	0.416	0.173
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (ppm)	MIN	43	38	39	46	55	117
	\bar{x}	43	38	39	46	164.9	263.2
	MAX	43	38	39	46	220	365
	D.E.	0	0	0	0	58.146	104.992
OXÍGENO DISUELTO (mg O ₂ L ⁻¹)	MIN	8.7	7.96	7.73	7.84	5.46	2.6
	\bar{x}	9.01	7.96	7.73	7.85	9.5	3.7
	MAX	9.32	7.96	7.73	7.87	14.34	5.12
	D.E.	0.438	0	0	0.021	3.19	1.032
CAUDAL (m ³ /s)	MIN	0.006	0.019	0.11	0.19	0.015	0.04
	\bar{x}	0.006	0.02	0.14	0.21	0.12	0.07
	MAX	0.007	0.028	0.19	0.23	0.59	0.1
	D.E.	0	0	0	0	0.102	0.012
SÓLIDOS SEDIMENTABLES (ml L ⁻¹)	MIN	0.2	0.1	0.1	0.001	0.1	1.3
	\bar{x}	0.2	0.1	0.1	0.001	0.4	1.9
	MAX	0.2	0.1	0.1	0.001	0.7	3.2
	D.E.	0	0	0	0	0.298	0.893
NITRATOS (mg N-NO ₃ L ⁻¹)	MIN	0.046	0.029	0.067	0.056	0.39	0.117
	\bar{x}	0.072	0.032	0.156	0.059	0.537	0.419
	MAX	0.098	0.036	0.245	0.063	0.847	0.667
	D.E.	0.037	0.005	0.126	0.005	0.158	0.245
NITRITOS (mg N-NO ₂ L ⁻¹)	MIN	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	\bar{x}	0	0.001	0.001	0.001	0.05	0.002
	MAX	0	0.001	0.001	0.001	0.4	0.004
	D.E.	0	0	0	0	0.111	0.001
AMONIO (mg N-NH ₄ ⁺ L ⁻¹)	MIN	0	0.132	0.08	0	0.009	0
	\bar{x}	0	0.163	0.08	0	3.655	6.176
	MAX	0	0.194	0.08	0	8.836	18.69
	D.E.	0	0.044	0	0	3.452	8.517
FÓSFORO TOTAL (mg P-total L ⁻¹)	MIN	0.408	0.405	0.354	0.347	0.039	0.034
	\bar{x}	0.415	0.41	0.37	0.352	1.021	1.121
	MAX	0.422	0.416	0.386	0.357	3.187	3.571
	D.E.	0.01	0.008	0.023	0.007	1.224	1.313
ORTOFOSFATOS (mg P-PO ₄ ³⁻ L ⁻¹)	MIN	0.036	0.034	0.011	0.015	0.001	0.4
	\bar{x}	0.037	0.034	0.011	0.017	0.82	0.712
	MAX	0.039	0.034	0.011	0.019	1.571	0.997
	D.E.	0.002	0	0	0.003	0.559	0.263
SULFUROS (mg S-S ²⁻ L ⁻¹)	MIN	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	\bar{x}	0.001	0.001	0.001	0.001	0.63	0.676
	MAX	0.001	0.001	0.001	0.001	1.12	1.986
	D.E.	0	0	0	0	0.519	0.902
SULFATOS (SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹)	MIN	18.67	15.51	10.39	9.593	6.294	3.868
	\bar{x}	18.88	15.54	10.46	9.654	27.32	22.53
	MAX	19.09	15.58	10.52	9.716	45.44	38.42
	D.E.	0.305	0.043	0.088	0.087	11.902	13.5
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (mg L ⁻¹)	MIN	16.4	1.64	14.77	0.001	3.28	0
	\bar{x}	16.42	1.64	14.77	0.001	38.69	26.71
	MAX	16.42	1.64	14.77	0.001	97.28	45.37
	D.E.	0	0	0	0	37.756	20.309

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del comportamiento espacio-temporal de cada una de las variables analizadas.

Temperatura

La temperatura del agua condiciona de modo directo o indirecto los procesos que se llevan a cabo en el medio acuático, de modo que el régimen térmico de los ríos constituye uno de los parámetros más importantes para mantener el equilibrio en un ecosistema fluvial (Granados-Sánchez *et al.*, 2006). Los usos de suelo forestales y pradera de alta montaña (Fig. 7), registraron un intervalo térmico entre 4 y 7 °C para la época de estiaje, mientras que en la época de lluvia la temperatura fluctuó de 6 a 9.9 °C, ya que al ser una zona de alta montaña la variación de este parámetro es mínima (CORTOLIMA, 2011). Con respecto, a los usos de suelo agrícola, el agua presentó una temperatura promedio de 13°C en época de estiaje y 17 °C en lluvias, el aumento de temperatura del agua incrementa la solubilidad de sales y la velocidad de las reacciones metabólicas, acelerando la descomposición de la materia orgánica (Ayala, 2011)

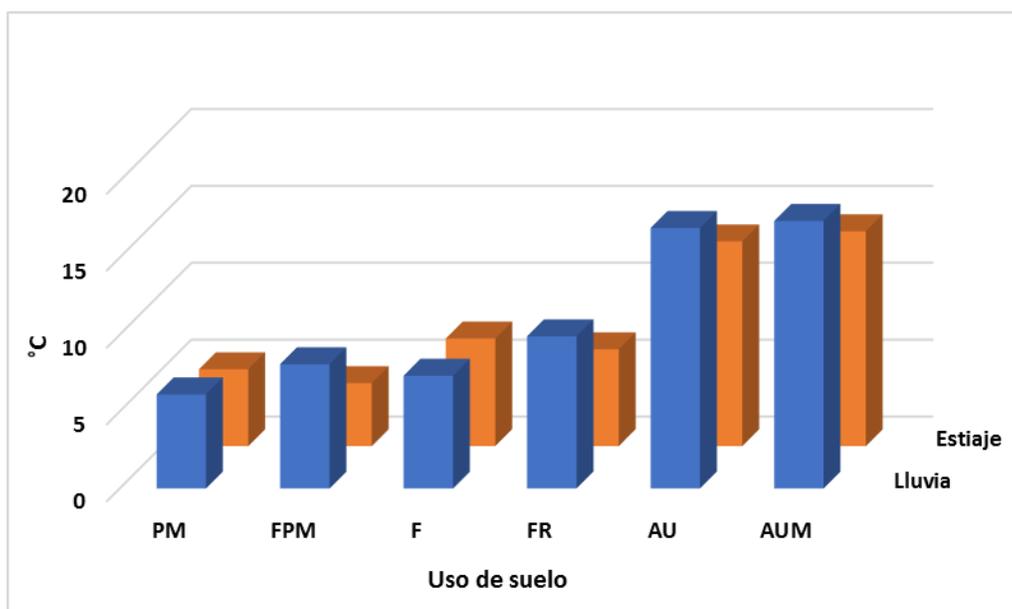


Figura 7. Promedio de la temperatura de cada uso de suelo en épocas de lluvias y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

pH

El pH del agua es un factor que influye en el comportamiento del resto de las variables químicas, principalmente los relacionados con la disolución y liberación de iones y nutrientes, por lo que se puede catalogar como una característica fundamental de la calidad del agua (Ayala, 2011). En los sitios con uso de suelo PM (Fig. 8) se mantuvo en un pH de 6.5 en ambas épocas, es decir con tendencia ligeramente ácida, para los usos de suelo forestales se registraron valores entre 6.5 y 6.8 en época de estiaje siendo más ácidos con respecto a la época de lluvia, en la cual los valores fluctuaron desde 6.8 y hasta 7.3 mostrando un comportamiento neutro, finalmente en los usos de suelo AU y AUM la variación entre épocas fue mínima (7.3 y 7.4). El pH del agua presenta poca variabilidad debido a la capacidad buffer del sistema, determinada por el equilibrio dióxido de carbono bicarbonato-carbonato (Wetzel, 2001; Segnini y Chacon, 2005).

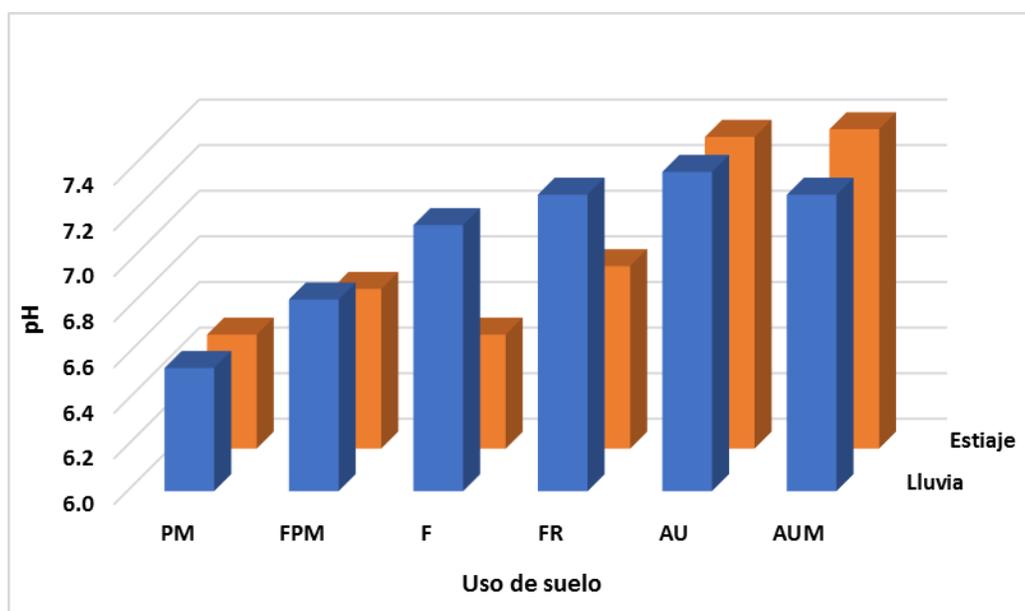


Figura 8. Promedio del pH en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Sólidos totales disueltos (STD)

La presencia de sólidos disueltos en el agua se debe a la presencia de minerales que se incorporan al agua a partir del intemperismo y lavado de rocas y suelo, partículas producto de descomposición de materia orgánica, metales y compuestos químicos orgánicos que dan olor, color, sabor y eventualmente toxicidad al agua que los contiene

(Jiménez, 2001). Los valores registrados de sólidos disueltos en los usos de suelo forestales y pradera se mantuvieron entre 38 y 51 ppm para ambas épocas, Roldán (2003) menciona que, para el caso de aguas naturales no contaminadas, las concentraciones de materiales disueltos suelen ser bajas. En contraste, los sitios con usos de suelo agrícolas (Fig.9) presentaron las concentraciones de STD más elevadas, en la época de estiaje. Los usos de suelo AU y AUM registraron valores de 164 y 263 ppm, mientras que en temporada de lluvia fueron de 129 y 163 ppm respectivamente. Los STD provienen de fuentes naturales, aguas residuales y escorrentías (OMS, 2006), en ambos sitios la concentración de sólidos fue mayor para la época de estiaje dado que la cantidad de agua en el sistema es menor y se da un proceso de concentración.

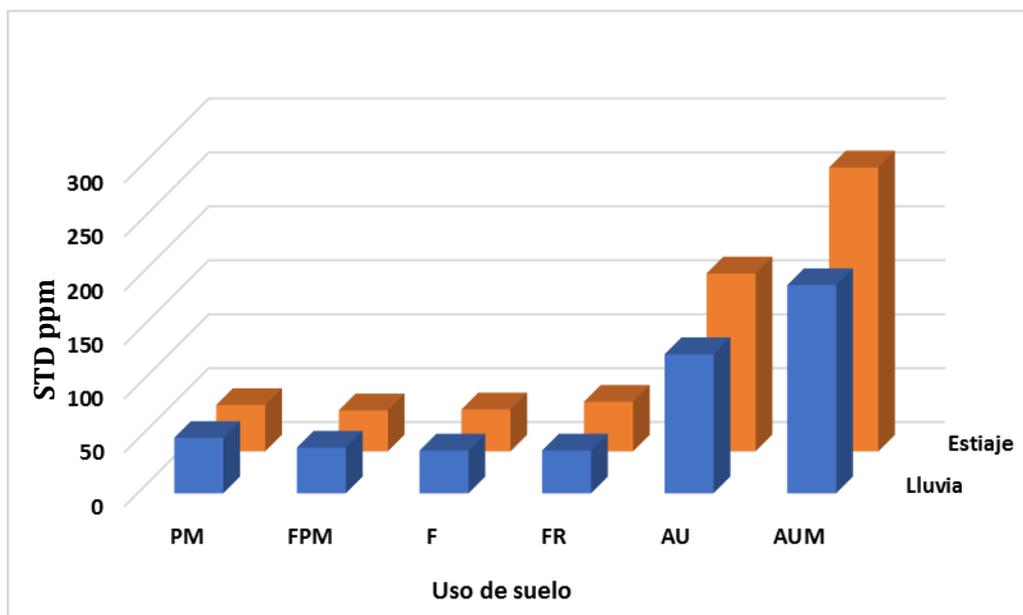


Figura 9. Promedio de STD en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Oxígeno disuelto (OD)

Los niveles de oxígeno disuelto en aguas naturales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema (APHA-AWWA-WPCF, 1992), en la figura 10 se observa que el OD presente en los usos de suelo PM, AU y forestales presentaron comportamientos similares, manteniendo valores entre 7.3 y 9.5 mg O₂ L⁻¹ en ambas

épocas, sobrepasando los valores mínimos requeridos en los sistemas lóticos de $6.2 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ (Segnini y Chacon,2005).

En contraparte, la concentración de oxígeno en el uso AUM descendió drásticamente hasta $3.2 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ en secas, alcanzando $3.5 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ en lluvias. Segnini y Chacon (2005) mencionan que, en los sitios con un alto grado de perturbación, los procesos de descomposición del material orgánico, demandan mayor cantidad de oxígeno de lo que se produce en el sistema, provocando que no se encuentre presente este elemento y la zona no sea apta para el desarrollo de actividades humanas.

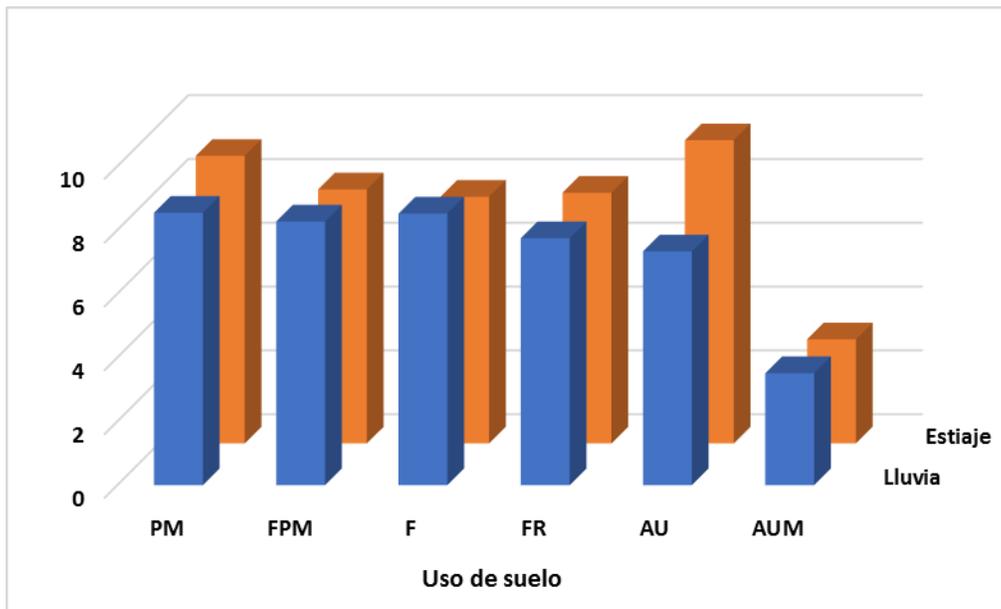


Figura 10. Promedio del oxígeno disuelto en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Caudal

El caudal, es una variable muy importante de los ríos puesto que define su morfología, estructura, diversidad biológica y las tasas de sus procesos ecosistémicos, la diversidad y abundancia de formas de vida en ríos (Encalada, 2010). En Apatlaco, Buenavista, Sta. Isabel 1 y 2 (Fig. 11) se observaron los mayores caudales para ambas épocas, mientras que, Cascada, Vallecito, Xalizintla; es posible observar una disminución durante la época de estiaje en todos los sitios, no obstante, la diferencia de caudal entre épocas es mayor

para B, S1 y 2. Los ríos y arroyos de alta montaña tienen una gran variabilidad estacional en su caudal, en este proceso intervienen las variaciones en el ciclo anual de la temperatura que regulan la fusión de la nieve, los cambios en la distribución estacional de la escorrentía y sobre todo la cantidad de precipitación que se incorpora a la cuenca (Boninsegna y Villalba, 2007).

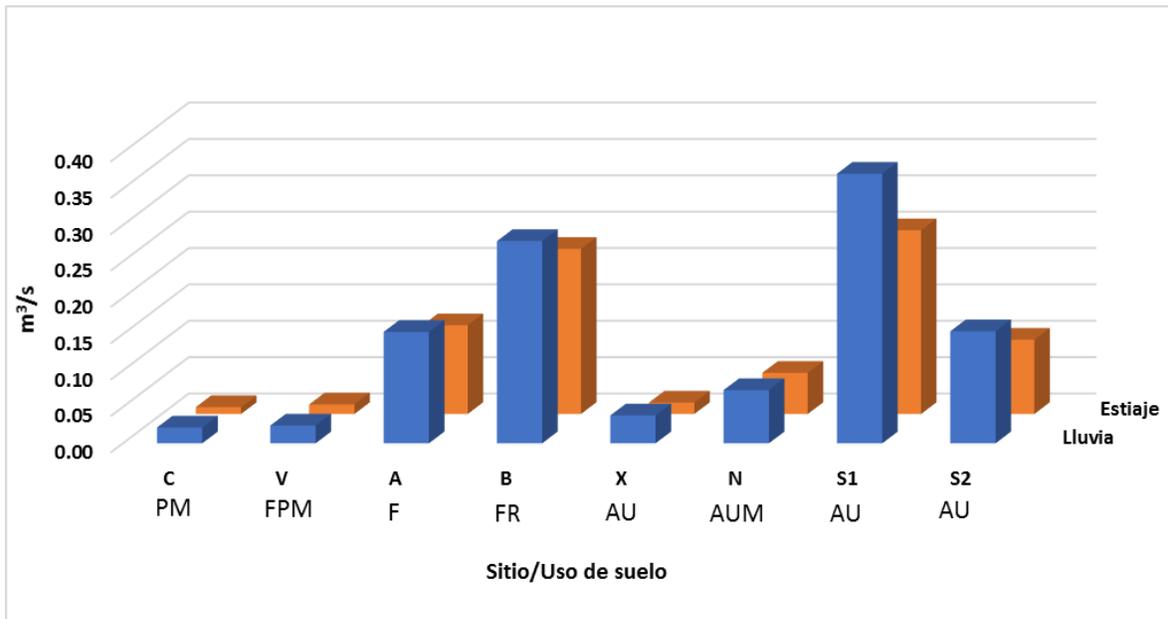


Figura 11. Promedio del Caudal de cada sitio de estudio y uso de suelo en las épocas de lluvias y estiaje.
C: cascada; V: vallecito; A: Apatlaco; B: Buenavista; X: Xalizintla; N: Nealtican; S1: santa Isabel principal y S2: santa Isabel tributario.

La obtención del caudal requiere de haber determinado previamente el perfil batimétrico que se modifica en función de la geomorfología, los procesos sedimentarios, de evaporación y precipitación y cambia constantemente, en la tabla 4 se presenta el perfil batimétrico representativo de cada sitio con sus respectivas características y época de muestreo.

Tabla 4. Perfil batimétrico de los usos de suelo de la subcuenca del río Nexapa.

Temporada	
Lluvia	Estiaje
Cascada Volkswagen/Pradera de alta montaña (PM)	
Área: 0.074 m ² Caudal: 0.0222 m ³ s ⁻¹	Área: 0.046 m ² Caudal: 0.0094 m ³ s ⁻¹
Vallecito/Forestal-Pradera de alta montaña (FPM)	
Área: 0.099 m ² Caudal: 0.0199 m ³ s ⁻¹	Área: 0.065 m ² Caudal: 0.031m ³ s ⁻¹
Apatlaco/Forestal (F)	
Área: 0.393 m ² Caudal: 0.1926 m ³ s ⁻¹	Área: 0.3438 m ² Caudal: 0.1219 m ³ s ⁻¹
Buenavista/Forestal-Recreativo (FR)	
Área: 0.6426 m ² Caudal: 0.3213 m ³ s ⁻¹	Área: 0.3244 m ² Caudal: 0.227 m ³ s ⁻¹
Xalizintla/Agrícola-Urbano (AU)	
Área: 0.1559 m ² Caudal: 0.01559 m ³ s ⁻¹	Área: 0.1579 m ² Caudal: 0.01579 m ³ s ⁻¹
Nealtican/Agrícola-Urbano-Minero (AUM)	
Área: 0.3513 m ² Caudal: 0.1053 m ³ s ⁻¹	Área: 0.2242 m ² Caudal: 0.0672 m ³ s ⁻¹
Santa Isabel Cholula-Nexapa I/Agrícola-Urbano (AU)	
Área: 0.5683 m ² Caudal: 0.1421 m ³ s ⁻¹	Área: 0.8013 m ² Caudal: 0.3205 m ³ s ⁻¹
Santa Isabel Cholula-Nexapa II/Agrícola-Urbano (AU)	
Área: 0.4323 m ² Caudal: 0.0432 m ³ s ⁻¹	Área: 0.4814 m ² Caudal: 0.1444 m ³ s ⁻¹

Sólidos sedimentables (SS)

En la figura 12 se puede apreciar que la mayoría de los usos de suelo presentaron concentraciones bajas de sólidos sedimentables, PM, FPM y el uso de suelo FR presentaron concentraciones por debajo de 0.2 ml L^{-1} en ambas épocas, para el caso de los usos de suelo AU permanecieron en 0.4 ml L^{-1} , estas concentraciones pueden reflejar no solo la buena calidad de agua, sino también, la conservación del corredor ribereño y sus funciones.

En contraste, el uso de suelo AUM registró una mayor presencia de sólidos, 1.6 ml L^{-1} en temporada de estiaje, mientras que en la época de lluvia la concentración disminuyó a 1.1 ml L^{-1} . La normativa mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) señala que los SS no deberán sobrepasar los 2 ml L^{-1} , bajo esta perspectiva podemos apreciar que ninguno de los usos antes mencionados supera este límite.

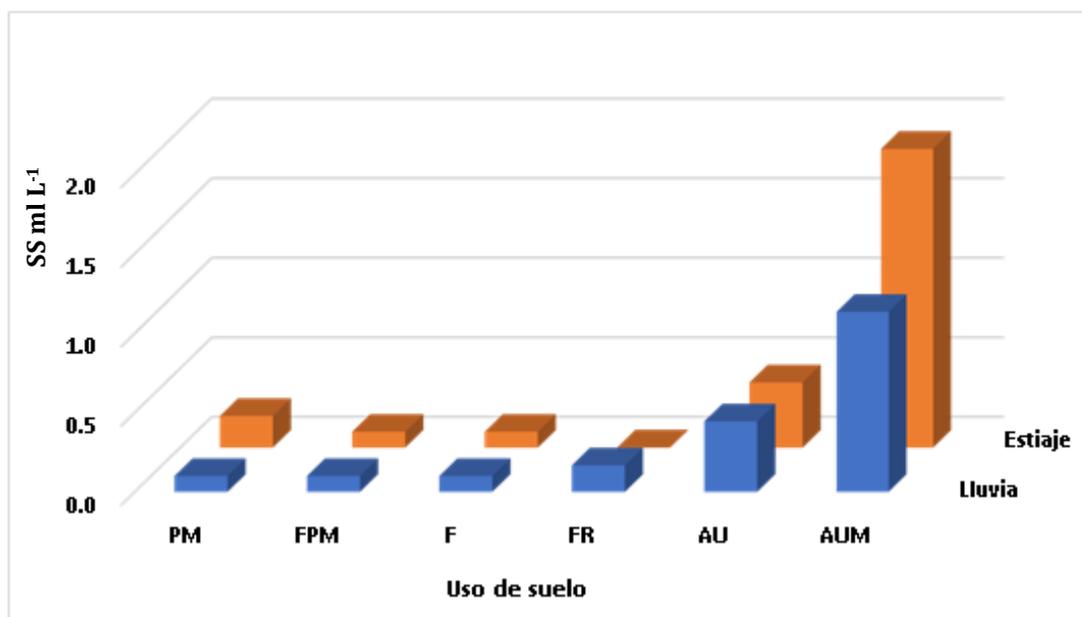


Figura 12. Promedio de los SS en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero

Nitratos

La presencia de nitratos (Fig.13) fue mínima para el uso de suelo FPM registrando $0.01 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ en temporada de lluvia y $0.032 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ en época de estiaje, seguido de los usos FR, PM y F donde la concentración de esta forma de nitrógeno aumentó en este mismo orden, de 0.083 a $0.125 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ en lluvia y 0.059 a $0.156 \text{ mg N-NO}_3^-$

L⁻¹ en estiaje. El nitrato es la forma principal del nitrógeno que se presenta en las aguas naturales, representa la fase más oxidada del ciclo y se encuentra generalmente a nivel de trazas en el agua superficial (Colín, 2001). La concentración de nitrato en aguas superficiales suele ser baja, pero puede incrementar debido a la filtración escorrentía de tierras agrícolas donde son utilizadas cantidades excesivas de fertilizantes, lo cual se aprecia en los usos agrícolas, donde los valores fueron más altos, en el uso de suelo AU se registraron 0.209 mg N-NO₃⁻ L⁻¹ en lluvia y 0.538 mg N-NO₃⁻ L⁻¹ para secas, en AUM el comportamiento fue similar con 0.331 y 0.420 mg N-NO₃⁻ L⁻¹ respectivamente, esto podría deberse a la presencia de desechos animales y domésticos que se integran al río (OMS, 2006), por ello Pacheco y Cabrera (2003) señalan a este anión como un indicador de contaminación ambiental de origen humano.

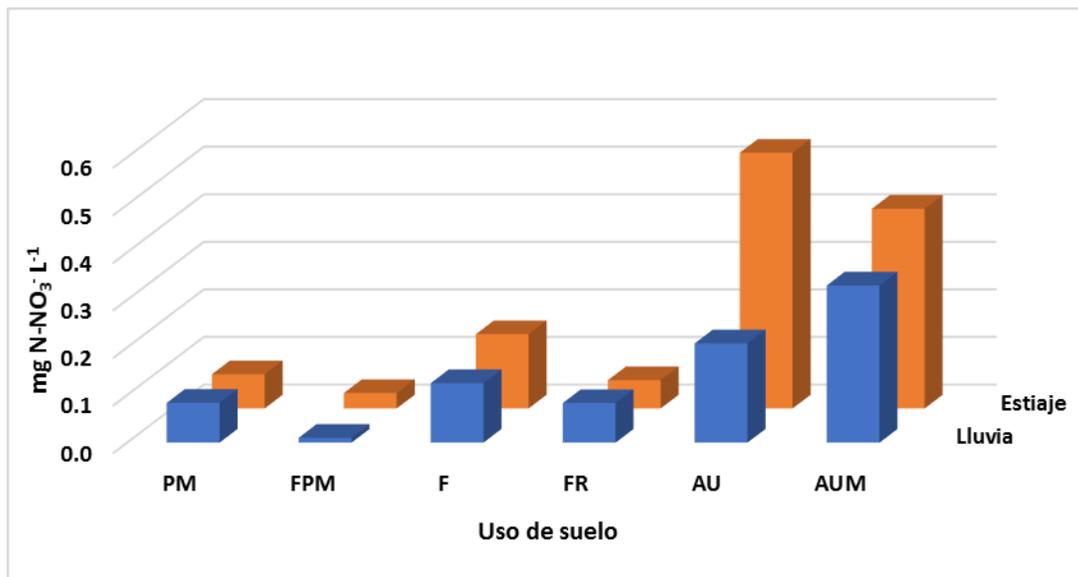


Figura 13. Promedio de los nitratos en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Nitritos

La concentración de nitritos (Fig.14) fue detectada en temporada de lluvia para todos los usos, mientras que en época de estiaje los usos de suelo forestales registraron 0.001 mg N-NO₂⁻ L⁻¹, en los usos agrícolas la presencia de este ion aumentó a 0.002 mg N-NO₂⁻ L⁻¹ para AUM y 0.049 mg N-NO₂⁻ L⁻¹ para el uso de suelo AU, evidenciando una posible fuente de contaminación de nitritos por el uso excesivo de fertilizantes (Vitousek *et al.*,

1997), por otro lado, las descargas domésticas que se integran al río y la disminución de la cantidad de agua en este propicia el incremento en la concentración de este ion.

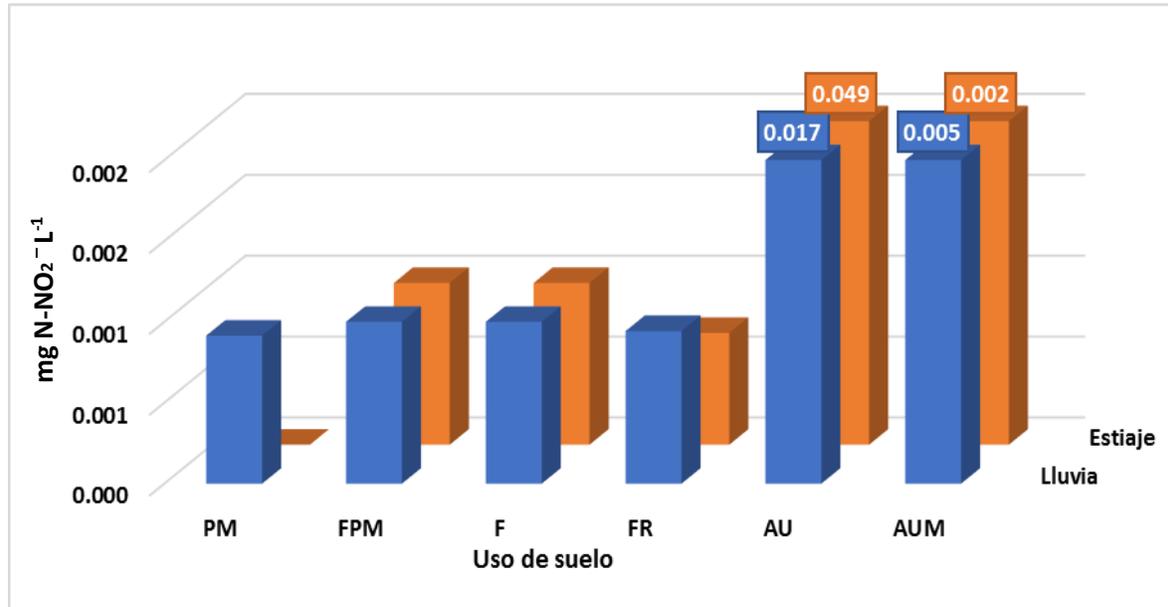


Figura 14. Promedio de los nitritos en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Amonio

Los usos de suelo de pradera de alta montaña y forestales (Fig.15) presentaron concentraciones mínimas de 0.035 a 0.21 mg N-NH₄⁺ L⁻¹ mg L en época de lluvia y de 0 a 0.163 mg N-NH₄⁺ L⁻¹ estiaje, esto puede ser debido a que el amonio se encuentra de forma natural en las aguas superficiales (Soria, 2016), por el contrario, la presencia de amonio aumentó en los usos de suelo agrícolas, en el caso de AU se registró un valor de 1.279 y 3.655 mg N-NH₄⁺ L⁻¹, mientras que para AUM se determinó la mayor concentración con 2.034 y 6.176 mg N-NH₄⁺ L⁻¹ para lluvia y estiaje, respectivamente. Su presencia puede ser resultado de la descomposición de materia orgánica de plantas y animales, diversas actividades industriales y por ser el principal producto de excreción de los organismos (Avnimelech, 1999).

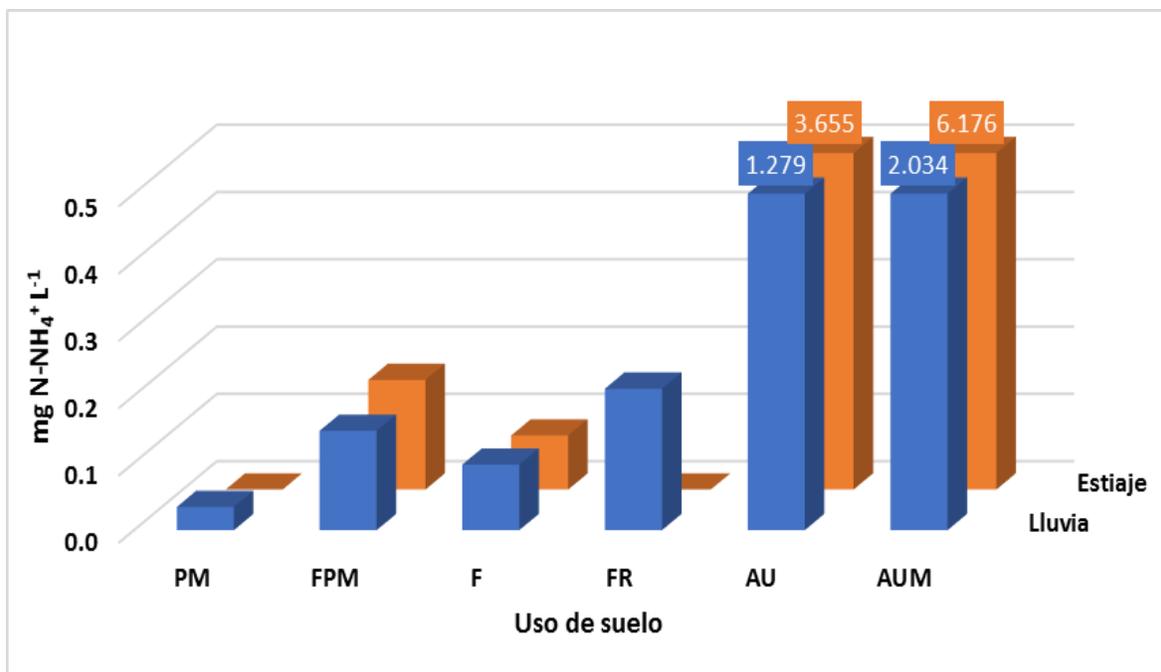


Figura 15. Promedio del amonio en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Fósforo total

Los usos de suelo PM y FPM (Fig.16) registraron valores similares para ambas épocas, 0.75 mg P-total L⁻¹ en secas y 0.41 mg P-total L⁻¹ en lluvias, lo cual se puede explicar por la presencia de rocas fosfatadas que, al sufrir erosión, provocan la integración de este mineral a los ríos (Curtis et al., 2008); en el caso del uso de suelo FR las concentraciones fueron de 0.352 a 0.588 mg P-total L⁻¹ mientras que, en el uso de suelo F se registraron concentraciones que fluctuaron de 0.342 a 0.37 mg P-total L⁻¹, la disminución de fósforo se presentó principalmente en los usos de suelo mejor conservados debido a la captura de nutrientes por parte de la vegetación riparia (Granados-Sánchez et al., 2006).

Los usos de suelo AU y AUM presentaron un incremento considerable en la cantidad de fósforo total alcanzando 1.466 y 1.832 mg P-total L⁻¹ en lluvia, mientras que en secas dichos valores disminuyeron a 1.021 y 1.212 mg P-total L⁻¹ respectivamente, lo cual puede deberse a la lixiviación del fósforo proveniente de fertilizantes empleados en las áreas de cultivo, propiciando el aumento de este elemento en ríos y lagos (Mercado,

2017).

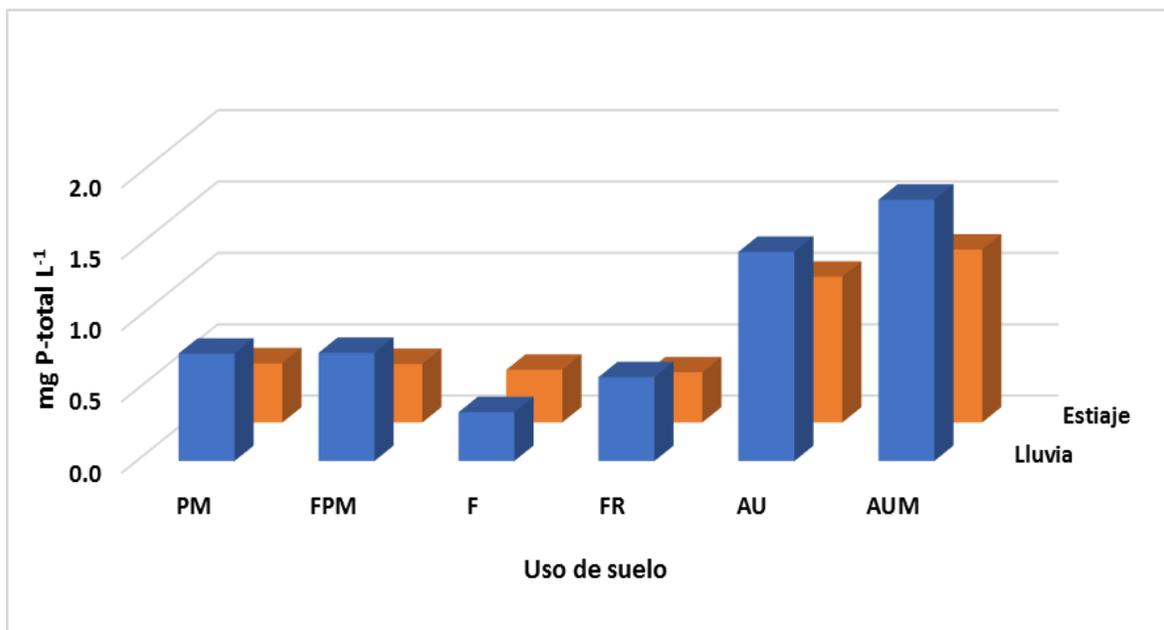


Figura 16. Promedio del fósforo total en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Ortofosfatos

La concentración de ortofosfatos (Fig.17) presentó un decremento conforme al descenso altitudinal para la época de lluvia en los usos PM a FR, mientras que en la temporada de secas el uso de suelo F registró el valor más bajo ($0.011 \text{ mg P-PO}_4^{3-} \text{ L}^{-1}$), en los usos de suelo agrícolas las mayores concentraciones fueron en la época de estiaje con $0.0821 \text{ mg P-PO}_4^{3-} \text{ L}^{-1}$ en AU y $0.712 \text{ mg P-PO}_4^{3-} \text{ L}^{-1}$ en AUM, contra 0.43 y $0.454 \text{ mg P-PO}_4^{3-} \text{ L}^{-1}$ en lluvias respectivamente. Este aumento puede ser consecuencia de la aplicación de fertilizantes en las áreas de cultivo lo que provoca el arrastre de ortofosfatos a las aguas superficiales (APHA-AWWAWPCF-1992).

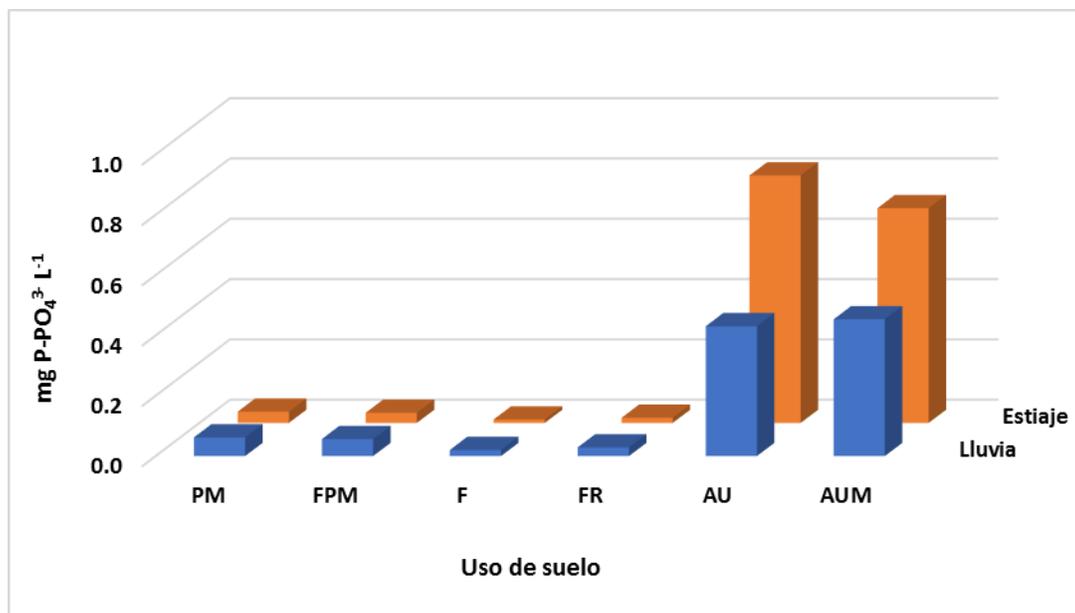


Figura 17. Promedio de los ortofosfatos en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Sulfuros

En la Figura 18 se observa el comportamiento de los sulfuros, donde el uso de suelo FPM destaca por ser el más elevado con 1.202 mg S-S²⁻ L⁻¹ y ligeramente por debajo el uso de suelo PM con 0.855 mg S-S²⁻ L⁻¹ en la época de lluvia, este aumento en la concentración de sulfuros puede explicarse por la presencia de azufre procedente del sedimento, por la deposición de material seco, así como del transporte atmosférico por precipitación (Mascot, 2013).

Los usos de suelo F y FR presentaron las concentraciones más bajas, 0.01 y 0.032 mg S-S²⁻ L⁻¹ respectivamente en lluvias, en los usos de suelo pradera y forestales la cantidad de sulfuros fue mínima para la época de estiaje, mientras que en los usos de suelo AU y AUM se observó el incremento de sulfuros para la temporada de secas con 0.631 y 0.676 mg S-S²⁻ L⁻¹, por el contrario, en lluvias disminuyó hasta 0.017 y 0.052 mg S-S²⁻ L⁻¹; en sitios con incidencia agrícola, Mascot (2013) sugiere que los compuestos de azufre provienen principalmente de fertilizantes y que las concentraciones de este elemento pueden aumentar conforme el uso de suelo se va alterando.

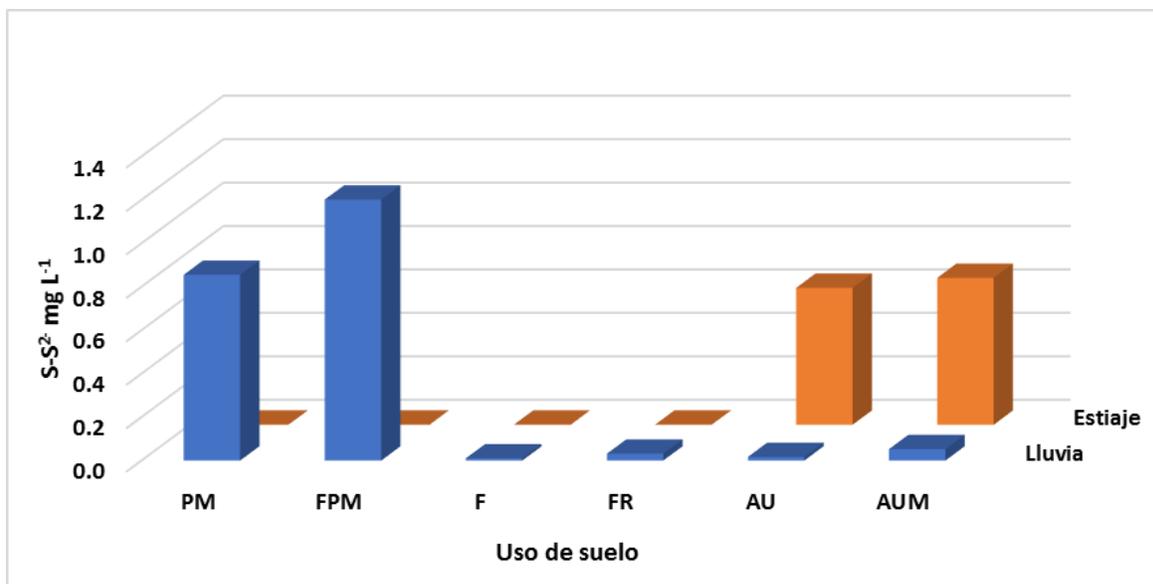


Figura 18. Promedio de los sulfuros en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Sulfatos

El ion sulfato es abundante en aguas naturales, su determinación proporciona valiosa información respecto a la contaminación y a los fenómenos ambientales (Arboleda, 2000). En los sitios con usos de suelo como pradera de alta montaña y forestales (Fig. 19), se muestra un descenso en la concentración al descender la altitud para la época de estiaje, mientras que para la época de lluvia se comporta de manera inversa, a excepción del uso de suelo FPM en el que, la presencia de sulfatos fue considerable baja en comparación con los otros usos de suelo.

Por otra parte, los niveles de sulfatos incrementaron en los usos agrícolas, para AU se tiene una mayor cantidad de sulfatos para la época de estiaje con 27.325 mg SO₄²⁻ L⁻¹ y de 20.863 mg SO₄²⁻ L⁻¹ para la temporada de lluvias, caso contrario al área con uso de suelo AUM donde esta temporada es la que presenta la mayor concentración con 37.948 mg SO₄²⁻ L⁻¹, mientras que en secas se mantuvo en 22.527 mg SO₄²⁻ L⁻¹. Respecto a esto Dótor *et al.* (2014) afirman que el alto contenido de sulfatos en el agua es consecuencia del proceso de oxidación de sulfuros.

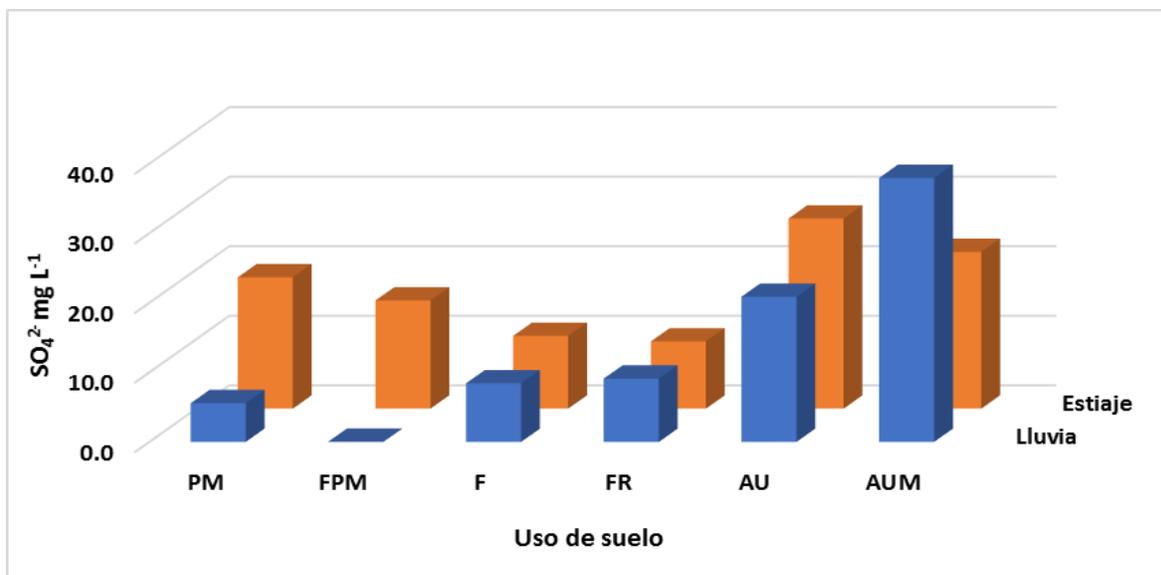


Figura 19. Promedio de los sulfatos en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano-minero.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

A través de la DQO se conoce tanto la concentración de las fracciones biodegradables como no biodegradables de la materia orgánica, incluyendo la de aquellos compuestos inorgánicos que pueden ser oxidados químicamente (Menéndez y Dueñas, 2018). Con base a la clasificación propuesta por CONAGUA (2019) (Fig.20), los usos de suelo FPM y FR (Fig.21) se encuentran en una calidad excelente en ambas épocas, el uso de suelo F mantuvo una buena calidad, mientras que el uso de suelo PM se encuentra entre ambas clasificaciones con 8.81 mg L⁻¹ en lluvia (excelente) y 16.42 mg L⁻¹ en época de estiaje (buena calidad), esta variación puede deberse a los cambios en el volumen del agua dado los efectos de la precipitación, evaporación y evapotranspiración, estos dos últimos procesos disminuyen la cantidad del agua incrementando las concentraciones de nutrimentos y carga orgánica en la época de estiaje (Korkusuz *et al.*, 2004). Los usos de suelo agrícolas registraron un notorio aumento sobrepasando los 40 mg L⁻¹ colocándolos en una clasificación de agua contaminada, debido a las descargas municipales de las localidades en la subcuenca, provocando el aumento de contaminantes orgánicos tanto biodegradables como no biodegradables (Soria, 2016) en el sistema. El alto consumo de oxígeno derivado del aumento de la DQO implica que

el sistema presenta condiciones anóxicas que pueden afectar el desarrollo de los organismos, así mismo facilita la eutrofización del sistema, dado el aumento de P y N derivado de la descomposición de la materia orgánica, esto confirma que una adecuada oxigenación es sinónimo de un buen estado ecológico del sistema.

Criterio (mg L ⁻¹)	Clasificación
DQO ≤ 10	Excelente
10 < DQO ≤ 20	Buena Calidad
20 < DQO ≤ 40	Aceptable
40 < DQO ≤ 200	Contaminada
DQO > 200	Fuertemente contaminada

Figura 20. Clasificación de la calidad del agua, basada en la medida de DQO, propuesta por CONAGUA

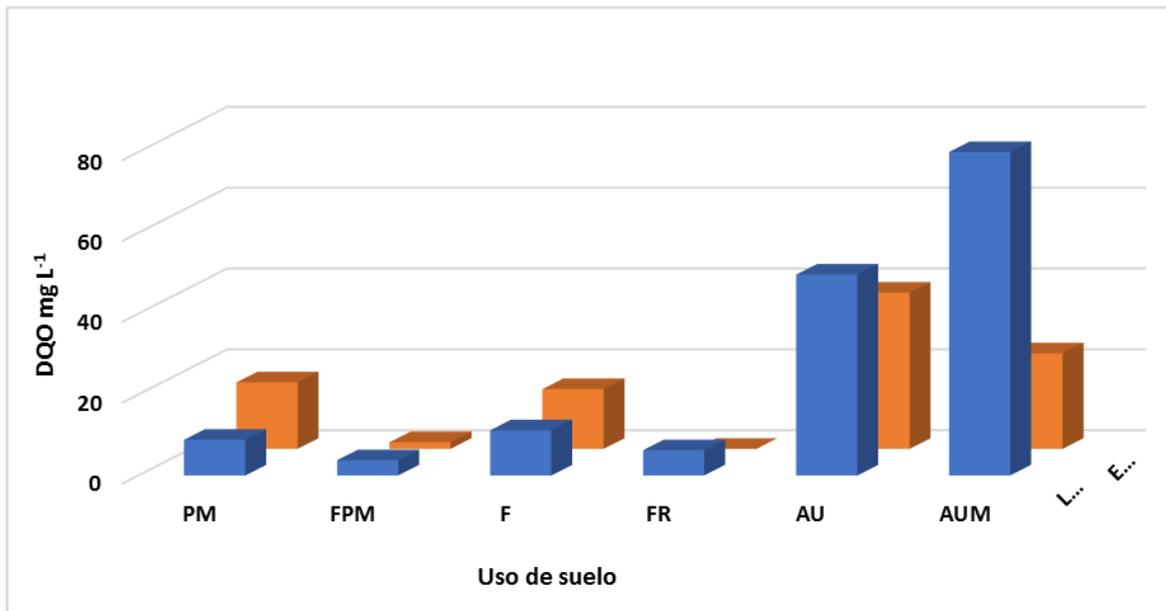


Figura 21. Promedio de la DQO en cada uso de suelo en las épocas de lluvia y estiaje.

PM: pradera de alta montaña; FPM: forestal-pradera de alta montaña; F: forestal; FR: forestal-recreativo; AU: agrícola-urbano y AUM: agrícola-urbano- minero.

Análisis estadístico

Correlación múltiple

Con ayuda del software estadístico Statgraphics Centurion se realizó una correlación de Spearman (Tabla.5 Anexos) empleando los datos obtenidos de los parámetros de agua. Las siguientes variables presentaron un valor p 0.05 lo cual indica que presentan

correlaciones significativas.

La temperatura y el pH presentaron correlación significativa con la mayoría de los parámetros exceptuando a los sulfuros, estas variables intervienen en los procesos que tienen lugar en el sistema hídrico como la velocidad de las reacciones químicas, la disponibilidad de nutrientes que es determinada por el pH y a su vez, la solubilidad de los gases por la temperatura.

Respecto a los STD y SS su correlación fue significativa, así como con temperatura, pH, DQO, las diferentes formas del nitrógeno, PT con STD y ortofosfatos con SS, esta relación puede explicarse a partir del arrastre o lavado de la ribera, con la incorporación de iones, fertilizantes y materia orgánica al río, que serán disueltos parcialmente y la otra parte quedará de forma particulada o se sedimentará, alterando la calidad del agua.

Por otra parte, la DQO registró correlaciones significativas con nitrógeno y ortofosfatos, estos nutrientes se pueden encontrar como resultado de la degradación de materia orgánica, que altera la DQO. El conjunto de estos parámetros son indicativos del nivel trófico del sistema, lo que puede ser resultado de la suma de las actividades que se realizan en los sitios, como el incremento en la concentración de nutrientes en los usos de suelo agrícola, urbano y minero, que generan una tendencia a la eutrofización en los sistemas ribereños aledaños.

El OD mostró correlaciones negativas con amonio, SS, pH, PT y temperatura, esta última afecta la solubilidad del oxígeno condicionando su disponibilidad en el sistema, por otra parte, la materia orgánica presente en los SS requiere oxígeno para degradarse, el amonio lo necesita para transformarse a nitratos por procesos de nitrificación, por lo que, las altas concentraciones de estas variables pueden llevar al ecosistema al estrés.

En relación al nitrógeno, se encontró que los nitratos, nitritos y amonio presentaron correlaciones positivas entre ellos siendo este un comportamiento atípico del ciclo natural del nitrógeno, a causa de la constante adición de fertilizantes, desechos domésticos y otros materiales impidiendo que las concentraciones de NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+ disminuyan. Por otro lado, la temperatura y el pH limitan la disponibilidad de este nutriente en el medio, por lo que mantienen correlaciones significativas.

En cuanto al comportamiento de PT y ortofosfatos, estos no presentaron correlación debido a que las especies orgánicas del fósforo (polifosfatos y fósforo orgánico) se encuentran en mayor porcentaje que los ortofosfatos, ya que estos son asimilados rápidamente por la vegetación y fitoplancton. También presentaron correlaciones significativas con amonio, debido al uso de fertilizantes que contienen nitrógeno y fósforo en diferentes formas químicas

Prueba de comparación de medianas de Kruskal-Wallis

Posteriormente se llevó a cabo la comparación de las medianas entre los usos de suelo para la época de lluvia y estiaje a través de la prueba de Kruskal-Wallis.

Temperatura

Las medianas de temperatura presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los usos de suelo, por otra parte, los sitios con presencia urbana (AU y AUM) presentaron comportamientos similares, registrando las temperaturas más altas en ambas épocas (Fig.22). La altitud es uno de los factores determinantes en la temperatura, ambas mantienen un comportamiento inverso por lo que, los sitios ubicados a menor altitud presentan temperaturas más altas, así mismo el cambio en el uso de suelo repercute en la pérdida de la vegetación ribereña, exponiendo al cauce a una mayor radiación solar. Este comportamiento corresponde con lo reportado por Monfil (2020), donde los usos de suelo menos perturbados registraron las temperaturas más bajas.

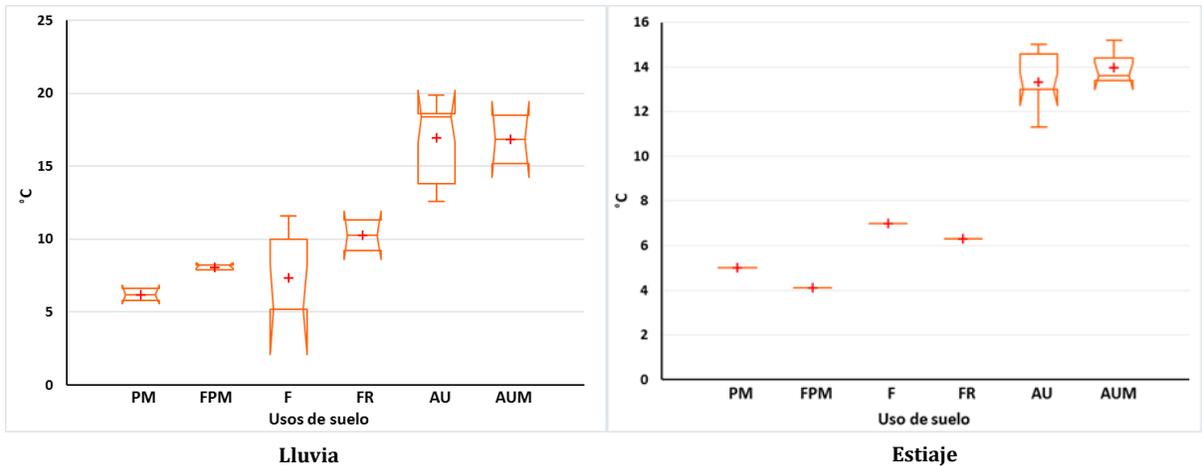


Figura 22. Variación de la temperatura en los diferentes usos de suelo.

pH

En la Figura 23 se muestra el comportamiento del pH en agua en función del uso de suelo, en diferentes épocas (lluvia y estiaje). Para la temporada de lluvias es posible observar un incremento en esta variable conforme la perturbación del suelo es mayor, posiblemente por el arrastre de materiales a lo largo del cauce, mientras que, en estiaje se identificaron dos grupos homogéneos, PM, FPM, F y FR con un pH de 6.5 a 6.7 y AU con AUM de 6.6 a 7.8, este último mostró diferencias significativas según la prueba de Kruskal-Wallis, lo que puede ser resultado de la evaporación del agua provocando el aumento en la cantidad de nutrientes, sólidos y partículas.

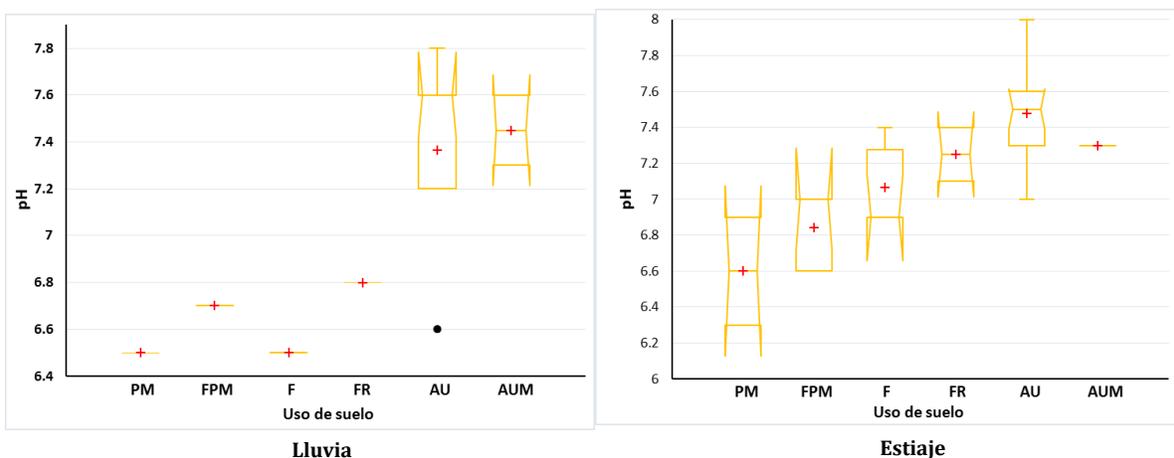


Figura 23. Variación del pH en los usos de suelo.

Oxígeno disuelto

En relación el OD, se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en las medianas, en la época de lluvia (Fig. 24) se manifestaron 3 grupos homogéneos, la concentración máxima fue en el uso de suelo F y la mínima en AUM, en lo que se refiere a la época de estiaje la máxima fue en el uso de suelo AU y la mínima en el uso de suelo AUM y presentó una mayor homogeneidad con solo 2 grupos. En el primer caso se puede decir que el uso de suelo F se mantiene conservado, lo cual le permite mantener una buena oxigenación, mientras que ocurre todo lo contrario en el uso AUM al estar expuesto a cambios drásticos derivados de las actividades humanas. En el segundo caso (época de estiaje) el uso de suelo AU presentó una alta concentración de oxígeno, lo que puede indicar que, independientemente de la época, el sistema puede mantener una buena oxigenación dada por el movimiento natural del río.

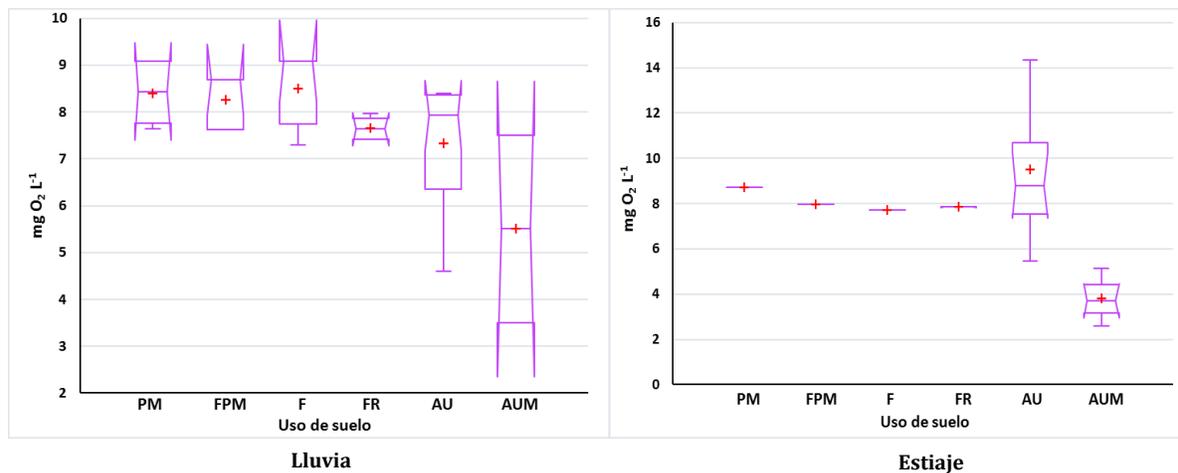


Figura 24. Variación del Oxígeno disuelto en los usos de suelo.

Sólidos totales disueltos

Para el caso de STD mostraron diferencias significativas en ambas épocas, durante la temporada de lluvia (Fig.25) se presentaron dos grupos homogéneos (PM, FPM, F, FR y AU, AUM), considerando la desviación estándar AU presentó la mayor dispersión de datos. En relación con la época de estiaje se registró menor homogeneidad dado que se identificaron 3 grupos: el primero de usos forestales y pradera de alta montaña no presentaron desviaciones, mientras que, el segundo (AU) y tercer (AUM) grupo aumentaron su desviación a 58.14 y 104 respectivamente. Esta variación se da a causa

de la disminución del volumen de agua, provocando que los sólidos presentes en el sistema estén más concentrados.

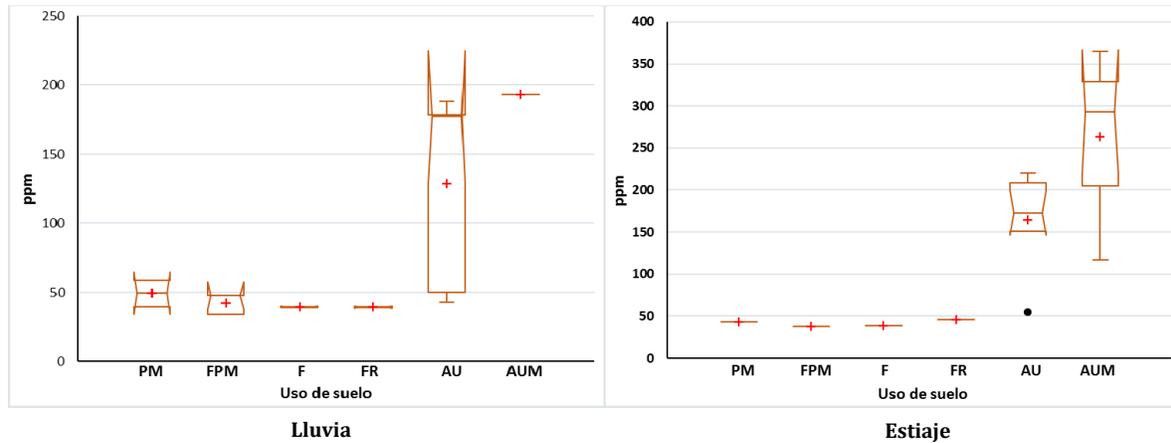


Figura 25. Variación de STD en diferentes usos de suelo.

Sólidos sedimentables

En lo que refiere a los SS, las medianas registraron diferencias significativas, en la temporada de lluvias (Fig. 26) las concentraciones mínimas se presentaron en la mayoría de los usos de suelo, exceptuando al uso de suelo AUM que presentó la máxima cantidad (2 mL L^{-1}), por otra parte, en la época de estiaje los valores de SS fueron mínimos en los usos de suelo de pradera de alta montaña y forestales, sin embargo, el uso de suelo AUM alcanzó un máximo de 3.2 mL L^{-1} . Respecto a la homogeneidad, en ambas épocas se identificaron 2 grupos en los que el uso de suelo AUM se diferenció de los demás.

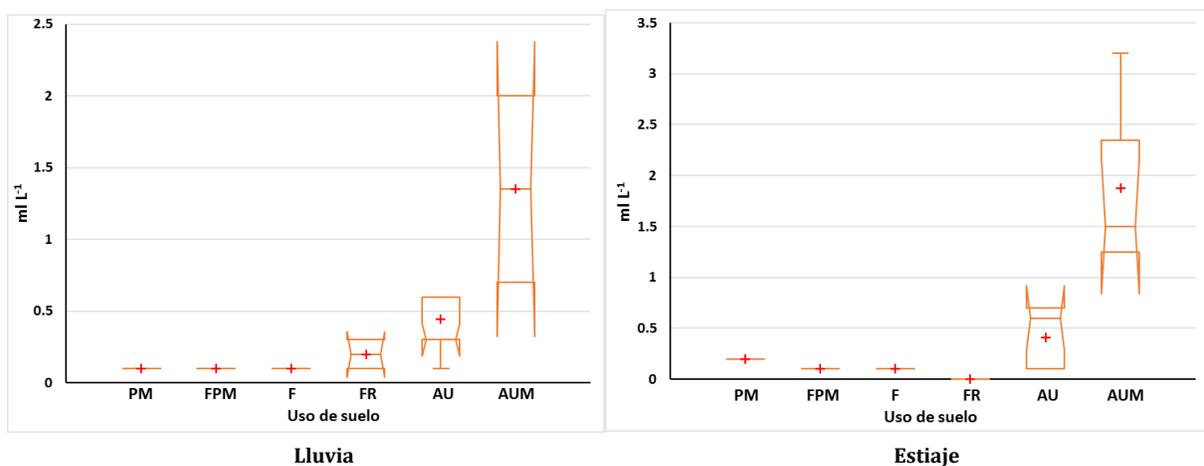


Figura 26. Variación de SS en diferentes usos de suelo.

Amonio

Respecto a la comparación del amonio (Fig.27) las concentraciones oscilaron entre mínimas y 5.6 mg L⁻¹ para la época de lluvias, mientras que en estiaje aumentaron hasta 18.6 mg L⁻¹ respectivamente. Durante la época de estiaje las concentraciones aumentan debido a la disminución del volumen de agua, mientras que en la época de lluvia pese a que el arrastre de amonio proveniente de fuentes puntuales y difusas es mayor, también lo es la cantidad de agua del río provocando que el exceso de amonio se diluya. Es importante destacar las altas concentraciones de amonio en los A B usos de suelo AU y AUM registradas en temporada de estiaje, las cuales sugieren contaminación reciente, proveniente de fertilizantes y heces fecales.

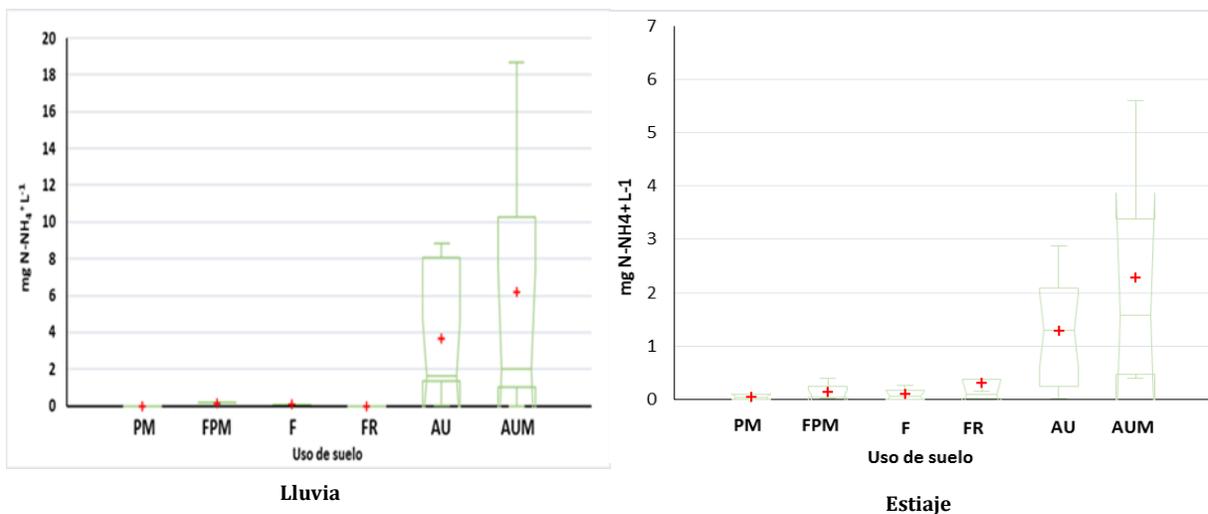


Figura 27. Variación de Amonio en diferentes usos de suelo.

Fósforo Total

Las medianas del fósforo total mostraron diferencias estadísticamente significativas, los valores mínimos se registraron en los usos de suelo F y los máximos en el uso de suelo AU, se identificaron 3 grupos, esto para la época de lluvia (Fig. 28). Por otra parte, en época de estiaje los valores mínimos y máximos se presentaron en el mismo uso de suelo (AUM). Las desviaciones estándar en ambas épocas fueron mínimas para los usos de pradera y forestales, de manera contraria en los usos agrícolas la variación de datos fue mayor reflejándose en su desviación.

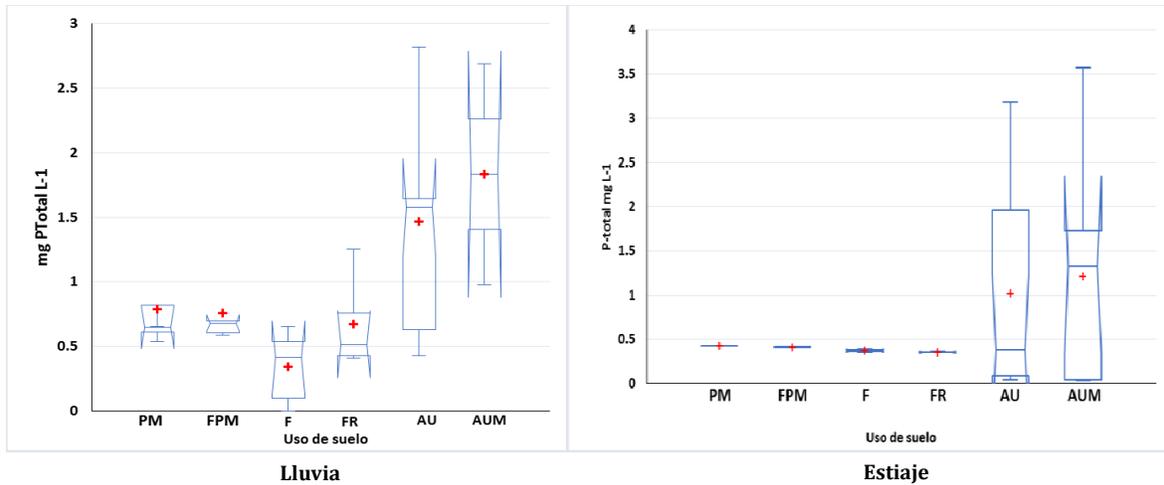


Figura 28. Variación del Fósforo total en diferentes usos de suelo.

DQO

La DQO mostró un comportamiento diferente en ambas épocas, en lluvia (Fig. 29) se identificaron 3 grupos homogéneos con diferencias estadísticamente significativas; en contraste en temporada de secas únicamente se presentó un grupo homogéneo sin pares con diferencias significativas. En ambas épocas el uso de suelo AU y AUM presentaron mayor variabilidad, así mismo, presentaron las concentraciones más altas, registradas en la época de lluvia, esto es resultado de los escurrimientos de las áreas de cultivo y la incorporación de aguas municipales que integran materia orgánica de difícil degradación al río.

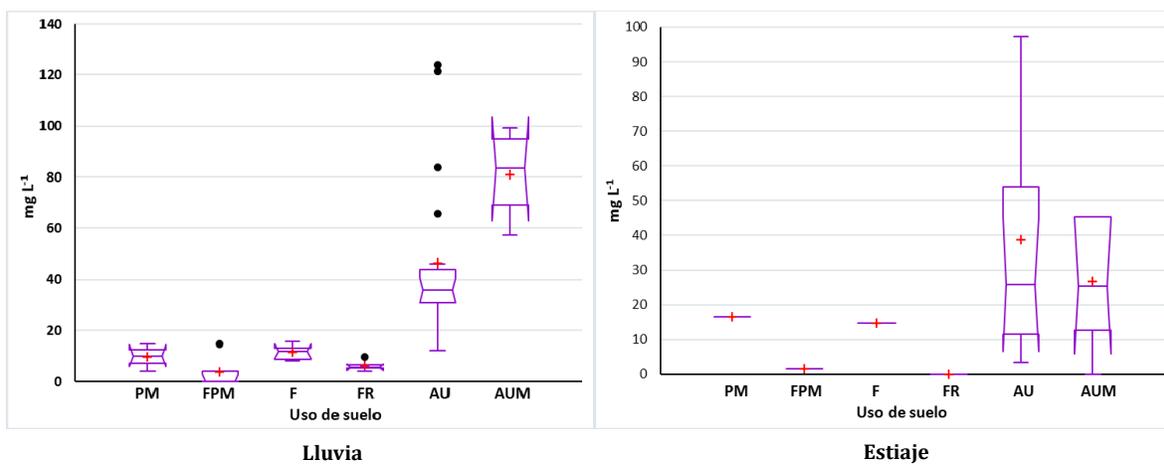


Figura 29. Variación de la DQO en diferentes usos de suelo.

Discusión de resultados

La subcuenca del río Nexapa presentó procesos secuenciales de cambio de uso de suelo que inician en la pradera de alta montaña donde se realizan algunas actividades extensivas recreativas o deportivas, seguidos por bosques con poca presencia humana que se va incrementando en el descenso altitudinal con actividades forestales, recreativas y acuícolas, para continuar con la presencia de áreas de cultivos y ganadera, desplazando rápidamente la vegetación nativa, esta secuencia puede conducir a la erosión en áreas desprotegidas de vegetación y favorecer la transición de zonas rurales a áreas de asentamientos humanos que con el tiempo se van urbanizando.

En los sitios con uso de suelo pradera de alta montaña (PM) y forestales (FPM, F, FR) fue posible observar la presencia de heces de ganado y la modificación del río a través de bloques de madera. García *et al.* (2012) y López *et al.* (2015) resaltan que el principal factor que detona el cambio de uso del suelo es el incremento poblacional, al modificar la vocación forestal del suelo por áreas destinadas a la agricultura, la extracción de madera y el establecimiento de asentamientos humanos, lo cual pone en riesgo la viabilidad a mediano y largo plazo de los bosques y su biodiversidad (Delgado *et al.*, 2017).

Por su parte en los sitios con uso de suelo agrícola-urbano y agrícola-urbano-minero las condiciones ecológicas cambian drásticamente, dado que los asentamientos aledaños propician la descarga de aguas domésticas, la presencia de cultivos modifica la vegetación y el uso de maquinaria cambia las características del cauce, por lo que la calidad del agua se ha visto comprometida. Diversos estudios señalan que aquellas zonas sometidas a mayores presiones antrópicas presentan cambios importantes en el uso de suelo (Vasquez y Reinoso, 2012) viéndose alterados elementos particulares del perfil de los ríos, ocasionando drásticas alteraciones en la parte media y baja de la cuenca, en relación con la cabecera de la misma (Murtinho *et al.*, 2013).

La temperatura del agua manifestó el comportamiento esperado en el que aumenta conforme la altitud desciende, esto concuerda con lo reportado por Fikadu (2022) en el que además de la ubicación altitudinal de los sitios, sugiere que otros factores pueden intervenir en el comportamiento de dicho parámetro. Es importante mencionar que la falta de vegetación ribereña puede ser un factor relevante que modifique esta característica. Custodio y Pantoja

(2012) mencionan que una cubierta vegetal pobre, debido a la eliminación del bosque ribereño determinara altas temperaturas que repercutirán en el agua, por su parte Zhao *et al.* (2017) refieren que, en la actualidad el cambio climático es también responsable de alterar el patrón de temperatura del agua.

El pH en los usos de suelo pradera de alta montaña y forestales reflejaron una tendencia ligeramente ácida correspondiente a los Bosques de pino, esto concuerda con lo reportado por Soledad (2013) para la misma zona de estudio, en contraparte los usos de suelo agrícola-urbano y agrícola-urbano-minero manifestaron una tendencia alcalina, lo cual puede ser resultado de la adición de carbonatos al agua tal y como lo sugiere Aguilar (2018) donde reporta valores de pH similares, como consecuencia del arrastre de diversos materiales carbonatados. El comportamiento del pH en los sitios de estudio es similar al reportado por Ayala (2011) donde el pH más básico se registró en los sitios que presentan actividad antrópica como agricultura, ganadería o desarrollo urbano.

Respecto a la presencia de oxígeno disuelto, se encontró en concentraciones adecuadas a lo largo del sistema fluvial, como resultado de la dinámica del río, ya que presenta pendientes pronunciadas que facilitan el movimiento del agua y su oxigenación, excepto en el sitio con uso de suelo agrícola-urbano-minero donde además de no existir una pendiente pronunciada, se presenta se integran aguas municipales, así como sólidos provenientes de la cantera y zonas de cultivo La tendencia a registrar bajas concentraciones de oxígeno disuelto indica el gran consumo de este gas, por microorganismos y procesos de oxidación, principalmente la materia orgánica, lo que coincide con lo citado por Roldán & Ramírez (2008), esto aunado a la ausencia de vegetación ribereña resulta una combinación peligrosa para la disponibilidad de oxígeno y la vida acuática.

Los sólidos disueltos y sedimentables mostraron un comportamiento similar en el que las concentraciones fueron bajas en la mayoría de los usos de suelo, exceptuando los sitios agrícolas en los cuales los sólidos aumentaron, como consecuencia de las diversas actividades antropogénicas y la pérdida de vegetación ribereña que funge como barrera y al desaparecer, el sistema acuático está más propenso a la entrada de material sólido, alterando la transparencia y calidad del agua. Rosenberg *et al.* (2000), enfatizan que la eliminación de la cubierta vegetal y el inadecuado manejo territorial de las cuencas afecta negativamente la cantidad y calidad de agua disponible, lo que corrobora lo registrado en este estudio. De esta manera es posible explicar que las zonas con usos de suelo como pradera de alta montaña y

forestal presentan menor concentración de sólidos en ambas modalidades y esto aumenta paulatinamente con influencia humana. Estudios realizados en la zona, como el de Mascot (2013), indican que a medida que el afluente fluye hacia sitios perturbados con menor proporción o ausencia de vegetación, la presencia de sólidos se incrementa ya que en el corredor ribereño el suelo presenta mayor intemperismo y erosión facilitando el transporte de estos compuestos al agua (Soledad, 2013).

La concentración de nitrógeno está representada por diferentes formas químicas, tal es el caso de los nitratos, nitritos y amonio. Respecto a la presencia de nitratos y amonio esta fue mayor en los sitios con uso de suelo agrícola-urbano y agrícola-urbano-minero, en comparación con el resto de los sitios. Para los nitratos y el amonio este comportamiento puede explicarse por el uso desmedido de fertilizantes y otros agroquímicos que ingresan al río, es evidente que la calidad física y química del agua está relacionada con los eventos que ocurren en la cuenca y depende en gran medida del uso a que se destina el suelo (Benjumea-Hoyo *et al.*, 2018). El amonio pese a encontrarse de manera natural en el ecosistema, puede llegar a presentar variaciones relacionadas con degradación de materia orgánica de origen fecal.

En cuanto al fósforo este fue monitoreado como fósforo total y ortofosfatos, en ambos casos los usos de suelo como pradera de alta montaña y forestal, presentaron las concentraciones más bajas lo cual, puede ser resultado de un ecosistema conservado. Scarsbrook (2001) sugiere que la vegetación de ribera retiene y filtra una mayor cantidad de contaminantes, lo que favorece una mejor calidad del agua, sin embargo, la disminución o eliminación de la vegetación en conjunto, con las descargas agrícolas y domésticas con exceso de fosfatos, por el uso de detergentes, trae condiciones que propician eutrofización. Esto se observó en los sitios con uso de suelo agrícola y con presencia urbana (AU y AUM, lo que coincide con lo mencionado por Soria (2016), en contraparte, las zonas donde las actividades humanas son limitadas y ocasionales se tiene mejor calidad hídrica.

Los sulfuros presentaron las mayores concentraciones en los usos de suelo de pradera de alta montaña y forestal-pradera, en la época de lluvia, lo cual se atribuye a la ubicación dentro de una zona con actividad volcánica continúa, la deposición de material seco producto de las emisiones y el transporte atmosférico por precipitación, los cuales son factores de importancia para el incremento de la concentración de esta forma de azufre. Mascot (2013) reporta que la presencia de este ion en los usos de suelo de mayor altitud ocurre por el contacto directo con las exhalaciones del volcán compuestas por: H₂O, CO₂, SO₂ y H₂S (Schiavo *et al.*, 2021) estos

últimos dos sufren procesos de oxidación y son arrastrados aguas abajo donde se acumulan en forma de sulfuros, este es el caso de los usos agrícola -urbano y agrícola-urbano-minero en los que se registraron elevadas concentraciones de este ion en la época de estiaje, dicho aumento se ve propiciado por la disminución en el volumen del agua

Respecto a la presencia de sulfatos esta se incrementó en los usos de suelo agrícola urbano y agrícola-urbano-minero, su presencia en el agua es resultado de la agricultura que no solo modifica la vegetación de la ribera, sino que también funge como fuente de fertilizantes, al quedar estos de forma residual e incorporarse al río a través del lavado y/o de material sólido. El incremento de las actividades agrícolas provoca un alto requerimiento de nutrientes en el suelo, necesarios para un adecuado desarrollo de los cultivos (Castillo *et al.*, 2006), por lo que la adición de agroquímicos sulfatados resulta necesaria casi siempre; cuando la dosis y forma de aplicación es la correcta, se evita la acumulación de altos contenidos de azufre que pudieran llegar a ser tóxicos (Roberts, 2007). El comportamiento registrado en esta investigación concuerda con lo reportado por Guerra y Cruz (2017), donde los valores de sulfatos en la zona pueden ser mínimos o no detectables y aumentar en los sitios contaminados, como consecuencia de la incorporación de efluentes agrícolas.

La DQO manifestó un comportamiento homogéneo en los usos de suelo pradera de alta montaña y forestales fluctuando entre buena a excelente calidad, sin embargo, en los usos de suelo agrícola la DQO aumentó considerablemente hasta un nivel de contaminada. Zhou *et al.*, (2012) plantean que las condiciones de flujo o la calidad del agua no sólo son indicadores del estado de en qué se encuentran los sistemas fluviales, sino también los ecosistemas terrestres adyacentes, dicho comportamiento se presenta en el área de estudio, siendo la parte alta de la cuenca donde la DQO no refleja alteración, mientras que, en la parte baja la presencia humana, el vertido de aguas residuales y el arrastre de materia orgánica de difícil degradación son factores que se encargan de elevar la demanda química de oxígeno.

El sistema fluvial sigue un patrón de concentración y dilución establecida por la temporada de sequía y lluvias respectivamente, Benjumea-Hoyos *et al.* (2018) refieren este comportamiento para las concentraciones de fósforo total, amonio y nitratos, esta dinámica es perceptible en los nutrimentos y sólidos presentes, los cuales pueden ser de origen alóctono desde los suelos adyacentes al río a través de las escorrentías derivadas de la temporada de lluvias, sin embargo, con la llegada de la temporada seca estos tienden a concentrarse dado que el caudal disminuye y con ello el movimiento. Esto concuerda con lo reportado por Chen *et al.* (2019) quien

menciona que el desplazamiento del nitrógeno en el río fue mayor en la época húmeda,

Desde el uso de suelo pradera de alta montaña hasta el agrícola-urbano se observa una alteración continua en la calidad del agua, intensificándose en los dos sitios con menores altitudes, esto corrobora lo que menciona Ren *et al.* (2003) sobre un efecto acumulativo de la degradación, lo cual indica que probablemente factores más allá del cambio de uso de suelo influyen en la alteración de algunos de los parámetros.

En los usos de suelo forestales, los niveles de erosión y sedimentos disminuyen por la presencia de una mayor cobertura vegetal (Maass *et al.*, 2005), este mismo comportamiento se observó en el sistema donde las concentraciones de sólidos (sedimentables y disueltos) son menores en los sitios con mayor presencia de cobertura vegetal, de igual manera, los bosques pueden influenciar y limitar la frecuencia e intensidad de los deslizamientos de tierra, la escorrentía superficial que se produce por una gran cantidad de lluvia en ausencia de una cobertura arbórea continua, puede lavar el suelo, provocando el arrastre hacia los ríos, reduciendo la calidad de su agua al enturbiarlos y aumentar la cantidad de sólidos (disueltos y sedimentables) y la materia orgánica (disuelta y particulada), factor que regula la demanda biológica de oxígeno de esas aguas (Blanco, 2015). En los sitios con mayor deforestación la dinámica del ecosistema cambia de manera abrupta, desde los niveles de sólidos y nutrimentos hasta el caudal, esto concuerda con lo mencionado por Conte *et al.* (2011) quienes sugieren que, la deforestación conduce a un aumento en la probabilidad de inundaciones debido al incremento en los caudales máximos o en los picos de escorrentía.

Por otro lado, la cobertura arbórea sobre la ribera, en los usos de suelo forestales, brinda sombra, y es una barrera biológica que limita el paso de materiales de diferentes tipos, disminuyendo la temperatura, conductividad y presencia de sólidos; las altas concentraciones de oxígeno también son características de estos sitios (Kasangaki *et al.*, 2008), dicho comportamiento se presentó en el agua de los usos de suelo de pastizal y forestales debido a la poca intervención humana, sin embargo, la vegetación de las orillas mostró inestabilidad, autores como García (2013) sugieren que esto puede ser provocado en algunos casos por el libre paso del ganado y menor proporción de vegetación ribereña, esto favorece que estos parámetros tiendan a aumentar, no obstante, en este estudio, no se presentaron diferencias significativas entre los usos de suelo forestales y de pradera.

El aumento en la temperatura y en las concentraciones de fósforo, amonio y sólidos, así como

bajos niveles de oxígeno, son características indicadoras de enriquecimiento orgánico proveniente de zonas agrícolas y la presencia de aguas residuales domésticas (Walsh *et al.*, 2005), esto concuerda con el comportamiento presentado en los sitios estudiados con usos de suelo agrícola-urbano y agrícola-urbano-minero, donde las diversas actividades antropogénicas intervienen en el incremento de estos parámetros. Según lo reportado por García (2013), los ríos urbanos presentan las mayores concentraciones de fósforo y sólidos (sedimentables, suspendidos y disueltos), lo cual coincide con lo encontrado en este trabajo, donde los sitios de muestreo con usos de suelo agrícola-urbano en la subcuenca del Río Nexapa fueron los más afectados en su calidad del agua al tener una categoría de contaminado, estas mismas afectaciones se presentan en varios sistemas de cuencas como lo menciona Morales (2010) donde la zona urbana de la cuenca del río Magdalena presenta una calidad de agua inaceptable para cualquier uso.

Los cambios en el uso de suelo aunado a la falta de tratamiento de agua tienen un fuerte impacto en los ecosistemas acuáticos del país los cuales han sufrido deterioro, han sido sensiblemente modificados o se han perdido (Sánchez *et al.*, 2007), a tal grado que, la calidad del agua de los afluentes está en función de las actividades humanas que se llevan a cabo en las cercanías del río. Este estudio demuestra que las actividades humanas que se llevan a cabo en las riberas o áreas cercanas al río, en correlación con la intensidad y periodicidad con la que se realizan y los residuos que generan generan un gran impacto en el ecosistema, lo que se manifiesta en la calidad del agua. Esto permite inferir que los habitantes, usuarios y autoridades de cada sitio con ayuda de los gobiernos, investigadores y académicos pueden frenar el deterioro de los ambientes de ribera y la calidad del agua, si se coordinan y trabajan juntos por este fin.

Conclusiones

En la subcuenca del río Nexapa se identificaron seis usos de suelo: pradera de alta montaña, forestal-pradera de alta montaña, forestal, forestal-recreativo, agrícola-urbano y agrícola-urbano-minero, esta diferenciación se presenta a lo largo de la cuenca provocando diversas modificaciones en el ambiente.

En este estudio el cambio de uso de suelo se mostró como un factor determinante en la calidad del agua, ya que en los sitios de estudio que representan los usos de suelo con mayor conservación ecosistémica, presentaron concentraciones mínimas de iones y nutrimentos mientras que, en los usos de suelo con influencia humana aumentan las descargas domésticas,

la presencia de basura, las actividades agrícolas y mineras. Tomando en consideración los resultados obtenidos en esta investigación, la hipótesis propuesta se acepta, dado que los usos de suelo y los cuerpos de agua adyacentes han presentado alteraciones derivadas de las actividades antropogénicas.

Es importante destacar que la calidad del agua en la subcuenca del Nexapa no solo se relaciona con el patrón de uso de suelo, el régimen pluvial, propicia cambios en el volumen del caudal y, por consiguiente, la concentración o dilución de nutrimentos y material particulado que alteran sus propiedades físicas y químicas y limitan su disponibilidad. Existen otros factores que también interviene en la calidad del agua como: la altitud, la cobertura vegetal y exhalaciones volcánicas, lo que evidencia la susceptibilidad del ecosistema fluvial frente a los procesos de cambio naturales y antrópicos.

Debido a los estragos provocados por la continua expansión poblacional, la subcuenca del río Nexapa ha sufrido modificaciones en su vegetación nativa dando paso a vegetación inducida, zonas de cultivo y pastoreo en la alta montaña, lo que conlleva el deterioro del ecosistema y la pérdida de calidad del agua.

Bajo esta perspectiva, es de suma importancia que se realice un monitoreo continuo de la zona, con el fin de identificar puntos de cambios específicos que puedan ser restaurados, por reforestación, humedales y sistemas de filtración; así mismo la educación ambiental es primordial para la concientización de las poblaciones aledañas y los visitantes de la zona.

Referencias

- Aguayo, M. Pauchard, A. Azócar, G. & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82, p. 361-374.
- Aguilar, L. y Estanislao, J.M. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea de un bosque de galería en el estado de Puebla. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(47), pp. 230-252. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.154>.
- Aguilar, V. (2003). Aguas continentales y diversidad biológica de México: un recuento actual. *Biodiversitas*, 48, pp 1-16.
- APHA, AWWA and WPCF. (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17ª edición. Ed. Díaz Santos. Washington. 1195 pp.
- APHA, AWWA, WEF. (2012). Métodos estándar para el examen del agua y las aguas residuales. 22ª ed. Washington: American Public Health Association.
- APHA-AWWA-WEF. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Edition. Washington DC, USA.
- Arango-Aramburo, M. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*, Bogotá, 15 (3), pp. 125- 133.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. Ed. Mc Graw Hill.
- Arredondo, F. J. L. (1986). Breve descripción de los criterios y las técnicas para el manejo y calidad del agua en estanques de piscicultura intensiva. Dirección General de Acuicultura, secretaria de Pesca.
- Avnimelech Y. (1999). Carbón/nitrógeno ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture* 176.
- Ayala, M. (2011). Interacción ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de afluencia (Tesis de Licenciatura). Tesis Digital.

Universidad Nacional Autónoma de México.

Aznar, A. (2000). Determinación de los parámetros fisicoquímicos de la calidad de las aguas. *Revista Interdisciplinaria de Gestión Ambiental*. 1(2).

Bautista F. (2005). Información edafológica para el manejo de recursos naturales. En Bautista F. y G. Palacio. *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche. México.

Benjumea-Hoyos, C.A., Suárez-Segura, M.A., y Villabona-González, S.L. (2018). Variación espacial y temporal de nutrientes y total de sólidos en suspensión en la cuenca de un río de alta montaña tropical. *Revista Académica de Colombia* 42(165), pp. 353-363 doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefy.777>

Blanco-Libreros y P. Sánchez-Duarte (Editores). 2015. XII. Cuencas pericontinentales de Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela: tipología, biodiversidad, servicios ecosistémicos y sostenibilidad de los ríos, quebradas y arroyos costeros. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., Colombia.

Blanco-Libreros, J. F., E. Contreras y L. P. Giraldo. (2015). El lujo y transformación de la materia orgánica: proceso ecosistémico maestro en las cuencas pericontinentales. Capítulo 6. Pp. 171-187. En: Lasso, C. A., J. F.

Bocco, G., Mendoza, M., Maser, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación, *Investigaciones Geográficas*, pp. 18-38.

Bojarczuk, A., Jelonekiewicz, Ł., & Lenart-Boroń, A. (2018). The effect of anthropogenic and natural factors on the prevalence of physicochemical parameters of water and bacterial water quality indicators along the river Białka, southern Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(10), pp. 10102-10114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1212-2>

- Boninsegna, J. & Villalba, R. (2007). Los escenarios de Cambio Climático y el impacto en los caudales. Secretaria de ambiente y desarrollo sustentable de la nación.
- Cabrera, A. E. N., Díaz, G. L. I. y Barros, D. O. (2019). La gestión de indicadores territoriales para el desarrollo sostenible en las montañas de Cuba. *Economía y Desarrollo*, 162 (2).
- Carrasco, S., Hauenstein, E., Peña-Cortés, F., Bertrán, C., Tapia, J: & Vargas-Chacoff, L. (2014). Riparian vegetation quality evaluation of two coastal watersheds in southern Chile by applying QBR index as base for its territorial management and planning. *Gayana Bot.* 71(1), pp.1-9, Universidad Católica de Temuco.
- Carrillo P, C. M. (2021). Validación de métodos de ensayo para cianuros, fenoles, sólidos sedimentables, sólidos totales, manganeso, zinc y aluminio en agua y suelo. (Tesis de licenciatura). Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/23460>
- Castillo, C., J. Espósito y R. Balboa. (2006). Fertilización en el Sur de Córdoba. Interacción entre Nitrógeno y Azufre. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Castro B. I., Ruíz J. D. y García G. (2012). Degradación de los suelos agrícolas y factores de la erosión. En Andrade E. (coord.). *Erosión y degradación de suelos en ambientes semiáridos de Tamaulipas (México): regiones norte y altiplano*. Editum miradas - Universidad de Murcia.
- Chen X., M. Stokal, C. Kroeze, L. Ma, Z. Shen, J. Wu, X. Chen, X. Shi. (2019). Seasonality in river export of nitrogen: a modelling approach for the Yangtze river. *Sci. Total Environ.*, 671 (25), pp. 1282-1292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.323>
- CNA (Comisión Nacional del Agua). (2008). Programa Nacional Hídrico 2007-2012, México, Comisión Nacional del Agua.
- Colín, B. (2001). *Química Ambiental*: Universidad Autónoma de Barcelona. 2ª ed. Reverté S.A. p450.
- CONAGUA. (2019). Indicadores de calidad de agua. Gerencia de Calidad del Agua.

http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce CONAGUA. (2011). Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. Compendio informativo. México, D. F. 132 pp. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2011.pdf>

CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2013). Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl, Programa de Manejo. Pp.190.

Concha, P. M. (2013). Impacto ambiental del crecimiento urbano. Biología. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. pp: 118-131.

Conte, M., Emmanay, D., Mendoza, G., Walter, M. T., Wolny, S., Freyberg, D., Nelson, E., Solórzano, L. (2011). Retention of nutrients and sediments by vegetation En: Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T.H., Daily, G.C., Polasky, S. (eds.). Natural Capital. Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services. pp. 89-110, Oxford University Press Inc.

Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). (2000). Parámetros Físicoquímicos y Bacteriológicos del Agua. Colombia. https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documento_s/estudios/e01.pdf

Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). (2011). Calidad de aguas. Factores físicoquímicos de los ecosistemas. Colombia.

Cotler, Á. H., Galindo, A. A., González, M. I. D., Pineda, L. R. F. y Ríos, P. E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Cruz F. G. y Guerra-Hernández E. A. (2017). Ecosistemas ribereños de montaña: descripción y estudio. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cuevas, M., A. Garrido, J. Perez y D. Iura. (2010). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. Las Cuencas Hidrográficas de México. Diagnóstico Y Priorización, pp. 96-103.

- Curtis, H. Barnes, S. N., Schnek, A. y Massarini A. (2008). Biología. Editorial Médica Panamericana.
- Custodio V, M. y Pantoja E, R. (2012). Impactos antropogénicos en la calidad del agua del río Cunas. Apuntes de ciencia y sociedad. Perú. 2(2). D.R. Maidment (Ed.), Handbook of Hydrology, McGraw-Hill, pp. 14.1-14.50.
- De las Heras I, J. (2013). El estado ecológico de las aguas superficiales y el estado químico de las aguas subterráneas. Metodología para su evaluación y situación actual de la misma. Revista jurídica de Castilla (54), pp. 47-59.
- De Mello, K. Valente, R.A., Randhir T.O., dos Santos A.C.A., Vettorazzi C.A. (2018). Efectos del uso de la tierra y la cobertura de la tierra en la calidad del agua de los arroyos de bajo orden en el sureste de Brasil: Cuenca hidrográfica versus zona ribereña Catena, 167 pp. 130-138.
- Delgado M, Luz A., Matteucci S, Acevedo M., Valeri C., Blanca R. y Márquez J. (2017). Causas directas que inducen el cambio de uso del suelo y de la cobertura boscosa, a escala de paisaje, en el sur de Venezuela. Inverciencia 42(3).
- Dimitrovska, O., Radevski, I., & Gorin, S. (2020). Water Quality and Pollution Status of the Main Rivers in the Republic of North Macedonia. In Water Resources Management in Balkan Countries. pp. 389-418. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22468-4_15
- Doran, J.W. y Parkin, B.T. (1994). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication.
- Dótor, A. A., Armienta, H. A., Árcega, C. F. & Talavera, M. O. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. Hidrobiológica, 24(3), pp. 245-256. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018888972014000300008&lng=es&tlng=es.
- Elosegi, A. & Díez, J. (2009). La vegetación terrestre asociada al río: el bosque de ribera. En S.

Sabater y A. Elozegi, Conceptos y técnicas en ecología fluvial pp. 311-321.BBVA.

Encalada, A. (2010). Funciones ecosistémicas y diversidad de los ríos: Reflexiones sobre el concepto de caudal ecológico y su aplicación en el Ecuador. *Polémika*, 2(5).

<https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/polemika/article/view/370>

Estevez, E., Rodríguez-Castillo, T., Álvarez-Cabria, M., J. Peñas, F., González-Ferreras, A., Lezcano, M., Barquín, J. (2007). Analysis of structural and functional indicators for assessing the health state of mountain streams, *Ecological Indicators*, 72, pp. 553-564, Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria", Universidad de Cantabria, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.052>.

FAO (Food and Agriculture Organization). (2015). Agroecology to reverse soil degradation and achieve food security. Plant Production and Protection Division. Roma, Italia.

Farley, K. (2007). Grasslands to Tree Plantations: Forest Transition in the Andes of Ecuador. *Annals of the Association of American Geographers*, 97(4), pp. 755-771.

Fernández Núñez, M. y Prados Velasco, M. J. (2010). Cambios en las coberturas y usos del suelo en la cuenca del río Guadalfeo. *GeoFocus*. pp. 1975-1999. www.geofocus.org/articulo7_2010

Fernández, L., J. Rau & A. Arriagada. (2009). Calidad de la vegetación ribereña del río Maullín utilizando el índice QBR. *Gayana Botánica* 66(2), pp. 269- 278.

Fikadu, G. (2022). Determination of Selected physicochemical water quality parameters of the upper stream of Amerti watershed of Western Ethiopia, *Environmental Challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100558>.

García, O. J. A., Cedillo G., J. G., J. Pérez, J. I., & Balderas P., M. Ángel. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del río San José en el estado de México. *Papeles de Geografía*, pp. (55-56), 63-73. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/176211>

García, P. L. (2013). Efectos del uso de suelo sobre la calidad del agua y los ensamblajes de

macroinvertebrados acuáticos de la cuenca alta del río La Antigua, Ver. Instituto de Ecología, A.C. Secretaría de Posgrado.

Gerritsen, P., A. Lomelí J. y C. Ortiz A. (2005). Urbanización y problemática socioambiental en la Costa Sur de Jalisco, México: una aproximación. *Región y Sociedad*, 33(17), pp.107-132.

Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. Á. López-Ríos, G. F. (2006), Ecología de las Zonas Ribereñas *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(1), pp. 55-69 Universidad Autónoma.

Gu Qing, Hu Hao, Ma Ligang, Sheng Li, Yang Su, Zhang Xiaobin, Minghua Zhang, Kefeng Zheng, Lisu Chen. (2019). Characterizing the spatial variations of the relationship between land use and surface water quality using self-organizing map approach, *Ecological Indicators*, 102, pp. 633-643. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.017>.

Gualdrón, D. L. (2016). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos. *Revista Dinámica Ambiental* (1). Universidad Libre Seccional Socorro.

Guerra-Hernández, E. A. (2020). Indicadores hídrico-edáficos de calidad para ambientes ribereños de la reserva de la biosfera “Los volcanes”. (Tesis de doctorado). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Guerra-Hernández, E. A. y Cruz-Flores, G. (2017). Uso de suelo y calidad del agua. Caso de estudio: Reserva de la Biosfera de Los Volcanes. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 8(18), pp.41-67.

Guerra-Hernández, E. y Campos-Lince. (2017). Conectividad fluvial. En: Guerra-Hernández, E. y Cruz-Flores, G. *Ecosistemas ribereños de montaña*. Pp. 76-77.

Ibarrarán M. E., Mendoza A., Pastrana C. y Manzanilla E, J. (2017). Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México. *Región y sociedad*.

IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2019). ¿Qué es una cuenca?. Recuperado el

17 de noviembre de 2023 de Gobierno de México: [¿Qué es una cuenca? | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua | Gobierno | gob.mx \(www.gob.mx\)](#)

Instituto de Incidencia Ambiental (IARNA). (2003). Estado actual de los bosques en Guatemala. Instituto de Incidencia Ambiental Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas. Pp 68.

Jiménez, B. (2001) La contaminación ambiental en México. Colegio de Ingenieros Ambientales de México. Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México. Instituto de Ingeniería de la UNAM. La Contaminación Ambiental en México - Blanca Elena Jiménez - Google Libros

Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America J. 61. Pp. 4-10.

Karmakar, T., Sirajul H., S.M. Mohammad M. H., Mandira, S., Enamul H., Md. (2019). Water quality parameter as a predictor of small watershed land cover, Ecological Indicators, 106. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105462>

Kasangaki, A., L. J. Chapman y J. Balirwa. (2008). Land use and the ecology of benthic macroinvertebrate assemblages of high-altitude rainforest streams in Uganda. Freshwater Biology, 53. Pp. 681-697.

Korkusuz E.A., Beklioglu M. y Demirer G.N. (2004). Treatment efficiencies of the vertical flow pilot-scale constructed wetlands for domestic wastewater treatment. Turkish J. Eng. Env. Sci. 28. Pp.333-344.

Leñero, L. A.-L., De Azcárate, J. G., Cleef, A. M., & González Trápaga, A. (2004). Las comunidades vegetales del zacatonal alpino de los volcanes Popocatepetl y Nevado de Toluca, Región Central de México. Phytocoenologia, 34(1). Pp. 91-132.

Liu, Y., Tao, Q., Liang, C., & Wu, Y. (2011). Research on water resources conservation of mountain river based on the concept of region partition. Journal of Mountain Science,

8(4). Pp. 582-591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-011-0241-9>.

López, V. H., Balderas, M. A., Chávez, M. C., Juan, J. I., & Gutiérrez, J. G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *Ciencia Ergo Sum*, 22(2), Pp. 136-144.

Lu Y., Song S., Wang R., Liu Z., Meng J., Sweetman A.J., Jenkins A., Ferrier R.C., Li H., Luo W., Wang T. (2015). Impactos de la contaminación del suelo y el agua en los riesgos para la seguridad alimentaria y la salud en China *Environ. Int.*, 77. Pp. 5-15.

Maass, J. M., Balvanera, P., Castillo, A., Daily, G. C., Mooney, H. A., Ehrlich, P., Quesada, M., Miranda, A., Jaramillo, V. J. (2005). Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society*, 10(1). Pp.17.

Mascot G. E. (2013). Azufre en el sistema agua-sedimento-suelo para ambientes ribereños asociados a diferentes condiciones de suelo. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Tesis Digital.

Margalef, R.(1983). *Limnología*. Editorial Omega. Barcelona, España.

Martínez Dallos, I. D., y Pinilla Agudelo, G. A. (2018). Índice de estado limnológico fluvial para los ríos de la cuenca alta del río Chicamocha, Boyacá-Colombia. *Luna Azul*, (46), 125–144. <https://doi.org/10.17151/luaz.2018.46.8>

Mendoza C, M., Quevedo Nolasco, A., Bravo V. Á., Flores M. H., De La Isla De Bauer, M., Gavi Reyes, Francisco, & Zamora Morales, B. (2014). Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva Ley General de Aguas de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(4). Pp. 429-436.

Menéndez, C. Dueñas, J. (2018) Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional. *Ing. hidráulica y ambiental*, 39(3).

Mercado C., J. E. (2017). Validación de la metodología analítica para la determinación de fosfato

en agua potable por espectrofotometría ultravioleta-visible-método del azul de molibdeno con ácido ascórbico. Facultad de ciencias farmacéuticas. Universidad de Cartagena.

Monfil H. Luis F. (2020). Calidad ecológica de dos sistemas ribereños de montaña y su relación con el uso de suelo. (Tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México. Tesis Digital.

Moon, Hyun-Shik & Solomon, Tamirat. (2019). Mountain Forests Challenges and Management. Moreno R. A., Reyes C. J. L. y Márquez H. C. (2015). Tópicos selectos de sustentabilidad: Un reto Permanente. Universidad Juárez del Estado de Durango.

Morales, L. G. (2010). Evaluación de la calidad del agua en el Río Magdalena, D.F. como servicio ecosistémico. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/122752>

Muotka, T. & P. Laasonen. (2002). Ecosystem recovery in restored headwater stream: the role of enhanced leaf retention. *Journal of Applied Ecology*, 39. Pp. 145-156.

Murtinho, F., Tague, C., Bievre, B. de, Eakin, H., & Lopez-Carr, D. (2013). Water Scarcity in the Andes: A Comparison of Local Perceptions and Observed Climate, Land Use and Socioeconomic Changes. *Human Ecology*, 41(5). Pp. 667-681.

Nahuelhual, L. y D. Núñez. (2011). Servicios ecosistémicos: contribución y desafíos para la conservación de la biodiversidad. En: J. SIMONETTI & R. DIRZO, *Conservación Biológica: Perspectivas desde América Latina*, pp. 175-193. Editorial Universitaria.

Nájera, O. Bojórquez, J. Cifuentes, J. y Marceleño, S. (2010). Cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mololoa, Nayarit. *Biociencias*. 1(1). Pp. 19-29.

Navarro A., Herrera J. y Morales L. (2017). Los niveles de microcontaminantes orgánicos explican una muerte masiva de peces en el río Atoyac, Puebla, México. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(4). Pp. 15-23.

NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de agua-medición de sólidos sedimentables en aguas

naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la nmx-aa004-scfi-2000).

NMX-AA-029-SCFI-2001 análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-079-SCFI-2001 análisis de aguas - determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-154-SCFI-2011 análisis de agua – determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas- método de prueba.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable: incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones. 3^{ra} ed.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda. Guías para la calidad del agua de consumo humano: 4^a ed. que incorpora la primera adenda; 2017 - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud (paho.org)

Pacheco, J., Cabrera, A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. Ingeniería. 7(2). Pp. 47-54. Park, Y.-S., Kwon, Y.-S., Hwang, S.-J., Park, S., (2014). Characterizing effects of landscape and morphometric factors on water quality of reservoirs using a self-organizing map. Environ. Modell. Software 55. Pp. 214–221.

Peña Ramírez, J. (2004). El agua, espejo de los pueblos. Ensayos de ecología política sobre la crisis del agua en México en el umbral del milenio, México, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM.

Postel, s. & Thompson, B. (2005). Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services, Natural Resources Forum, (29). Pp. 98-108.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2008). Water Quality for Ecosystems and Human Health. 2nd Edition. Centro Regional Europeo de Ecohidrología (ERCE), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Ren W., Yang Zhong, John Meligrana, Bruce Anderson, W. Edgar Watt, Jiakuan Chen, Hok-Lin Leung, Urbanization, land use, and water quality in Shanghai. (2003). Environment International, 29(5). Pp. 649-659. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00051-5)

Roberts, T. L. (2007). Right product, right rate, right time and right place the foundation of best management practices for fertilizer. Pp. 29-32.

Robles, V. E.; González, A. M. F. y Castillo, N. P. (2004). Contaminantes físicos y químicos del agua: sus efectos en el hombre y en el medio ambiente. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México.

Roldán P., G. (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: propuesta para el uso del método BMWP. Universidad de Antioquia.

Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical 2ª Edición. Editorial Universidad de Antioquia. P. 440.

Romero, J., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Mateo, M-A & Regnier, C. (1992). The Detritic Compartment in a Posidoniaoceanic Meadow: Litter features, decomposition rates and mineral stocks. P.S.Z.N.I: Mar. Ecol., 13(1). Pp. 69-83.

Rosenberg D.M., McCully P. y Pringle C.M. (2000). Global-scale environmental effects of hydrological alterations: Introduction. BioScience 50. Pp. 746-751.

Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento de Uso de la Biodiversidad.

Saldívar, V. A. (2007). Las aguas de la ira: economía y cultura del agua en México ¿sustentabilidad o gratuidad?, Facultad de Economía-UNAM.

- Sánchez, O., M. Herzing, E. Peters, R. Martínez y L. Zambrano (2007), Perspectivas sobre la conservación de ecosistemas acuáticos en México, Instituto Nacional de Ecología.
- Scarsbrook M, J Quinn, J Halliday, R Morse. (2001). Factors controlling litter input dynamics in streams draining pasture, pine, and native forest catchments. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 35. Pp.751-762.
- Schiavo, B., Inguaggiato, C., Arredondo-Palacios, T. E., & Meza-Figueroa, D. (2021). Emisiones volcánicas: origen e impacto en la atmósfera. *Epistemus*, 15(30).
<https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i30.160>
- Segnini. y Chacon, M.M. (2005). Caracterización fisicoquímica del hábitat interno y ribereño de ríos andinos en la cordillera de Mérida, Venezuela. *Sociedad Venezolana de Ecología. Ecotrópicos*. 18(1). Pp.18-61.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2005). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, capítulo 7. Agua. Calidad del agua.
http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/07_agua/cap7_2.html
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2010). Informe de la situación del medio ambiente en México. Cap. 2 Vegetación.
http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.1_Vegetacion/index.shtml
- SEMARNAT-COLPOS. (2003). Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1:250 000. Memoria Nacional. Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Posgraduados. P. 68.
- Severiche, S. C., Acevedo, B. R. (2013). Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas. Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso.
- Shi, P., Zhang, Y., Li, Z.B., Li P., u G.C. (2017). Influencia del uso de la tierra y los patrones de

cobertura de la tierra en la calidad estacional del agua a escalas multiespaciales Catena, 151. Pp. 182-190.

Soledad P., A. (2013). Comportamiento nutrimental del sistema agua-suelo en la zona occidental del Parque Nacional Izta-Popo. (Tesis de Licenciatura) Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Tesis Digital.

Soria C., R. A. (2016). Calidad del agua y el cambio en el uso del suelo en la subcuenca de San Martín Texmelucan. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Tesis Digital

Stoddard J.L., Larse D.P., Hawkins C.P., Jonson R.K. y Norris R.H. (2006). Setting expectations for the ecological conditions of streams: the concept of reference condition. *Ecological Applications* 16. Pp. 1267-1276.

Taylor, C. M., M. R. Winston, and W. J. Matthews. (1993). Fish species-environment and abundance relationships in a Great Plains River system. *Ecography* 16. Pp. 16-23.

Vasquez R.J., & Reinoso F. G. (2012). Estructura de la fauna béntica en corrientes de los Andes colombianos. *Revista Colombiana de Entomología*, 38(2). Pp. 351– 358.

Villena C., J. A. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Rev Perú Med Exp Salud Publica*,35(2). Pp.304- 308. Doi :/10.17843/rpmesp.2018.352.3719

Vitousek M. P, AberD., J, Howarth W. R., Likens E. G., Matson, A. P.,Schindler W. D.Schlesinger H. W. y Tilman G. D. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological applications*, 7(3), pp 737-750.

Walsh, C. J., A. H. Roy, J. W. Feminella, P. D. Cottingham, P. M. Groffman y M. P Morgan II. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of North American Benthological Society*, 24. Pp. 706-723.

Wang, X., Zheng, D., Shen, Y. (2008). Land use change and its driving forces on the Tibetan Plateau during 1990-2000. (72). Pp. 56-66.

- Wanielista, P. M., Kersten R. y Eaglin R. (1997). Hidrología: Cantidad de agua y control de calidad. Wiley.
- Wetzel, R.G. (2001). Limnology. 3^{ra} ed. Academic Press.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- Zhao Y. (2017). Assessing natural and anthropogenic influences on water discharge and sediment load in the Yangtze River, China. *Science Total Environmental*.
- Zhou, P., Huang, J., Pontius, R.G., Hong, H., (2016). New insight into the correlations between land use and water quality in a coastal watershed of China: does point source pollution weaken it? *Sci. 66 total Environ.* 543. Pp. 591–600.
- Zhou, T., J. Wu & S. Peng. (2012). Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: A case study of the Dongjiang River watershed, China. *Ecological Indicators* 23. Pp,166–175.

Anexos

	Temp	pH	OD	STD	SS	DQO	Nitratos	Nitritos	Amonio	FT	Ortofosfat os	Sulfatos	Sulfuros	Caudal
Temp		0.7887	- 0.5241	0.7001	0.5126	0.5586	0.3553	0.6987	0.7030	0.6102	0.6081	0.5238	0.0596	0.2779
		(66)	(69)	(67)	(62)	(69)	(69)	(69)	(69)	(67)	(69)	(69)	(69)	(67)
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0034	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6230	0.0240
pH	0.7887		- 0.3490	0.6874	0.4748	0.3233	0.2913	0.7763	0.6191	0.4778	0.5830	0.6379	0.2143	0.5335
	(66)		(66)	(64)	(59)	(66)	(66)	(66)	(66)	(64)	(66)	(66)	(66)	(64)
		0.0000	0.0049	0.0000	0.0003	0.0092	0.0188	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0841	0.0000
OD	-0.5241	- 0.3490		- 0.2350	- 0.3246	- 0.0248	- 0.0523	- 0.1467	- 0.4018	- 0.4984	- 0.1255	- 0.1417	0.0905	- 0.1877
	(69)	(66)		(67)	(62)	(69)	(69)	(69)	(69)	(67)	(69)	(69)	(69)	(67)
		0.0000	0.0049	0.0562	0.0112	0.8380	0.6660	0.2265	0.0009	0.0001	0.3005	0.2425	0.4554	0.1272
STD	0.7001	0.6874	- 0.2350		0.6563	0.4599	0.5721	0.7790	0.4998	0.2626	0.8248	0.6677	0.3369	0.1859
	(67)	(64)	(67)		(60)	(67)	(67)	(67)	(67)	(67)	(67)	(67)	(67)	(65)
		0.0000	0.0000	0.0562	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0329	0.0000	0.0000	0.0062	0.1369
SS	0.5126	0.4748	- 0.3246	0.6563		0.6112	0.4644	0.4200	0.4810	0.2531	0.6057	0.4814	0.2119	0.1481
	(62)	(59)	(62)	(60)		(62)	(62)	(62)	(62)	(60)	(62)	(62)	(62)	(60)
		0.0001	0.0003	0.0112	0.0000	0.0000	0.0003	0.0010	0.0002	0.0519	0.0000	0.0002	0.0980	0.2553
DQO	0.5586	0.3233	- 0.0248	0.4599	0.6112		0.4926	0.4657	0.5441	-0.0096	0.5971	0.4316	0.0667	0.0904
	(69)	(66)	(69)	(67)	(62)		(69)	(69)	(69)	(67)	(69)	(69)	(69)	(67)
		0.0000	0.0092	0.8380	0.0002	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.9375	0.0000	0.0004	0.5822	0.4629
Nitratos	0.3553	0.2913	- 0.0523	0.5721	0.4644	0.4926		0.4276	0.4756	-0.0239	0.4708	0.3995	0.1951	0.2015
	(69)	(66)	(69)	(67)	(62)	(69)		(69)	(69)	(67)	(69)	(69)	(69)	(67)
		0.0034	0.0188	0.6660	0.0000	0.0003	0.0000	0.0004	0.0001	0.8462	0.0001	0.0010	0.1076	0.1017
Nitritos	0.6987	0.7763	- 0.1467	0.7790	0.4200	0.4657	0.4276		0.6596	0.3337	0.7791	0.6790	0.2587	0.4500
	(69)	(66)	(69)	(67)	(62)	(69)	(69)		(69)	(67)	(69)	(69)	(69)	(67)
		0.0000	0.0000	0.2265	0.0000	0.0010	0.0001	0.0004	0.0000	0.0067	0.0000	0.0000	0.0329	0.0003
Amonio	0.7030	0.6191	- 0.4018	0.4998	0.4810	0.5441	0.4756	0.6596		0.4620	0.6208	0.4178	0.3450	0.3567
	(69)	(66)	(69)	(67)	(62)	(69)	(69)	(69)		(67)	(69)	(69)	(69)	(67)
		0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	0.0002	0.0000	0.0006	0.0044	0.0038
FT	0.6102	0.4778	- 0.4984	0.2626	0.2531	- 0.0096	- 0.0239	0.3337	0.4620		0.1796	0.0359	0.1226	0.0918
	(67)	(64)	(67)	(67)	(60)	(67)	(67)	(67)	(67)		(67)	(67)	(67)	(65)
		0.0000	0.0001	0.0001	0.0329	0.0519	0.9375	0.8462	0.0067	0.0002	0.1445	0.7705	0.3192	0.4629
Ortofos	0.6081	0.5830	- 0.1255	0.8248	0.6057	0.5971	0.4708	0.7791	0.6208	0.1796		0.6275	0.5013	0.1411
	(69)	(66)	(69)	(67)	(62)	(69)	(69)	(69)	(69)	(67)		(69)	(69)	(67)
		0.0000	0.0000	0.3005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.1445	0.0000	0.0000	0.2518
Sulfatos	0.5238	0.6379	- 0.1417	0.6677	0.4814	0.4316	0.3995	0.6790	0.4178	0.0359	0.6275		-0.0777	0.3444
	(69)	(66)	(69)	(67)	(62)	(69)	(69)	(69)	(69)	(67)	(69)		(69)	(67)
		0.0000	0.0000	0.2425	0.0000	0.0002	0.0004	0.0010	0.0000	0.0006	0.7705	0.0000	0.5216	0.0051
Sulfuros	0.0596	0.2143	0.0905	0.3369	0.2119	0.0667	0.1951	0.2587	0.3450	0.1226	0.5013	-0.0777		0.0916
	(69)	(66)	(69)	(67)	(62)	(69)	(69)	(69)	(69)	(67)	(69)	(69)		(67)
		0.6230	0.0841	0.4554	0.0062	0.0980	0.5822	0.1076	0.0329	0.0044	0.3192	0.0000	0.5216	0.4566
Caudal	0.2779	0.5335	- 0.1877	0.1859	0.1481	0.0904	0.2015	0.4500	0.3567	0.0918	0.1411	0.3444	0.0916	
	(67)	(64)	(67)	(65)	(60)	(67)	(67)	(67)	(67)	(65)	(67)	(67)	(67)	
		0.0240	0.0000	0.1272	0.1369	0.2553	0.4629	0.1017	0.0003	0.0038	0.4629	0.2518	0.0051	0.4566