



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO
Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LAS
SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

PRESENTA

ANDREA YADIRA GÓMEZ GARCÍA

DIRECTORA DE TESIS

DRA. ELOISA ADRIANA GUERRA HERNÁNDEZ

ASESORES:

DR. GERARDO CRUZ FLORES

DR. GUILLERMO ARTEMIO BLANCAS ARROYO

PROYECTO APOYADO POR PAPIME PE-205023

CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE, 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.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA



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



SUSTENTANTE: GOMEZ GARCIA ANDREA YADIRA

TITULO DEL TRABAJO:

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LAS SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

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
M. EN C.	VALDERRABANO GOMEZ JUAN MANUEL (Suplente)	2006-08-14
M. EN C.	ORTIZ BURGOS GABRIELA SELENE (Suplente)	2008-02-05

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

DR. VICENTE JESUS HERNANDEZ ABAD

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

***“No hay nada más maravilloso que ser un científico,
en ninguna parte preferiría estar más que en mi laboratorio,
manchando mi ropa y cobrando por jugar”***

Marie Curie

***“El amor por todas las criaturas vivientes
es el más grande atributo del ser humano”***

Charles Darwin

***“Al final conversaremos sólo lo que
amamos, amaremos sólo lo que
entendamos y entenderemos sólo lo que
nos hayan enseñado”***

Baba Dioum

***“Una última cosa, no le temas al fracaso
todos los que te amamos te conocimos antes de que triunfaras,
porque hagas lo que hagas, estés donde estés,
estaremos orgullosos de tí, y cuando estés allá quema todos los barcos”***

Oswaldo Molina

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la *Universidad Nacional Autónoma de México*, siempre estaré agradecida por cada oportunidad que me diste y me darás, siempre estarás presente en mi camino.

A la *Facultad de Estudios Superiores Zaragoza*, por ser mi hogar durante una etapa muy esencial en mi vida y por ayudarme completar mi formación académica.

Al *Colegio de Bachilleres Plantel "16"* por ofrecerme las herramientas necesarias para elegir mi rumbo, siempre será un pilar muy importante en mi formación académica.

Por supuesto a la *Carrera de Biología*, por darme nuevas herramientas de aprendizaje, por darme solución a los problemas y alentarme en poner en alto a los biólogos y biólogas de la FESZ. Siempre estaré orgullosa de ti, formas parte de mí día a día.

Al Laboratorio de *Calidad de Agua y Ecohidrología* por darme los instrumentos necesarios para realizar cada una de las actividades que requerí para completar esta etapa.

Si a alguien le debo este logro es a la *Dra. Eloisa Adriana Guerra Hernández*, gracias infinitas por siempre confiar en mí, por el tiempo y apoyo. Nunca olvidare cada uno de los consejos que recibí con la mejor intención de ayudarme a cumplir esta meta, gracias por todo el cariño y apoyo. Este camino me hizo encontrarme con una persona maravillosa, valoro tanto tenerla en mi vida, la quiero mucho.

A mis asesores

Dr. Gerardo Cruz Flores gracias por los consejos y el apoyo que recibí con la mejor intención de mejorar no solo mi formación académica y profesional sino también personal. Gracias por todo el cariño que siempre recibí, en usted encontré un amigo, lo quiero mucho.

Dr. Guillermo A. Blancas Arroyo por los consejos que desde un inicio recibí, pero sobre todo, por el tiempo y dedicación que siempre me regalo y que me ayudaron a completar esta etapa.

A mis sinodales

M. en C. Selene G. Ortiz Burgos y *M. en C. Juan M. Valderrabano Gómez*, por el tiempo dedicado y consejos que me otorgaron para mejorar este trabajo, gracias.

**COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS
DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA**

A la beca proporcionada por *proyecto PAPIME PE-208821*, para concluir mis estudios de licenciatura.

A los recursos aplicados del *proyecto PAPIME PE-205023* para la conclusión del trabajo de tesis.

Jamás me podría olvidar de *mi familia*, quienes siempre me dieron el tiempo, apoyo, consejos, cariño, paciencia, amor y las herramientas necesarias, para convertirme en lo que hoy en día soy. No me alcanzaría la vida para regresarles un poquito de todo lo que están dispuestos a hacer por mí. Son lo más valioso que tengo.

DEDICATORIAS

A *mi mamá* por siempre protegerme, por las lecciones de vida, por cuidarme y darme el amor más puro, sin ti no hubiera podido concluir esta etapa, así que este es un logro que siempre voy a compartir y a celebrar contigo. Mami eres lo mejor y más bonito que tengo, gracias por todo, te voy amar por el resto de mi vida.

A *mi papá* por ser mi red de apoyo, por escucharme y alentarme día con día a continuar con este proyecto, gracias por cuidarme y amarme tanto. Este logro siempre lo compartiré contigo, espero que Andy García siempre te haga sentir muy orgulloso. Mi amor por ti jamás se va a comparar con ningún otro.

A *mi hermano* por ser el mejor consejero, por alentarme a ser mejor persona, por defenderme y ser mí mejor aliado, me has enseñado tantas cosas de la vida que agradezco infinitamente que seas mi hermano. Gracias por enseñarme que mi felicidad siempre debe de estar primero, te amo tanto franki.

Al amor de mi vida y compañero de aventuras Osvaldo por estar cuando lo necesito, por el amor que me regala día con día. Fue, es, y será una pieza clave para que esto pudiera concluir, gracias por estar en mi vida y por confiar en mí, pero sobre todo por ayudarme y alentarme a cumplir mis sueños. Te amo con mi alma y como siempre ¡Gracias!. Nuestros corazones siempre estarán unidos.

Andy no sería nadie sin ustedes.

A mis abuelitos

A *Mamá Vir* por siempre estar al pendiente de mí, por cuidarme y regalarme amor a manos llenas, gracias por estar a mi lado y darme los mejores consejos. Siempre te voy agradecer todo lo bonito que aportas a mi vida, espero algún día regresarte un poquito de toda la felicidad que me das, te amo.

A *Papá Chuy*^t me diste la lección más importante para que esto pudiera concluir ¡No tuve que conocer a los tiburones! Gracias por tanto y perdón por tan poco, un beso hasta el cielo, te amo.

A mi *abuelita Mary* porque en el fondo sé que se preocupa por mí, gracias por escucharme y apoyarme, te quiero.

A mis tías

A *Mamá Tere*^t por cuidarme, por las lecciones de vida, por el amor y el cariño que siempre me dio, gracias infinitas por todo lo maravilloso que aportaste en mi vida, siempre te llevo conmigo. Fuiste una persona que ame con todas mis fuerzas y me hubiera encantado compartir esta felicidad contigo. Te mando un abrazo y un beso hasta el cielo, te amo.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

A *Mamá Lucy* por regalarme tanto amor y cariño, por alentarme a luchar por mis sueños y ser mejor persona. Gracias por ser mi apoyo y esencialmente por todas las palabras positivas hacia mí, valoro tanto escucharte. Siempre serás un pilar muy importante en mi vida y mi amor por ti siempre será incondicional. Esta felicidad siempre será acompañada contigo.

A mis primas *Lucy, Teresita, Brenda, Maryan, Eme y Brenda P.* gracias por cuidarme, por todas las palabras bonitas que me regalan, por ser las primeras en alegrarse de mis logros, pero sobre todo por enseñarme el amor de hermanas. Las amo. *Teresita* gracias por tanto, este camino siempre fue, es y será a tu lado.

A mis primos *Mario, Israel e Irvin* por el apoyo que siempre me regalan, gracias por alegrarse de mis logros, los quiero.

A mis sobrinos *Carlos, Marylu, Mauricio, Leo, Betin, Teresita y Mateo* porque a pesar de su corta edad me alegran la vida. Cada uno de ustedes tiene una parte de mi corazón, los voy amar toda mi vida.

A mis tíos *Mario, Gustavo, Adrián y Armando* por escucharme y ayudarme ante cualquier situación, los quiero. *Gustita* gracias por todo el apoyo que me brindaste desde pequeña, estoy tan agradecida contigo, te quiero.

A *Pipo* por el cariño y apoyo que siempre nos regala, no solo a mí, sino a toda mi familia, gracias por las risas y las nuevas experiencias, te quiero.

A *Mauricio* gracias por todas las risas y las aportaciones positivas hacia mí.

A la familia *Martínez Olvera* por siempre apoyarme y estar al pendiente de mí. Gracias por todo el cariño que siempre me regalan, los quiero.

A *Edgar Moisés* por estar al pendiente de mí y contribuir para que este barco navegara, estoy tan agradecida por todo.

A mis compañeros de vida *Vicky, Oscar, Osmar, Fabiola, Raquel y Lupe* por estar conmigo durante estos largos años, con ustedes asegure que la distancia no impide tener amistades leales, gracias por estar cuando lo necesito, ustedes sin excepción son mi familia, los amo.

A mi amiga incondicional *Mariana* por apoyarme, quererme e incluso regañarme cuando lo necesitaba, nunca me cansare de decir que me ayudaste a tomar decisiones muy importantes y lo agradezco de corazón, eres muy importante para mí, te amo; a mi mejor amiga *Kas* por nunca dejarme sola, por apoyarme en todas mis decisiones, gracias por luchar a mi lado, por escucharme todos los días y darme el apoyo que necesito, tú más que nadie sabes lo mucho que te amo. Estoy tan agradecida con la vida por ponerlas en mi camino.

**COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS
DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA**

A la familia que me regalo la Universidad *Ángel, Emiliano, Alejandro, Andy, Mireya* y *Diego*, realmente estoy muy agradecida por toda la paciencia, lealtad, cariño y ayuda que me dieron durante toda la carrera, por todas y cada una de las experiencias que vivimos, estoy segura de que serán muchas más, los amo.

A mis amigos del laboratorio *Aranza, Sebas, Gabo, Helena, Gibs* y *Diana*, por acompañarme durante este proyecto, por los consejos, paciencia y el cariño que me dieron durante toda esta etapa. Gracias por todas las experiencias bonitas que pasamos juntos, estoy muy convencida que tendremos muchas nuevas por contar. Ustedes se convirtieron en mi familia, los amo.

A mi familia perruna *Hitler^t, Naila* y *Mar*, porque son los mejores seres sintientes que la vida me pudo poner en el camino, son mi complemento.

Especialmente esta felicidad siempre será dedicada a *Andrea Yadira Gómez García*, estoy muy orgullosa de todo lo que has logrado. Felicidades por luchar y lograr una meta tan importante. Amate siempre.

Este logro no pudo concluir sin cada uno de ustedes, por que sembraron en mí responsabilidad, tolerancia, paciencia y sobre todo perseverancia. Soy tan feliz y afortunada por tenerlos en mi vida, GRACIAS INFINITAS a todos y cada uno de ustedes.

Así que este logro es de todos, porque como siempre digo...

“No vengo sola, mi familia viene detrás”.

**COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS
DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA**

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
ANTECEDENTES.....	5
MARCO TEÓRICO	7
CUENCAS HIDROGRÁFICAS	7
ECOSISTEMAS RIBEREÑOS	8
RESERVA DE LA BIOSFERA LOS VOLCANES.....	10
AGUA.....	13
CALIDAD DEL AGUA	13
SUELO.....	15
CALIDAD DEL SUELO	16
NITRÓGENO	17
DINÁMICA DEL NITRÓGENO.....	18
NITRÓGENO EN AGUA.....	19
NITRÓGENO EN SUELO.....	20
EFECTOS DEL EXCESO DE NITRATOS, NITRITOS Y AMONIO EN LA SALUD HUMANA.....	21
FÓSFORO	21
DINÁMICA DEL FÓSFORO.....	22
FÓSFORO EN AGUA.....	23
FÓSFORO EN SUELO.....	23
EFECTOS DEL EXCESO DE FÓSFORO Y ORTOFOSFATOS EN LA SALUD HUMANA.....	24
RELACIÓN N:P.....	24
JUSTIFICACIÓN.....	26
HIPÓTESIS	27
OBJETIVOS	27
OBJETIVO GENERAL	27
OBJETIVOS PARTICULARES	27
CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	28
SUBCUENCA NEXAPA	28
SUBCUENCA ATOYAC.....	29
MÉTODO.....	31

**COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS
DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA**

TRABAJO DE GABINETE.....	31
DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	31
TRABAJO DE CAMPO.....	31
MUESTREO DE AGUA	32
MUESTREO DE SUELO	32
DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS IN SITU.....	33
TRABAJO DE LABORATORIO	34
PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE AGUA Y SUELOS RIBEREÑOS.....	34
PARÁMETROS HÍDRICOS	35
PARÁMETROS EDÁFICOS.....	37
MANEJO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	38
RESULTADOS	40
VARIACION DE LAS PROPIEDADES HÍDRICO-EDÁFICAS	41
PARÁMETROS HÍDRICOS	41
PARÁMETROS EDÁFICOS.....	52
RELACIÓN N:P.....	57
COMPARACIÓN ALTITUDINAL.....	57
AGUA	57
SUELO	62
ANALISIS DE CORRELACIÓN MULTIPLE.....	64
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	65
SUELO.....	70
CONCLUSIONES.....	73
AGUA.....	73
SUELO.....	73
REFERENCIAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las partes de una cuenca.....	8
Figura 2. Ecosistema ribereño	9
Figura 3. Ejemplo de zonas de ribera de izquierda a derecha, Nealtican, El Rinconcito y Río Ahuehueyo	10
Figura 4. Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	12
Figura 5. Interacción agua-suelo en una zona ribereña.....	14
Figura 6. Dinámica del nitrógeno	19
Figura 7. Dinámica del fósfo.....	22
Figura 8. Sitio de estudio, subcuenca Nexapa	29
Figura 9. Sitio de estudio, subcuenca Atoyac.....	30
Figura 10. Ubicación de los sitios de estudio.....	31
Figura 11. Toma de muestra de agua.....	32
Figura 12. Diagrama del muestreo de suelo	33
Figura 13. Toma de muestra de suelo	33
Figura 14. Parámetros in situ. A: Temperatura ambiente; B: Medición del transecto; C: Ancho del cauce; D: Traspacidad; E: Velocidad del cauce; F: Conductividad; G: pH y temperatura y H: Oxígeno disuelto	34
Figura 15. Parámetros hídricos determinados en laboratorio. A: Nitratos; B: Nitritos; C: Amonio; D: Fósforo total y E: Ortofosfatos.....	36
Figura 16. Parámetros edáficos determinados en laboratorio. A: pH; B: Humedad; C: Nitrógeno total y D. Fósforo total	38
Figura 17. Ubicación de los sitios de muestreo de las subcuencas Nexapa y Atoyac (...	40
Figura 18. Variación altitudinal de la T. Ambiental con respecto a la altitud y el tiempo ...	41
Figura 19. Variación altitudinal de la T. del agua con respecto a la altitud y el tiempo.....	41
Figura 20. Comparación anual de la temperatura ambiente	42
Figura 21. Comparación anual de la temperatura del agua	42
Figura 22. Variación altitudinal del pH en agua con respecto a la altitud y el tiempo	43
Figura 23. Comparación anual del pH del agua	43
Figura 24. Variación altitudinal de la conductividad del agua con respecto a la altitud y el tiempo.....	44
Figura 25. Comparación anual de la conductividad del agua	44
Figura 26. Variación altitudinal del O.D en agua con respecto a la altitud y el tiempo	45
Figura 27. Comparación anual del O.D del agua	45
Figura 28. Variación altitudinal de nitratos en agua con respecto a la altitud y el tiempo	46
Figura 29. Variación altitudinal de nitritos en agua con respecto a la altitud y el tiempo .	46
Figura 30. Variación altitudinal de amonio en agua con respecto a la altitud y el tiempo .	47
Figura 31. Comparación anual de nitratos del agua.....	48
Figura 32. Comparación anual de nitritos del agua	48
Figura 33. Comparación anual de amonio del agua.....	48
Figura 34. Variación altitudinal de fósforo total en agua con respecto a la altitud y el tiempo	49
Figura 35. Variación altitudinal de ortofosfatos en agua con respecto a la altitud y el tiempo	50

**COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS
DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA**

Figura 36. Comparación anual de fósforo del agua.....	51
Figura 37. Comparación anual de ortofosfatos del agua	51
Figura 38. Variación altitudinal del pH del suelo con respecto a la altitud y el tiempo.....	53
Figura 39. Comparación anual del pH del suelo	53
Figura 40. Variación altitudinal del %Humedad en suelo con respecto a la altitud y el tiempo	54
Figura 41. Comparación anual del %Humedad del suelo.....	54
Figura 42. Variación altitudinal del nitrógeno en suelo con respecto a la altitud y el tiempo	55
Figura 43. Comparación anual del %N del suelo por años	55
Figura 44. Variación altitudinal del fósforo con respecto a la altitud y el tiempo.....	56
Figura 45. Comparación anual del %P del suelo	56
Figura 46. Comparación altitudinal de la temperatura ambiental	57
Figura 47. Comparación altitudinal de la temperatura del agua	58
Figura 48. Comparación altitudinal del pH en agua.....	58
Figura 49. Comparación altitudinal de la conductividad en agua	59
Figura 50. Comparación altitudinal del O.D en agua.....	59
Figura 51. Comparación altitudinal de nitratos en agua.....	60
Figura 52. Comparación altitudinal de nitritos en agua	60
Figura 53. Comparación altitudinal de amonio en agua.....	61
Figura 54. Comparación altitudinal de fósforo total en agua.....	61
Figura 55. Comparación altitudinal de ortofosfatos en agua.....	62
Figura 56. Comparación altitudinal de pH en suelo	62
Figura 57. Comparación altitudinal de %humedad en suelo.....	63
Figura 58. Comparación altitudinal de %nitratos en suelo	63
Figura 59. Comparación altitudinal de %fósforo en suelo	64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro #1. Indicadores de la calidad del agua.....	15
Cuadro #2. Indicadores de la calidad del suelo.....	17
Cuadro #3. Periodo de muestreo.....	32
Cuadro #5. Promedio, Máximo y mínimo de las variables hídricas, por año.....	52
Cuadro #6. Promedio, máximo y mínimo de las variables edáficas, por año.....	57
Cuadro #7. Análisis de correlación múltiple	64

ACRÓNIMOS

T Amb. (°C)	Temperatura ambiental
T Agua (°C)	Temperatura del agua
pH	pH del agua
Cond ($\mu\text{S m}^{-1}$)	Conductividad eléctrica
OD (mg L ⁻¹)	Oxígeno disuelto
N	Nitrógeno en agua
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	Nitratos en agua
NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹)	Nitritos en agua
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	Amonio en agua
PT (mg L ⁻¹)	Fósforo Total
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	Ortofósatos
pH S	pH suelo
%H	Porcentaje de humedad en el suelo
%N	Porcentaje de nitrógeno en el suelo
%P	Porcentaje de fósforo en el suelo
Pro.	Promedio
Max.	Máximo
Min.	Mínimo

RESUMEN

Los bosques ribereños son sistemas que constituyen una interfaz entre los ecosistemas terrestres y acuáticos, dan lugar a una zona de transición que concede una relevancia en la conservación de los servicios ecosistémicos y recursos naturales.

Las zonas de ribera de las subcuencas Nexapa y Atoyac que forman parte de la Reserva de la Biosfera Los Volcanes (RBVL) son alteradas en diferente grado por las actividades que se realizan a lo largo del sistema fluvial, afectando la calidad del sistema hídrico-edáfico; razón por la que el objetivo de esta investigación fue evaluar y analizar el comportamiento espacial y temporal que presentan las concentraciones de nitrógeno y fósforo en el sistema hídrico-edáfico en los ambientes ribereños de las subcuencas.

Para conseguir este objetivo, se realizó un monitoreo de las propiedades físicas y químicas para agua y suelo, en 80 sitios de muestreo, distribuidos en las subcuencas Nexapa y Atoyac, en un rango altitudinal de 1900 a 2400 m. La investigación se realizó con ayuda de información recabada en los años 2005, 2007, 2013, 2014 y 2019 para el sistema hídrico, y 2014, 2018 y 2019 para el sistema edáfico. Para el sistema hídrico se realizaron registros de variables (temperatura ambiental y del agua, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nitratos, nitritos, amonio, fósforo total, ortofosfatos) y para el sistema edáfico (pH, porcentaje de humedad, porcentaje de nitrógeno y porcentaje de fósforo). Primeramente con ayuda del programa Microsoft Office Excel se realizaron gráficas, para describir la comparación espacial en función de los intervalos altitudinales y los años, posteriormente con el programa Statgraphics se realizó la comparación a través de pruebas no paramétricas, en las pruebas elegidas, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para identificar si existía diferencia estadística entre las medianas de las muestras y Mood's para comparar las medianas dentro de las muestras.

Los resultados muestran que las variables correspondientes para agua y suelo aumentaron sus valores, en su mayoría, en función del descenso altitudinal. Las formas químicas de nitrógeno y fósforo fueron las variables más significativas en las zonas baja, lo que indica una entrada considerable de nutrimentos al sistema, consecuencia de las actividades antropogénicas que se realizan en el área circundante, lo que disminuye la calidad del sistema hídrico-edáfico.

Las prospecciones futuras apuntan que el sistema hídrico-edáfico se conduce a un proceso de eutrofización, por lo que es necesario tomar medidas para evitar el exceso de contaminantes en el sistema.

ABSTRACT

Riparian forests are systems that constitute an interface between terrestrial and aquatic ecosystems, giving rise to a transition zone that provides relevance in the conservation of ecosystem services and natural resources.

The riparian areas of the Nexapa and Atoyac subbasins that are part of Los Volcanes Biosphere Reserve (RBVL) are altered to different degrees by the activities carried out along the river system, affecting the quality of the water-edaphic system. Therefore, the objective of this research was to evaluate and analyze the spatial and temporal behavior of nitrogen and phosphorus concentrations in the water-edaphic system in the riparian environments of the subbasins.

To achieve this objective, physical and chemical properties of water and soil were monitored in 80 sampling sites, which are distributed along the Nexapa and Atoyac sub-basins in an altitudinal range of 1900 to 2400 m. The research was carried out with the help of information collected in the years 2005, 2007, 2013, 2014 and 2019 for the water system, and 2014, 2018 and 2019 for the soil system. Variable records were made for the water system (environmental and water temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, nitrates, nitrites, ammonium, total phosphorus, orthophosphates) and for the edaphic system (pH, percentage of humidity, percentage of nitrogen and percentage of phosphorus). Firstly, with the help of the Microsoft Office Excel program, graphs were made, which describe the spatial comparison based on the altitudinal intervals and years, later with the Statgraphics program, the comparison was made through non-parametric tests, in the chosen tests, it was applied the Kruskal-Wallis test to identify if there was a statistical difference between the medians of the samples and Mood's to compare the medians within the samples.

The results show that the corresponding variables for water and soil increased their values, for the most part, as a function of the altitudinal decrease. The chemical forms of nitrogen and phosphorus were the most significant variables in the low areas, which indicates a considerable input of nutrients to the system, a consequence of the anthropological activities carried out in the surrounding area, which decreases the quality of the water-edaphic system.

Future surveys indicate that the water-edaphic system is leading to a process of eutrophication, so it is necessary to take measures to avoid excess contaminants in the system.

INTRODUCCIÓN

Los Bosques ribereños son sistemas complejos y únicos respecto a sus características biofísicas y sus procesos ecológicos (Sabo *et al.*, 2005). Son un mosaico formado por accidentes geográficos, comunidades y entornos dentro del paisaje (Naiman *et al.*, 1993). Presentan una estructura compleja y heterogénea, actúan como cinturón de protección, moderan los efectos negativos derivados de las presiones y amenazas del entorno (Allan, 2004).

Los ambientes ribereños constituyen un interfaz entre los ecosistemas terrestres y los acuáticos. Además, proporcionan diferentes servicios ecosistémicos como regulación, producción, protección, sociales y económicos.

Estos ambientes juegan un papel importante en numerosos procesos biológicos, retienen parte del nitrógeno y fósforo que son transportados por la escorrentía, desde los cultivos hasta los cursos de agua, además de la retención de los nutrientes, las bandas de vegetación sombrean el agua y reducen la temperatura durante los días calurosos, estabilizan las orillas, reducen los riesgos de erosión y ofrecen un hábitat a numerosas especies de animales y vegetales (Granados *et al.*, 2006).

Para conocer y estudiar los ambientes ribereños y su dinámica fluvial, es necesario conocer el origen de las aguas y los sedimentos que llegan a ellos, por lo que es indispensable identificar la vertiente y la cuenca en la que se localiza (Segnini y Chacón, 2005).

De acuerdo con CONANP (2010), La Reserva de Biosfera Los Volcanes abarca una superficie de 171,774 hectáreas y comprende 22 municipios de cuatro estados; Estado de México; (77,005 hectáreas en ocho municipios); Puebla (53,662.28 hectáreas con 10 municipios); Tlaxcala (8,488 hectáreas en dos municipios); y Morelos (3,657 hectáreas con dos municipios). En la región adyacente a las grandes elevaciones, dispuestas de sur a norte, se encuentran los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc.

A partir del 2 de junio del 2010, el Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl fue incluido en la lista de la Red Mundial de Reservas de la Biósfera de la UNESCO, durante la 22ª reunión del Consejo Internacional de Coordinación del Programa de Hombre y la Biósfera (MAB), celebrada en París, Francia; dándole el nombre de Reserva de la Biósfera Los Volcanes.

De acuerdo con el Ordenamiento Ecológico del Volcán Popocatepetl, la Sierra Nevada se divide en cuatro subcuencas, estas son: en el flanco occidental de la Sierra Nevada, la subcuenca denominada Chalco-Textcoco. Del lado oeste y suroeste se encuentra la subcuenca de Cuautla-Yautepec. En la parte oriental tenemos dos subcuencas, ambas también pertenecientes a la gran cuenca del río

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Balsas. Al norte, la subcuenca del Río Atoyac; al sur de este flanco oriental, la subcuenca del río Nexapa (SEMARNAT, 2013).

El nitrógeno y fósforo son elementos químicos necesarios para los seres vivos, dada su importancia para la agricultura grandes cantidades son suministradas a los suelo. Sin embargo el exceso de estos nutrientes en los ecosistemas, provocan un desbalance en su equilibrio y llegan a convertirse en tóxicos por lo que afectan el uso de los recursos y la salud humana.

El incremento de la población mundial y en consecuencia la necesidad de satisfacer las necesidades de los habitantes el sistema ecológico de La Reserva de la Biosfera Los Volcanes se encuentra alterado debido a las actividades antropológicas que se realizan en la zona. La ganadería, la introducción de especies exóticas, la agricultura, los incendios forestales, los cambios de uso de suelo, la sobreexplotación del bosque, que trae consigo efectos negativos para el sistema agua-suelo.

La degradación de los sistemas ribereños en las subcuencas Nexapa y Atoyac es resultante de la contaminación originada por: fuentes puntuales como lo son desagües domésticos e industriales; o por fuentes difusas las cuales abarcan aquellas generadas por actividades urbanas o rurales, es decir, fertilizantes, combustibles, solventes, entre otros. La contaminación de estos sistemas causó la disminución en la calidad del agua que llega a manantiales, pozos y escurrimientos, provocando un aumento en las concentraciones de nutrimentos, afectando del mismo modo la calidad del suelo.

Debido a la importancia que tienen estos bosques es de suma importancia cuidar las zonas de amortiguamiento, realizar estudios que examinen su biodiversidad e implementar proyectos de restauración ecológica.

ANTECEDENTES

Los ecosistemas fluviales han sido empleados por el hombre como fuente de recursos y como vía de eliminación de residuos, produciéndose una degradación paulatina e histórica de ellos. El proceso de la Revolución Industrial empeoró la situación a causa del aumento en la producción de materiales residuales, la introducción de nuevos contaminantes y la producción excesiva de residuos (Alonso y Camargo., 2005). Este proceso trajo consigo la urbanización de las cuencas de forma exponencial, cuya actividad antrópica generó cambios en el uso del suelo, contaminación por materia orgánica y enriquecimiento de nutrientes, degradación del bosque de ribera, rectificación y canalización de ríos, regulación de cauces, presencia de contaminantes inorgánicos y orgánicos persistentes y el aumento en la demanda del agua (Angelier, 2002).

La presencia de sedimentos contaminantes en ambientes acuáticos es una situación que se encuentra a nivel mundial desde el siglo XX. Esto se debe al vertido industrial, así como el uso de productos químicos como pesticidas que pasan a los sedimentos por las zonas agrícolas. Dentro de los contaminantes transportados, se incluyen escombros de construcción, petróleo, químicos tóxicos de automóviles, nutrimentos, virus, bacterias y metales pesados (Alcala-Jauregui *et al.*, 2014).

El estudio de los ecosistemas fluviales, con carácter científico inicia a partir de 1930 (Becerra, 2018) y evoluciona poco a poco identificando cada vez más las relaciones de los ecosistemas montañosos entre sí y con sus habitantes. En la década de los 70's se aprueba el programa de la ONU y la UNESCO sobre el Hombre y la Biosfera, que enfatiza el impacto que causan las actividades humanas en los ecosistemas de montaña.

Durante los últimos años las áreas ribereñas no se han respetado como una parte integral del río, y por diversas razones existe una creciente ocupación de estos espacios rurales por actividades antropogénicas como lo es la agricultura, aumentando la intensidad en el uso de la tierra y por tanto en el empleo de agroquímicos (herbicidas, pesticidas y fertilizantes) (Giorgi y Vilches, 2021).

A lo largo del siglo XX, para alimentar a la creciente población y la importancia de abastecer de nutrientes a todos los suelos del mundo, se adoptaron medidas para añadir N, P y K mediante el uso de fertilizantes sintéticos. Por lo que la demanda de fertilizantes ha aumentados globalmente, consecuencia del crecimiento económico, lo que ha aumentado la aplicación excesiva de fertilizantes siguiendo la idea de "cuanto más, mejor" (Tilman *et al.*, 2002).

Por consiguiente, la conservación de áreas ribereñas es algo que debería propiciarse para sostener la calidad de los ambientes fluviales o promover su recuperación.

Entre los trabajos importantes para estas zonas, se encuentra el de Segnini y Chacón (2005) quienes realizaron un trabajo donde caracterizan el hábitat ribereño de los ríos andinos en la cordillera de Mérida, Venezuela, abarcando los elementos físicos, químicos y biológicos propios del cuerpo de agua y del hábitat ribereño que afectan la estructura y función de la comunidad acuática, encontrando que las características de los cuerpos de agua, evidencian un gradiente altitudinal en las condiciones físicas y químicas del hábitat acuático.

Rivas y colaboradores (2009) evaluaron los aportes de nitrógeno y fósforo total, en época de lluvia y sequía que presentaron los ríos tributarios al Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela. Consecuencia de la recopilación de información obtenida en investigaciones en el periodo de 1974-2004.

Morales y Chávez (2010) determinaron la carga del nitrógeno y fósforo procedentes de las subcuencas aledañas al Río Tepenaguasapa, donde la carga de nutrimentos es originada por el pastizal, la actividad ganadera extensiva, tierras de labranza, monocultivo, manejo de aguas residuales, tala de árboles.

Los estudios realizados dentro de La Reserva de la Biosfera Los Volcanes, destacan temas sobre, metales pesados, nutrimentos, caracterización, clasificación de suelos, comportamiento nutrimental, biodiversidad, restauración, entre otros.

Cortés y Vega (2013) compararon la dinámica del C, N y P en el sistema agua-sedimento-suelo, en sitios con distintas condiciones de uso de suelo a lo largo de dos afluentes del Río Amecameca, concluyeron que la modificación por actividades recreativas, agrícolas y ganaderas perturban el ambiente ribereño.

Por otra parte, Soledad (2013) analizó el comportamiento nutrimental del fósforo y nitrógeno en el sistema agua-suelo de zonas ribereñas asociadas a cuerpos loticos permanentes a lo largo de la gradiente altitudinal en la región del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Concluye que la concentración de los nutrimentos conduce al sistema a un proceso de eutrofización en localidades dedicadas a la agricultura y urbanas.

Hernández (2021), evaluó la presencia y abundancia de bacterias de los géneros *Azospirillum* y *Azotobacter* y su relación con los contenidos de nitrógeno total en suelos ribereños de montaña, en un gradiente altitudinal con sitios de diferentes usos de suelo dentro de la Reserva de la Biosfera Los Volcanes.

Finalmente Monfil (2020) evaluó la calidad ecológica del bosque de ribera, en sitios con diferente uso de suelo de dos afluentes del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, utilizando el índice de calidad de Bosques de Ribera y el comportamiento de algunos parámetros físicos y químicos de agua y suelo.

MARCO TEÓRICO

CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Una cuenca se define como un área de tierra que drena o arroja todo el exceso de precipitación entrante en el mismo lugar, hacia el mismo cuerpo de agua o la misma área de elevación que resulta de su topografía (Yousuf y Singh, 2019).

También son definidas como espacios territoriales que están delimitados por un parteaguas, donde se concentran todos los escurrimientos que confluyen y desembocan en un punto de salida, que puede ser un lago o mar (SEMARNAT, 2013).

Son un mosaico complejo de ecosistemas naturales y transformados, en ellas se reconocen los vínculos entre zonas altas y bajas, donde los cursos del agua crean una conexión física entre las poblaciones alejadas unas de otras (Cotler, 2010).

Se estructuran por diferentes componentes, como lo son, biofísicos (agua y suelo), biológicos (flora y fauna) y antropogénicos (socioeconómicos, culturales, institucionales), los cuales están interrelacionados y tienen un equilibrio entre sí, de tal manera que al afectarse uno de ellos, se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema (Ramakrishna, 1997).

Los servicios ecosistémicos se definen como aquellos beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas, asimismo como las condiciones y procesos de los ecosistemas que generan o ayudan a generar beneficios para las personas (Raes, 2022).

Las cuencas hidrográficas proveen de servicios ecosistémicos, como lo son: regulación en los escurrimientos, almacenamiento de carbono, regulación climática; soporte en retención de suelos, producción de oxígeno, ciclo de nutrientes; abastecimiento de alimentos, madera, recursos genéticos y culturales, lo que implica tradiciones, conocimiento científico y, actividades recreativas.

Las cuencas se dividen a partir de la función hidrológica que desempeñan. Se reconocen tres diferentes zonas en una cuenca (Garrido *et al.*, 2010; SEMARNAT, 2013).

- 1) Área de colecta, captación, cabecera o cuenca alta:** Es el parteaguas en la porción altimétrica más elevada de la cuenca; abarca sistemas de montaña y lomeríos. Las aguas que se precipitan son captadas e infiltradas, posteriormente transformadas en los primeros escurrimientos.
- 2) Área de almacenamiento hídrico, de transición o cuenca media:** Es una zona de transición entre la cuenca alta y la cuenca baja. Los escurrimientos iniciales convergen aportando a diferentes caudales las concentraciones de sedimentos, contaminantes y materia orgánica que son consecuencia de las actividades que se realizan en cada subcuenca.

- 3) **Área de descarga, salida, de emisión hídrica o cuenca baja:** Es el sitio donde el río principal desemboca en el mar o lago. Principalmente es una zona de importantes ecosistemas, productiva para el uso agrícola, y es donde se acumulan los impactos de toda la cuenca.

Las cuencas permiten entender el ciclo hidrológico, asimismo identificar y cuantificar los impactos que se generan por las actividades humanas, que afectan su calidad, cantidad y temporalidad (Burgos *et al.*, 2015).

Los movimientos que se originan dentro de las cuencas crean una conexión entre los territorios de las zonas altas y las zonas bajas, lo que provoca que exista una acumulación a lo largo de los ríos, que se ve reflejado en la calidad, cantidad y variabilidad de los afluentes (Figura 1).

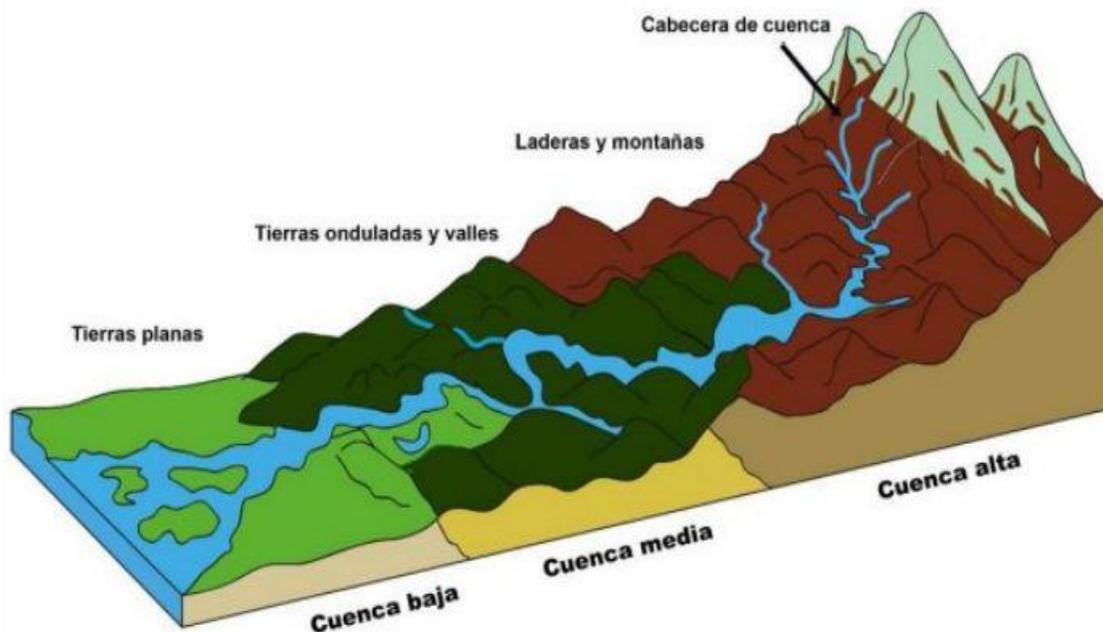


Figura 1. Esquema de las partes de una cuenca (Tomado de Vásquez *et al.*, 2016).

ECOSISTEMAS RIBEREÑOS

Los ecosistemas ribereños, zonas de ribera o ambientes ribereños, son áreas que se encuentran junto a un río o arroyo que presentan inundaciones periódicas que influyen en el entorno (Morales y Fernández, 2005). Estos sistemas funcionan como soporte de la biodiversidad, contienen límites, patrones, sucesiones, disposiciones verticales en estratos, son reservorios genéticos, los cuales están definidos por rasgos físicos (Granados-Sánchez *et al.*, 2006).

Cumplen la función de filtro, con una alta capacidad de absorción y almacenamiento, por lo cual se consideran sistemas depuradores y reguladores. Destacan como

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

zonas de amortiguamiento; es decir, otorgan una protección al sistema ecológico, ante el impacto que presentan los ríos y su entorno. Estas zonas de ribera son esenciales para mantener la vida y el paisaje de los ambientes terrestres y acuáticos (Naiman *et al.*, 2010).

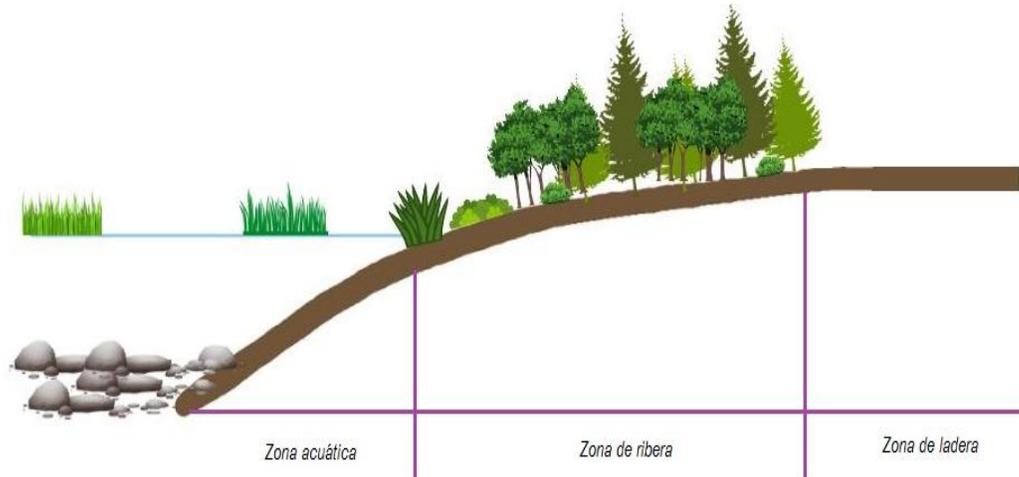


Figura 2. Ecosistema ribereño (Ilustración propia)

Los bosques de ribera desempeñan un papel importante en la dinámica de nutrientes, retienen parte del nitrógeno y fósforo que son transportados por la escorrentía, desde los cultivos en las zonas altas, hasta las áreas de desembocadura. Merece la pena subrayar que una banda de vegetación de ribera de 16 m de largo retiene un 50% del nitrógeno y 95% del fósforo (Granados-Sánchez *et al.*, 2006).

Asimismo, estas zonas actúan como agente transformador, cuando los procesos químicos y biológicos cambian la composición de los nutrientes. Por ejemplo, los suelos oxigenados, las bacterias y los hongos, convierten el nitrógeno de los escurrimientos y la materia orgánica presente, en nitratos que pueden ser aprovechados por las plantas. Al mismo tiempo cuando la humedad del suelo es alta, se presentan condiciones anaerobias y las bacterias convierten el nitrógeno disuelto en gases que se regresan a la atmósfera (Ceccon, 2003).



Figura 3. Ejemplo de zonas de ribera de izquierda a derecha, Nealtican, El Rinconcito y Río Ahuehuevo (Ilustración propia)

RESERVA DE LA BIOSFERA LOS VOLCANES

La Reserva de la Biosfera Los Volcanes se encuentra en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transmexicano. Cuenta con una superficie total de 171, 774.409 ha, de las cuales 40,008 ha se encuentran protegidas por decreto oficial. Comprende 22 municipios de cuatro estados. Estado de México: 77,005 ha en ocho municipios; Puebla 53,662.28 ha en diez municipios; Tlaxcala con 8,488 ha en dos municipios; y Morelos 3,657 ha dos municipios (CONANP, 2010).

La zona núcleo abarca 28,771.182 ha, lo que corresponde a casi todo el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepétl (UNESCO, 2004). Presenta terrenos nacionales, y el uso del suelo está destinado para la conservación y preservación de los procesos naturales (CONANP, 2010).

La zona de amortiguamiento abarca 57,767.741 ha, es zona primordial de bosques que pertenecen a ejidos y comunidades, se presenta la mayor biodiversidad. El uso de suelo es destinado a actividades compatibles con la conservación y la silvicultura sostenible (CONANP, 2010). Las actividades que se realizan en esta zona están reguladas por los planes de desarrollo de cada uno de los municipios y las actividades por el Ordenamiento Ecológico del Volcán Popocatepétl de los estados de México, Puebla y Morelos (CONANP, 2004).

Finalmente, la zona de influencia presenta 85,2350486 ha, el régimen de propiedad es variado, presenta ejidos, comunidades agrarias y pequeñas propiedades. En esta zona se presenta la mayor parte de las comunidades y por consecuencia es amenazada por la expansión de la marcha urbana (CONANP, 2010).

En la porción centro oriental del Eje Neovolcánico se ubica la Sierra Nevada, donde destacan los volcanes Iztaccíhuatl el cual se calcula que surgió hace uno 30 millones de años; y el Popocatepétl que surgió hace unos 30 mil años.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Dado el Ordenamiento Ecológico del Volcán Popocatepetl y la Sierra Nevada se divide en cuatro subcuencas: en el flanco occidental la subcuenca denominada Chalco-Texcoco, del lado oeste y suroeste, la del río Cuautla y la del Yautepec, en la parte oriental la del río Atoyac y al sur de este flanco oriental, la subcuenca del río Nexapa.

Debido a su topografía y ubicación, la reserva presenta una variedad de climas que van desde templado húmedo a los climas frío y muy frío. La temperatura va disminuyendo con la altura a razón de 0.68° C por cada 100 metros (Becerra, 2018).

El Popocatepetl y el Iztaccíhuatl presentan un material parental compuesto por rocas ígneas extrusivas de pómez consecuencia de la acumulación de cenizas volcánicas de diferentes etapas de actividad volcánica y por sedimentos de origen volcánico.

Los escurrimientos superficiales de la región conforman las trayectorias fluviales, subcuencas y cuencas hidrológicas que permiten la vida y la actividad económica en un gran número de asentamientos.

Los ecosistemas de esta reserva ejecutan los procesos que permiten la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen una parte de la zona metropolitana de la ciudad de México, del valle de Puebla y Tlaxcala (Soledad, 2013).

De acuerdo con la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), las unidades de suelo presentes en el área del parque son: Litosoles, Regosoles, Andosoles, Cambisoles, Fluvisoles (SEMARNAT, 2013).

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBERENOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

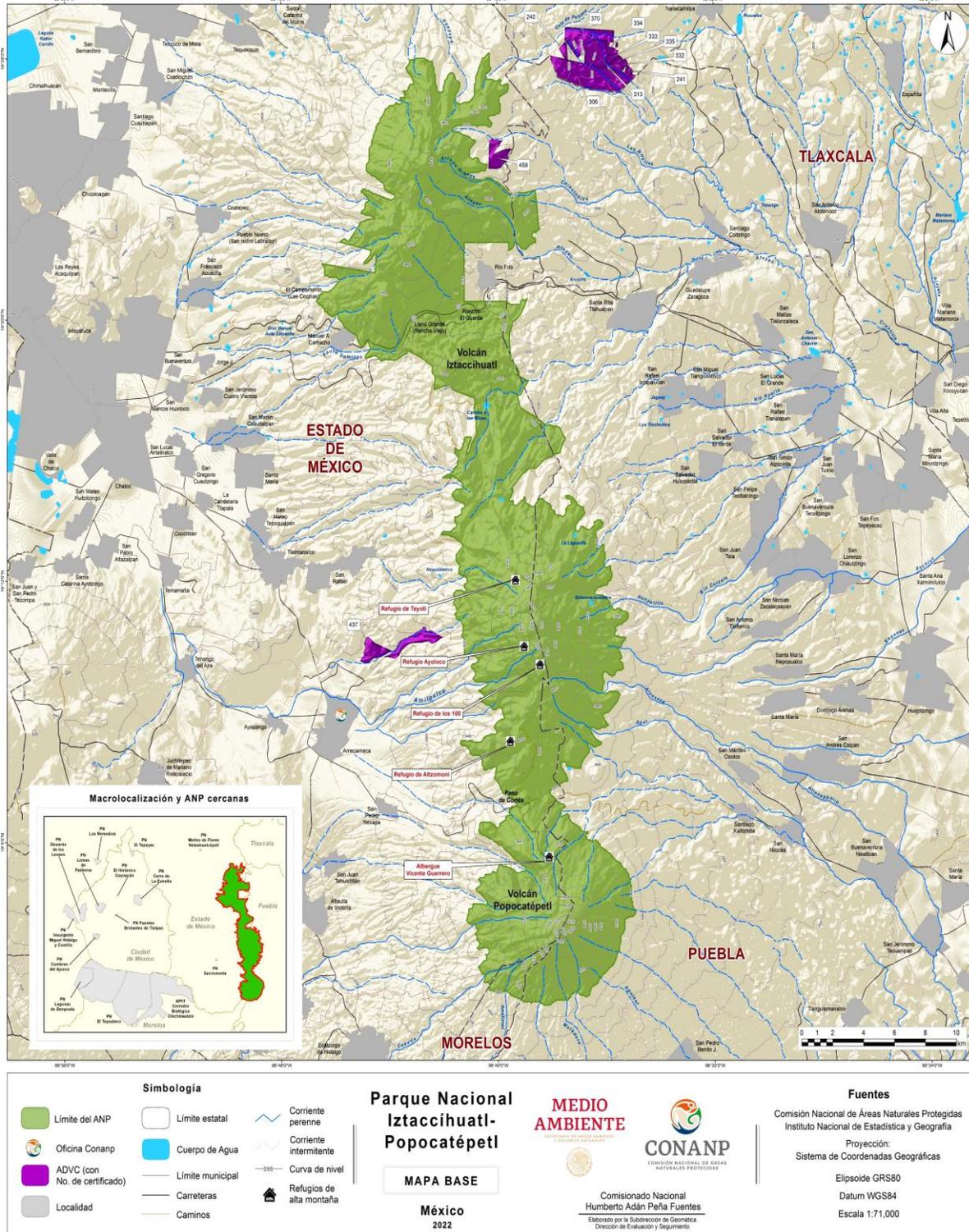


Figura 4. Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (Tomado de CONANP, 2022)

AGUA

El agua es uno de los recursos más importantes que existe en la naturaleza, se presenta en los tres estados de la materia y se mantiene durante un largo tiempo conservado su calidad, si no es afectada por la contaminación.

Los seres humanos dependemos de su disponibilidad no sólo para su consumo, sino para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales (SEMARNAT, 2013).

Denzin y colaboradores (2017) sugieren que el 98% del total del agua presente del planeta es salada y se encuentra en océanos y mares; el restante 2% del agua es dulce, sin embargo, de esta agua potencialmente aprovechable, el 68.9% está congelada en los polos, el 30.8% es agua subterránea y solamente el 0.3% es superficial, localizada en ríos, lagos, lagunas, humedad del suelo y depósitos subterráneos poco profundos.

Los recursos hídricos son obtenidos de aguas superficiales o aguas subterráneas. El uso de unas u otras depende de la disponibilidad de cada recurso. Las aguas superficiales ofrecen cantidades mayores de agua a corto plazo, mientras que las aguas subterráneas son más constantes a mediano plazo (Fernández, 2012).

La disponibilidad de este recurso es de suma importancia para la vida y el desenvolvimiento económico de cualquier región. Las dos terceras partes de este recurso se destina para el sector agrícola, con una demanda creciente para el turismo, usos urbanos e industriales, compitiendo por el acceso del recurso cada vez menos disponible (Cirelli, 2012).

Se estima que el 69% de las extracciones es considerada hacia la agricultura, un 19% para la industria y finalmente el 12% corresponde al uso doméstico (UNESCO, 2017).

Las aguas de los cuerpos superficiales y subterráneos son contaminadas por las descargas continuas de aguas residuales domesticas e industriales sin un tratamiento que elimine los contaminantes que contienen, como lo son escurrimientos con fertilizantes y plaguicidas provenientes de actividades agrícolas y pecuarias asentadas en las cuencas (SEMARNAT, 2013). Los compuestos o contaminantes se pueden incorporar a los cuerpos de agua en forma puntual, es decir en un solo lugar, o de manera difusa, abarcando toda una región.

CALIDAD DEL AGUA

El agua es utilizada con muchas finalidades y en cada actividad requiere una calidad particular. La calidad de esta se define en función del uso que se destina y de un conjunto de características físicas, químicas y biológicas. Se basa en la determinación de sustancias químicas específicas que pueden afectar a la salud (Calvo, 2003).

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Para determinar la calidad de las aguas superficiales se utilizan distintos indicadores físicos, químicos, microbiológicos, biológicos e índices de calidad (Calvo, 2003).

Los índices de calidad del agua surgen como una herramienta simple para la evaluación del recurso hídrico fundamental en procesos decisorios de políticas públicas y en el seguimiento de sus impactos. Estos índices pueden ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo e incluso un color (Torres *et al.*, 2009).



Figura 5. Interacción agua-suelo en una zona ribereña (Ilustración propia)

La CONAGUA considera entre sus principales indicadores de calidad del agua, la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y la concentración de sólidos suspendidos totales (SST). Algunos parámetros que se registran en la Red Nacional de Monitoreo en la calidad de agua son las concentraciones de nitratos, fosfatos, dureza, oxígeno disuelto y pH (SEMARNAT, 2013).

El índice ICA consideraba 18 parámetros los cuales eran: demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, coliformes fecales, coliformes fecales, conductividad eléctrica, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno (detergentes), fosfatos totales, nitrógeno amoniacal, nitratos, alcalinidad, color, dureza total, pH, solidos suspiros, cloruros, solidos disueltos y turbiedad (SEMARNAT 2022).

La NOM-001-SEMARNAT-2021 (2022) establece los límites permisibles de contaminantes en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas y la y NOM-127-SSA1-2021 establece los límites de agua para uso y consumo humano. En el cuadro 1, se presentan los indicadores que son utilizados para determinar la calidad del agua.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Cuadro #1. Indicadores de la calidad del agua (Chacón, 2016; Quintero et al., 2010)

FÍSICAS Y QUÍMICAS	BIOLÓGICOS/ MICROBIOLÓGICOS	NUTRIENTES METALES
Color	Clorofila	Nitrógeno total
Turbiedad	DBO5	Nitratos
Conductividad	DQO	Nitritos
Salinidad	Bacterioplanton	Amonio
Temperatura	Fitoplancton	Fosforo total
Solidos disueltos totales	Coliformes fecales y totales	Ortofosfatos
Solidos sedimentables		METALES
Solidos suspendidos totales		Hierro
Solidos totales		Mercurio
PH		Cadmio
Acidez		Cobre
Alcalinidad		Arsénico
Dureza		Cromo
Cloruros		
Oxígeno disuelto		

SUELO

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO, 2023) define al suelo como un cuerpo natural que se conforma por capas, las cuales son nombradas horizontes del suelo y se encuentran en una profundidad específica las cuales están compuestas de materiales meteorizados, materia orgánica, aire y agua.

De igual forma el suelo es definido por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA) a partir de su origen y los factores ambientales, como la capa superficial de material mineral y orgánico, no consolidado, que funciona como medio natural para el desarrollo de las plantas y presenta factores como lo son el clima, topografía, biota, material parental y tiempo, los cuales le dieron origen (Summer, 2000).

El proceso de formación del suelo es constante pero lento. Se calcula que para tener un centímetro del suelo en la capa superficial es necesario que trascurren entre 100 y 400 años, por lo que este se considera un recurso natural no renovable en la escala de tiempo humana (Doran y Parkin, 1994).

El suelo se compone de cuatro fracciones: 1) las partículas minerales 2) la materia orgánica no viviente 3) la disolución del suelo y 4) el aire que ocupan los espacios porosos dentro del suelo.

En las partículas minerales Según Chavarría (2005) se encuentran diversas cantidades de elementos que han sido clasificados dependiendo la función que desempeñan.

En un primer grupo se encuentran los nutrimentos minerales (C, N, H, O, P y S) elementos químicos formadores de casi toda la materia viva. En un segundo grupo se encuentran los cationes (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y en ocasiones Na^+), estos se denomina Macroelementos o Polielementos minerales nutritivos. El tercer grupo de elementos es denominado como Microelementos u oligonutrientes, los cuales son requeridos en pequeñas cantidades como lo son: B, Zn Cu, Co, Mo, V y el anión Cl. Y por último el cuarto grupo denominados Mesoelementos, Fe y Mn, los cuales ocupan una posición intermedia.

El suelo tiene diferentes servicios ecosistémicos, como lo son la participación con los ciclos biogeoquímicos de elementos claves para la vida, regulación del clima, hábitat de organismos, suministro de combustibles, reducción de contaminantes, infiltración, retención de carbono, fuente de productos farmacéuticos y recursos genéticos, regulación de inundaciones, producción de alimentos y materias primas de los cuales depende la sociedad humana (Burbano-Orjuela, 2016).

Debido a las diferentes funciones que el suelo desempeña, las actividades humanas ocasionan una degradación paulatina de este recurso ya que provocan la disminución en su productividad biológica o de su biodiversidad y la capacidad para sostener la vida humana (Oldeman, 1998; SEMARNAT, 2013).

CALIDAD DEL SUELO

La calidad del suelo se traduce como la utilidad del suelo con un propósito en específico en una escala implícita de tiempo. El cual está relacionado con la funcionalidad del suelo e incluye atributos como lo es la fertilidad, la productividad potencial, utilidad y salud del recurso (Bautista *et al.*, 2004).

El Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of América sintetizó a la calidad del suelo como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, así como sostener la salud humana y el hábitat (SQI, 1996).

El término de la calidad del recurso se definió al conocer las funciones del suelo, que son: 1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; 2) atenuar contaminantes ambientales y patógenos y 3) favorecer la salud de plantas, animales y humanos (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997; Bautista *et al.*, 2004).

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

La buena calidad del suelo determina un ambiente adecuado para el desarrollo de las raíces vegetales, proporciona el anclaje lo que permite a las raíces sostener a las plantas en posición directa, y actúa como depósito para el agua (Rojas, 2012).

Las causas principales de la degradación del suelo se atribuyen ante todo al cambio de vocación del suelo, que se representa en actividades antropogénicas como lo son agropecuarias, deforestación y urbanización. A la velocidad actual, su degradación constituye un riesgo para las generaciones futuras, por lo que es de suma importancia luchar por su sostenibilidad.

Para evaluar la calidad del suelo y determinar si el uso que se le está dando es sostenible ecológicamente, se ha recurrido al uso de indicadores e índices. Los indicadores son propiedades del suelo medibles que afectan la capacidad para realizar funciones de producción agrícola o medioambientales (Arshad y Martín, 2002; Sarmiento *et al.*, 2018). En el cuadro 2 se presentan los indicadores físicos, químicos y biológicos utilizados para en la calidad del suelo.

Cuadro #1. Indicadores de la calidad del suelo (Bautista et al., 2014)

FÍSICAS	QUÍMICOS	BIOLÓGICOS
Reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y trasmite agua a las plantas, la infiltración, y que estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros.	Condiciones que alteran las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de agua y nutrientes.	Incluyen funciones como la tasa de respiración, ergosterol e integran gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo, como la abundancia y subproducto de micro y macroorganismos.
Textura Profundidad del suelo Infiltración y densidad aparente Capacidad de retención de agua	Materia orgánica (N Y C total) PH Conductividad eléctrica P, N y K extractables	C y N de la biomasa microbiana Respiración, contenido de humedad y temperatura N potencialmente mineralizable

NITRÓGENO

El nitrógeno es un elemento biogénico constituyente de moléculas orgánicas que desempeñan funciones vitales en la célula. Principalmente, proviene de la mineralización de materia orgánica, de la disolución de rocas sedimentarias y del intercambio gaseoso (Hernández, 2021). Constituye un elemento de suma importancia para el desarrollo de organismos, es regulador del estado trófico de los cuerpos acuáticos y constituye las bases de la producción agrícola (Lestayo, 2021)

Sus moléculas se encuentran unidas por un triple enlace muy fuerte que lo hace muy estable y no reactivo (Poffenbarger *et al.*, 2018).

La atmosfera terrestre posee un 78% de nitrógeno en forma de gas, pero las plantas y animales no pueden utilizarlo directamente. Por lo que las plantas deben esperar a que el nitrógeno sea transformado a formas de compuestos inorgánicos para que lo puedan usar (Vitousek y Denslow, 1986).

El nitrógeno incluye formas oxidadas, que son representadas por monóxido de nitrógeno (NO), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) y formas reducidas, representadas como amonio (NH_4^+) y amoniaco (NH_3^+) (Sutton, 2011).

Se encuentra principalmente en proteínas y ácidos nucleicos y en otras moléculas orgánicas, incluidas las vitaminas, enzimas, clorofilas y algunos polisacáridos, que se encuentran dentro de los recursos renovables más abundantes en la Tierra. Es esencial en los procesos de síntesis de proteínas y en la fotosíntesis, participan en el aceleramiento de la división celular, y en la elongación de las raíces (González y González, 2021).

DINÁMICA DEL NITRÓGENO

La dinámica del nitrógeno se encuentra entre los principales ciclos biogeoquímicos, debido a que es muy complejo por las diversas formas químicas con las que se presenta y utiliza gran cantidad de energía para poder presentarse (Páez *et al.*, 2007). La mayoría de las reacciones dentro del ciclo dependen en gran medida del metabolismo microbiano muy diversificado.

El ciclo biogeoquímico del nitrógeno comprende en su totalidad la circulación de este elemento en todas sus formas entre la biomasa, el mantillo, el suelo y las fuentes externas del ecosistema, de tal manera que comprende los procesos de absorción, acumulación, translocación y redistribución interna del elemento en las plantas, del mismo modo comprende los procesos de intercambio en la atmosfera y el suelo (Fuentes y González, 2007).

De acuerdo con González y González (2021) el ciclo del nitrógeno presenta cuatro fases:

- 1. Fijación:** consiste en la incorporación del nitrógeno atmosférico molecular en la materia orgánica, principalmente por bacterias endosimbiontes, bacterias libres, arqueas y cianobacterias que se encuentran presentes en el suelo y en los ambientes acuáticos.

Se realiza por un medio de la conversión de nitrógeno gaseoso (N_2) en amoniaco (NH_3^+) o nitratos (NO_3^-).

- 2. Nitrificación o mineralización:** las plantas solo pueden asimilar al nitrógeno por dos formas nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+). Por lo que es necesario convertir el amonio en nitrato que consiste en su oxidación secuencial Este proceso ocurre a pH neutro o ligeramente alcalino y ocurre en dos pasos por diferentes bacterias: 1) las bacterias *Nitrosomonas* y *Nitrococcus* convierten el amonio en nitrito y 2) *Nitrobacter* oxida el nitrito en nitrato.
- 3. Amonificación:** es la transformación de los compuestos nitrogenados, presentes en los restos y desechos como lo son las proteínas y urea, en amoniaco (NH_3) y amonio (NH_4^+), lo cual es realizada por las bacterias y hongos amonificadores.
- 4. Desnitrificación:** es el proceso opuesto a la nitrificación ya que es la reducción de los nitratos (NO_3^-) a nitrógeno gaseoso (N_2) y amonio (NH_4^+) a amoniaco (NH_3), es realizado por las bacterias desnitrificadoras, que transfieren el nitrógeno a la atmósfera de forma gaseosa.

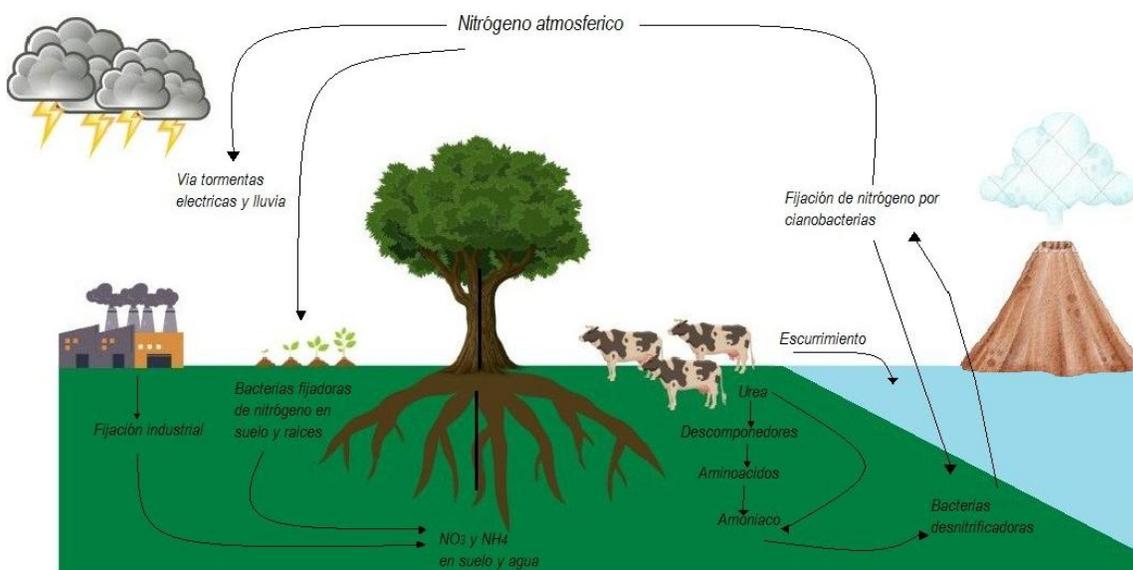


Figura 6. Dinámica del nitrógeno (Ilustración propia)

NITRÓGENO EN AGUA

En el agua los compuestos nitrogenados se deben a causas naturales como la disolución atmosférica o de depósitos geológicos ricos en estos materiales, escurrimientos superficiales y subterráneos, fijación de organismos procariontes y descomposición de materia orgánica, así mismo por causas antropogénicas que son provenientes de usos domésticos e industriales y la deposición atmosférica (Cárdenas y Sánchez, 2013).

El nitrógeno puede encontrarse en el agua: como gas disuelto, en combinaciones inorgánicas y combinaciones orgánicas. Las formas inorgánicas se presentan en

nitratos, nitritos y el ion amonio que se encuentran en combinación con iones bivalentes y monovalentes. Por otro lado, el nitrógeno orgánico se presenta a través de los aminoácidos, polipéptidos y proteínas (Pacheco *et al.*, 2002).

El nitrógeno es uno de los contaminantes más relevantes en el agua, debido a que las actividades agrícolas e industriales han aumentado el doble de la concentración fijada anualmente en la biósfera. Lo que provoca problemas de toxicidad para organismo acuáticos y la eutrofización de cuerpos acuáticos (Cervantes-Carrillo *et al.*, 2000).

De acuerdo con la NOM-127-SSA1.2021, la concentración máxima permisible de nitrógeno amoniacal es de 0.50 mg/L, nitratos 11.0 mg/L y para nitritos 0.90 mg/L.

NITRÓGENO EN SUELO

Este elemento es el más limitante en los ecosistemas terrestres, de todos los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas (Vitousek *et al.*, 1997).

Los primeros 20 cm de profundidad de un suelo pueden contener entre 1000 y 10000 kg de N por hectárea. Las formas orgánicas incluyen proteínas, aminoácidos y azúcares aaminados (Plaster, 2000).

La disponibilidad del nitrógeno en el suelo está determinada por la actividad del microorganismo, debido a que depende tanto de la disponibilidad de agua como de energía (Atlas y Bartha, 2022).

En el suelo la dinámica del nitrógeno no está regulada por un equilibrio químico, sino por diferentes procesos biológicos, derivados de la actividad microbiana del suelo que afectan sobre todo a las formas minerales y a las formas orgánicas de reserva (Otegui *et al.*, 2002).

El contenido del nitrógeno orgánico en el suelo incluye una variedad de formas, puede no estar disponible para las plantas en moléculas complejas o perderse por desnitrificación, erosión del suelo lixiviado, volatilización. Desempeña un papel importante en la composición y diversidad de las especies, en la dinámica y funcionamiento de la mayoría de los ecosistemas (Celaya-Michel y Castellanos-Villegas, 2011).

El nitrógeno orgánico representa entre el 85 y el 95% del N total del suelo. Esta fracción está compuesta por 20-40% de aminoácidos, 5-10% de aminoazúcares y 1-2% de bases púricas y pirimídicas. Por otra parte, el nitrógeno inorgánico es la fracción realmente disponible para las plantas y su contenido es generalmente menor al 10% del total. Las raíces de las plantas toman el nitrógeno del suelo principalmente por las formas químicas de nitrógeno como lo son iones disueltos de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) (Florencia *et al.*, 2019).

EFFECTOS DEL EXCESO DE NITRATOS, NITRITOS Y AMONIO EN LA SALUD HUMANA

Aproximadamente el 5% de los nitratos al ser ingeridos, son transformados por bacterias en la boca, lo que forma varios efectos diferentes en el cuerpo (Davidson *et al.*, 2012). Se ha comprobado que bebés menores de cuatro meses al consumir agua rica en nitratos pueden llegar a contraer metahemoglobina.

En las condiciones ácidas del estómago, el nitrito forma óxido nítrico, que tiene como consecuencia la disminución de la presión sanguínea. Asimismo, el nitrito reacciona con las aminos y amidas presentes en las proteínas de la dieta o los medicamentos, y se forma N-nitrosaminas y N-nitrosamidas. Estos compuestos dañan el ADN y causan defectos de nacimiento y cáncer en los animales (Davidson *et al.*, 2012).

Del mismo modo los nitratos y nitritos pueden contribuir al desarrollo de linfomas y cánceres, enfermedades coronarias, infecciones en el tracto respiratorio y malformaciones en recién nacidos.

Se pueden presentar efectos de manera indirecta, es decir la proliferación de algas tóxicas que ocasionan intoxicación cuando son ingeridas por contacto de tipo recreacional, así como el desarrollo de los mosquitos que transmiten la malaria (Cárdenas y Sánchez, 2013).

FÓSFORO

El fósforo es considerado el nutriente principal que limita la producción de los ecosistemas de agua dulce, debido a su escasez en la naturaleza (Steinman y Spears, 2020). Algunas de las funciones del fósforo en animales y plantas, incluye ser un componente estructural de ácidos nucleicos, coenzimas esenciales y constituyentes de la membrana celular (Steinman y Spears, 2020).

El fósforo se encuentra en compuestos inorgánicos y orgánicos tanto en formas de partículas y disueltos. La diferenciación de sus formas se debe a su reactividad con molibdato, su facilidad de hidrólisis y el tamaño de partícula (Wetzel y Likens, 2000).

El fósforo constituye un elemento básico de calcio que se encuentra en los huesos y dientes. El 90% el fósforo que se encuentra es en forma de ion negativo ortofosfato (PO_3^{-4}) (Wetzel, 1975).

También se encuentra en los fosfolípidos, el ácido desoxirribonucleico y ácido ribonucleico que controlan la herencia, síntesis de proteínas y las coenzimas. Asimismo, se encuentra en los fosfolípidos formando parte de los componentes principales de las membranas celulares presentes en los organismos, del mismo modo forman parte de las moléculas que utilizan los seres vivos para la formación de energía que se utiliza en todas las funciones metabólicas (ADP Y ATP) (Salazar, 2022).

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Este compuesto se emplea para la elaboración de aleaciones especiales como el bronce fosforoso, raticidas, venenos, fuegos artificiales, fertilizantes. Se presenta como aditivo para alimentos y fármacos, es acidulante en bebidas gaseoso, es un suplemento alimenticio para animales, entre otras aplicaciones (López, 2019).

DINÁMICA DEL FÓSFORO

De acuerdo con Odum (1987) la dinámica del fósforo se considera de tipo sedimentario, debido a que la principal reserva se encuentra depósitos naturales de fosfato.

- 1. Erosión y meteorización:** La provisión del fósforo se localiza en las rocas y otros depósitos. Es liberado a los ecosistemas a través de procesos de meteorización, lixiviación, erosión y extracción industrial como fertilizante. Algunas concentraciones son depositadas en el mar, lo que se reconoce como una pérdida (Fernández, 2012; Odum, 1987).
- 2. Fijación en las plantas y transmisión a los animales:** El fosfato liberado es absorbido por las plantas, la biomasa microbiana, las algas y el fitoplancton, se incorporan en la materia inorgánica del suelo y sedimentos. Principalmente como ion primario $H_2PO_4^-$ y pequeñas cantidades del ion secundario HPO_4^{2-} . Posteriormente son utilizados por autótrofos y heterótrofos (Fernández, 2012; Martínez, 2009)
- 3. Retorno al suelo por descomposición:** El fósforo es utilizado por los descomponedores para ser devueltos al suelo en forma de residuos de cosechas y por desechos de animales. Retornan al suelo para ser aprovechados por las plantas o llegan a los ríos y arroyos por escorrentía

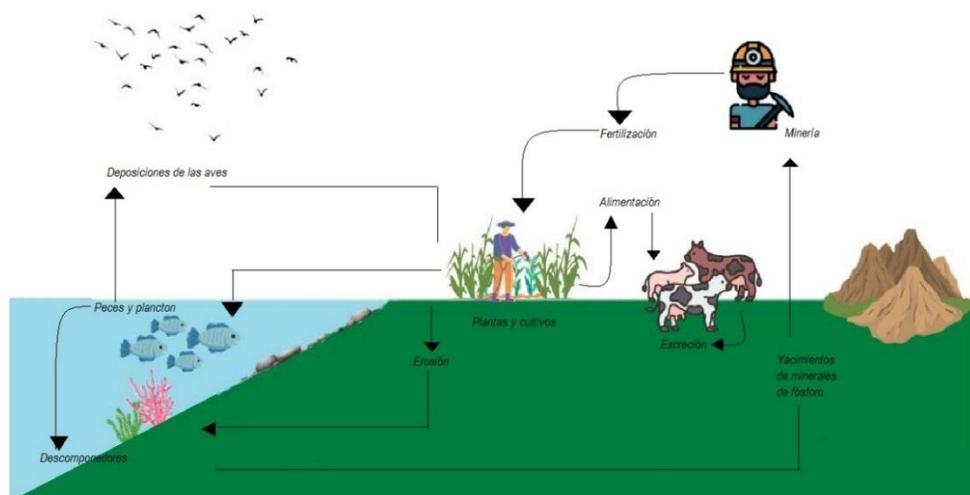


Figura 7. Dinámica del fósforo (Ilustración propia)

FÓSFORO EN AGUA

El fósforo se considera un elemento esencial en los sistemas acuáticos, es el nutriente que contribuye al crecimiento de las algas y en ciertas condiciones causa la eutrofización de lagos (Teixeira *et al.*, 2013). Controla la producción primaria (Baldwin, 2013).

Las altas concentraciones de fósforo pueden implicar mayores flujos hacia los sistemas acuáticos, contribuyendo, al crecimiento de algas y macrofitas, lo cual genera problemas en la calidad del agua (Sacristán, 2020).

Los sistemas acuáticos que presentan bajos niveles de fósforo tienden a tener una baja producción primaria, por lo tanto, los sistemas que contienen fósforo en exceso presentan agua con poca transparencia, fondos anóxicos y florecimientos algales con predominancia de cianobacterias (Likens, 2010).

En las aguas naturales y residuales, el fósforo se presenta principalmente en forma de fosfatos. Los cuales son clasificados en ortofosfatos, fosfatos condensados y fosfatos enlazados orgánicamente, se encuentran en solución, en partículas o detritus (Severiche-Sierra y Gonzales-García, 2012).

El fósforo llega a los cuerpos de agua a partir de fuentes puntuales y difusas, como lo son las descargas domésticas (excreciones humanas y uso de detergentes), agropecuarias (fertilizantes y desechos de ganadería) e industriales (químicos) (Teixeira *et al.*, 2013; Cordell *et al.*, 2011).

Aproximadamente el 90% del fósforo presente en los ecosistemas acuáticos se encuentra como fosfato orgánico, constituyente celular de la materia viva particulada o asociado a diversas formas con partículas orgánicas muertas y materiales inorgánicos (De La Lanza, 1994).

De acuerdo con la NOM-072-ECOL-1994, la concentración máxima permisible en las descargas de aguas residuales debe ser menor a 18 mg/L.

FÓSFORO EN SUELO

El fósforo en el suelo se puede encontrar como fósforo inorgánico y como fósforo orgánico. El fósforo inorgánico se clasifica de acuerdo con su disponibilidad para las plantas en: a) fósforo disponible, que es aprovechable de forma inmediata; b) fósforo intercambiable, su disponibilidad es más lenta; y c) fósforo insoluble, el cual está formado por partes de los minerales primarios y secundarios, constituye la reserva de fósforo inorgánico en el suelo (Johston y Syers, 2009). Es considerado como un nutriente primario, debido a que las funciones que realiza no se pueden efectuar por ningún otro nutriente.

El contenido de fósforo en el suelo varía entre 100 a 3000 mg de P/kg (Cerón y Ancízar, 2012).

En el sistema suelo-planta, el 90% del fósforo está en el suelo y menos del 10% se encuentra repartido fuera del suelo (Fernández, 2007). Se requiere para favorecer la formación de semillas, el desarrollo radicular, la fuerza de las pajas en los cereales y la maduración de los cultivos (Cerón y Aristizábal, 2012).

Sin embargo, el fósforo disponible en el suelo es deficiente para los vegetales, por lo que es necesario aplicar fertilizantes fosforados, ya que fósforo no es reciclado por las lluvias, ni es liberado por residuos orgánicos (Fernández, 2007).

El fósforo es retenido por la fase sólida y transportado junto con las partículas erosionadas, a través del transporte de estiércol y desechos humanos (Yuan *et al.*, 2018).

EFFECTOS DEL EXCESO DE FÓSFORO Y ORTOFOSFATOS EN LA SALUD HUMANA

El fósforo forma parte de los nutrientes que proporcionan energía al cuerpo, participa en la formación y estructura de los huesos, e interviene en funciones fisiológicas (López, 2019). Debido a que el fósforo participa en muchos procesos biológicos, los niveles bajos en la sangre o las pérdidas del mineral pueden causar enfermedades serias.

Este elemento forma parte de los compuestos organofosforados, que son tóxicos y provocan una sobreestimulación de los músculos, glándulas y órganos (Martínez y Saracho, 2009).

El fósforo está presente en la mayoría de los alimentos, principalmente en aquellos que son ricos en proteínas, como los lácteos, carnes y pescados. Se presentan de forma abundante en algunas semillas, como nueces, legumbres y cereales. También es componente de muchos aditivos y preservantes en alimentos procesados (Kalantar-Zadeh *et al.*, 2010).

La ingesta diaria de fósforo recomendada en adultos se sitúa en 700 mg/día, y si este se supera puede afectar a la salud humana. Los elevados niveles de fosfatos en sangre ocasionan una hiperfosfatemia, que produce una disminución del calcio iónico, que da lugar a una hipocalcemia, con lo que se derivan enfermedades como la osteoporosis y arterioesclerosis (López, 2019).

En las aguas superficiales, el exceso de fósforo, en combinación con temperaturas altas y luz solar, estimula el crecimiento desmedido de algas, las cuales consumen grandes cantidades de oxígeno dejando muy poco para los peces, denominado un proceso llamado eutrofización (Cordell *et al.*, 2011).

RELACIÓN N:P

En los ríos, lagos o embalses el enriquecimiento de nutrientes, provocan eutrofización, siendo los fosfatos y nitratos los que influyen en este proceso.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Principalmente el factor limitante en algunos ecosistemas de agua dulce es el fosfato (Wetzel, 1981).

El concepto de nutriente limitante se basa en el crecimiento de plantas acuáticas y la relación molar N/P. El valor de esta relación la determina el nutriente limitante en el cuerpo de agua. Dicho lo anterior el nutriente que controla la máxima cantidad de biomasa es aquel que se consume primero o que alcanza un mínimo antes de que los demás nutrientes en la estequiometría de la reacción (Redfield, 1958).

Se considera una regla general que cuando la relación molar N/P es >16 , es de esperarse que el fósforo sea el factor limitante. Cuando $N/P = 16$ ninguno de los nutrientes es limitante. Y por último cuando el $N/P < 16$ el nutriente limitante es el nitrógeno (Redfield, 1958).

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad las cuencas hidrográficas y en consecuencia los ecosistemas ribereños son sometidos a una fuerte presión antrópica que se visualiza en su degradación, contaminación de los cuerpos de agua, pérdida de biodiversidad, disminución de la productividad del suelo, incremento en las concentraciones de nutrimentos, vulnerabilidad ante sequías e inundaciones, incremento de riesgo ante desastres naturales y la disminución en la calidad de vida de las poblaciones.

Dicho lo anterior los servicios ambientales que nos proporcionan y que son la base del desarrollo económico de las poblaciones aledañas se ven afectados de manera negativa, por el exceso de nutrimentos, principalmente el nitrógeno y fósforo. El primero es el nutriente que en general influye en el rendimiento y la calidad del producto a obtener en la actividad agropecuaria y el segundo es considerado nutriente principal debido a que ningún otro elemento puede efectuar las funciones que este realiza.

Dicho lo anterior es de vital importancia realizar una investigación como la presente, donde se destaque el comportamiento del nitrógeno y fósforo en el sistema agua-suelo de los ambientes ribereños de las subcuencas Nexapa y Atoyac.

Y por consiguiente evitar que las zonas ribereñas de las subcuencas Nexapa y Atoyac se conduzcan a un proceso de eutrofización y así mismo la pérdida total del sistema agua-suelo.

HIPÓTESIS

Las características del agua y el suelo en los ambientes ribereños se ven alteradas, de forma negativa a causa del exceso de nutrientes que ingresan al sistema, como consecuencia de las diferentes actividades que se realizan en las áreas aledañas conforme se desciende altitudinalmente (agricultura, ganadería, turismo, deforestación, entre otros). Con el paso del tiempo estas actividades se intensifican y las concentraciones de estos nutrimentos aumentan, lo que genera alteraciones en la calidad hídrica y edáfica.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar y analizar el comportamiento espacial y temporal que presentan las concentraciones de nitrógeno y fósforo en el sistema hídrico-edáfico

OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar las variaciones espaciales de nitrógeno y fósforo en el agua y suelo de los sitios elegidos
- Comparar la variación de nitrógeno y fósforo en el sistema hídrico entre los años 2005, 2007, 2013, 2014 y 2019.
- Comparar la variación de nitrógeno y fósforo en el sistema edáfico entre los años 2014, 2018 y 2019.
- Obtener la Relación N:P para agua y suelo en cada sitio de estudio.
- Identificar los sitios ribereños donde las concentraciones de nitrógeno y fósforo tienden a deteriorar la Calidad del sistema hídrico-edáfico.

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a las subcuencas Nexapa y Atoyac, que corresponden a la Región hidrología N° 18, río Balsas.

SUBCUENCA NEXAPA

La subcuenca Nexapa, se ubica en la Región Hidrológica N° 18, río Balsas. La corriente superficial más importante es el río Nexapa que comprende desde su nacimiento, y la red que conforma en la vertiente Oriental del Volcán Iztaccíhuatl y en las vertientes Oriental y Sur del Volcán Popocatepetl, hasta la estación hidrométrica Santa María Coetzala. Los arroyos confluyen cerca de Atlixco dirigiéndose hacia el sur rumbo a Izúcar de Matamoros en el estado de Puebla (Navarro *et al.*, 2013).

Es de régimen permanente y tiene como afluentes los ríos Atotonilco y Atila. Cuenta con una superficie hidrológica administrativa de 7, 216.3 km², es decir 3.6% del territorio de la cuenca del Balsas (Navarro *et al.*, 2013).

En la subcuenca Nexapa habitan alrededor de 102,877 personas. La mayor cantidad de la población se ubica en la región sur de la subcuenca, en los Municipios de Axochiapan y Tepalcingo, que concentran al 48% de los habitantes en una superficie que representa el 56% de su territorio. Sin embargo, los Municipios de Jantetelco, Jonacatepec, Temoac y Zacualpan de Amilpas (porción central de la cuenca) concentran al 46% de la población, en un territorio que representa el 34% del territorio de la cuenca (CONAGUA, 2010).

De acuerdo con la clasificación de Köppen, se describe un clima semicálido con régimen de lluvias en verano. La temperatura media anual va de 16.1 a 21.8° C, con la información obtenida en nueve estaciones meteorológicas indican que la precipitación media anual presenta un promedio arriba de los 600 mm. Los meses más lluviosos ocurren en junio, julio, agosto y septiembre con alturas de lluvia hasta los 1273.2 mm (CONAGUA, 2010).

La subcuenca Nexapa se presenta suelos de tipo andosols, cambisols, feozem, fluvisols, litosols, regosols y vertisols (Morales, 2018).

El volumen de extracción anual total en la cuenca asciende a 34 hm³, del cual el agrícola representa el principal usuario con el 87%, seguido del uso de servicios con el 13%. La descarga de agua residual anualmente es de 2.83 hm³ que van directamente a fosas sépticas, pozos de absorción, ríos, arroyos y barrancas, y el 63% son generadas por servicios (CONAGUA, 2010).

El volumen de agua que circula en el cauce es de 6,200 L/s y en temporada de estiaje de 5,700 L/s. Riega 8,100 ha a cultivos, 5,000 ha a productores ejidales, comunales y privados (Rodríguez y Palerm, 2003). Las fuentes de agua para los

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

cultivos se utilizan para el riego de hortalizas y flores en Nealtican, Atlixco, Coyula, Tochimilco, manantiales de Tlapanala y Tochimilzingo (Landa *et al.*, 2008).

El impacto antropogenico en los arroyos de la subcuenca del río Nexapa, proviene del vertimiento de aguas residuales en toda la subcuenca, pero principalmente en las ciudades de Atlixco e Izúcar de Matamoros, así como de las transferencias de aguas contaminadas del río Atoyac (Navarro *et al.*, 2006).

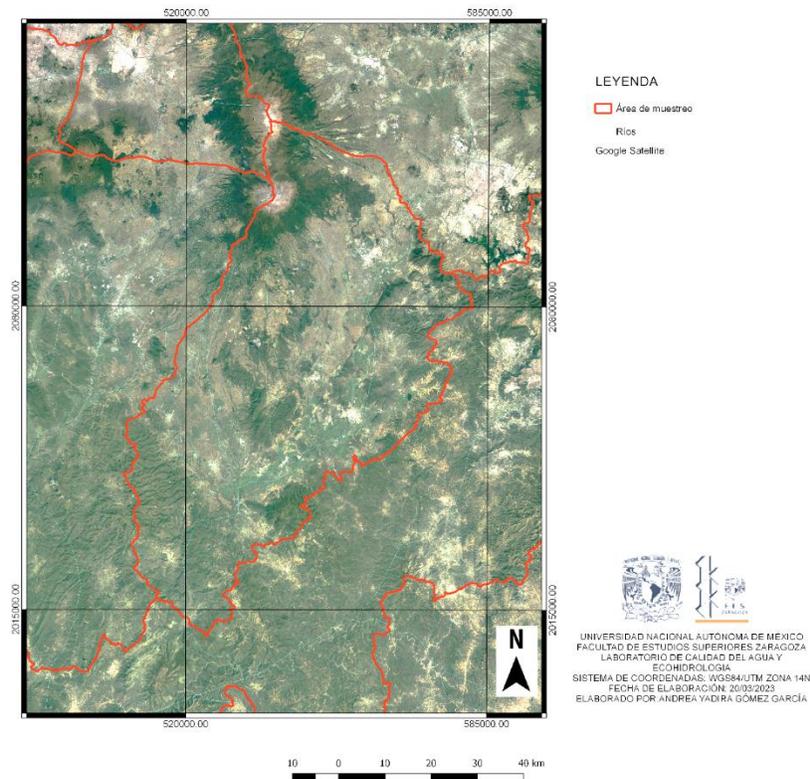


Figura 8. Sitio de estudio, subcuenca Nexapa (Ilustración propia)

SUBCUENCA ATOYAC

La subcuenca del Río Alto Atoyac abarca principalmente los estados de Tlaxcala, Puebla y México, constituida por 84 municipios. Comprende desde donde nacen los escurrimientos del Río Atoyac, hasta donde se localiza la presa Manuel Ávila Camacho (Morales *et al.*, 2015).

Tiene una superficie de 4,135.52 km², y se encuentra delimitada por: al Norte por las Regiones Hidrológicas Pánuco y Norte de Veracruz; al Sur por las cuencas hidrológicas Río Nexapa y Río Bajo Atoyac; al Oeste por la Región Hidrológica Pánuco (Morales *et al.*, 2015).

En la subcuenca del Río Alto Atoyac existen 49 estaciones climatológicas de las cuales 33 se encuentran en operación, administradas por la CONAGUA. La

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

subcuenca presenta de un clima templado subhúmedo. La precipitación total anual en el área de estudio oscila de 500 a 1,500 mm (INEGI, 2019).

Presenta una temperatura media entre 12°C y 18°C en el norte y centro de la cuenca, el área de las mesetas y llanuras presentan una temperatura media de 6 a 14°C y las zonas más altas presentan una temperatura anual que va de 2 a 4°C (INEGI, 2019).

En la subcuenca hidrológica Río Alto Atoyac existen 11 grupos de suelo, principalmente los phaeozem, cambisoles y luvisoles, que en conjunto abarcan 46.41% de la superficie. Los phaeozem se encuentran al noreste, centro y sur de la cuenca, en terrenos planos y montañosos y se utilizan para actividades agrícolas, con alto rendimiento de legumbres y hortalizas (INEGI, 2019).

El uso del suelo está destinado para los cultivos de maíz, frijol, cebada, trigo y papa (INEGI, 2019).

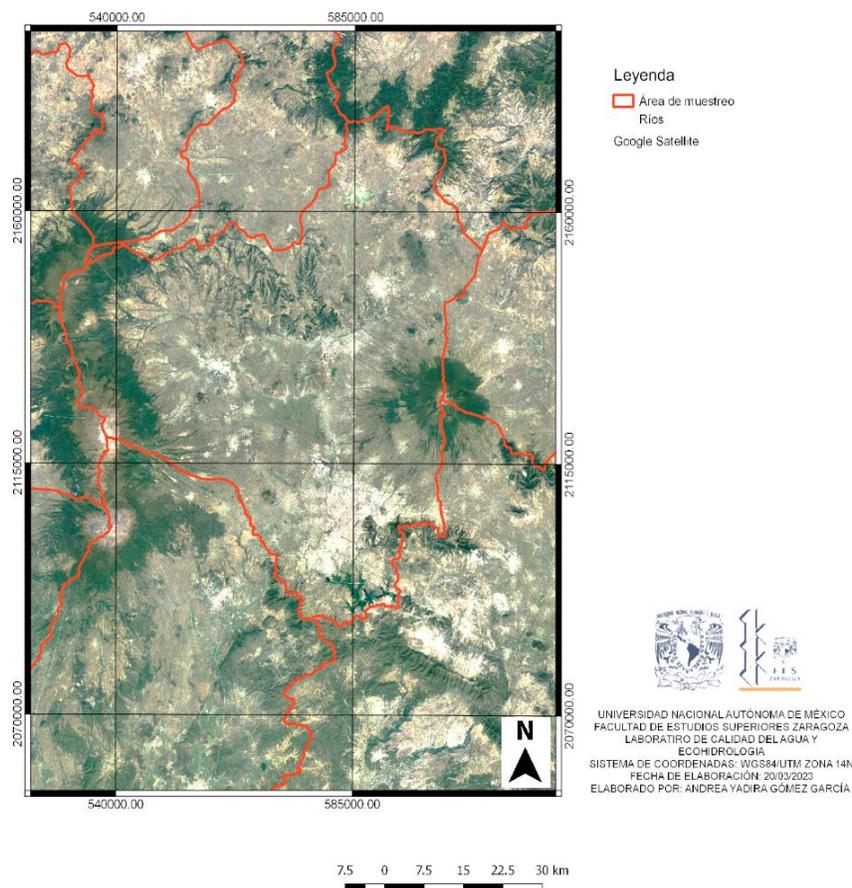


Figura 9. Sitio de estudio, subcuenca Atoyac (Ilustración propia)

MÉTODO

TRABAJO DE GABINETE

DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se seleccionaron afluentes con corrientes permanentes en zonas con diferentes usos de suelo a través del gradiente altitudinal de las subcuencas Nexapa y Atoyac.

Con la ayuda del Sistema de Información Geográfica QGis Versión 2.18.16 “Las palmas” se identificaron los 80 sitios de muestreo pertenecientes a las subcuencas Nexapa y Atoyac (Figura 10).

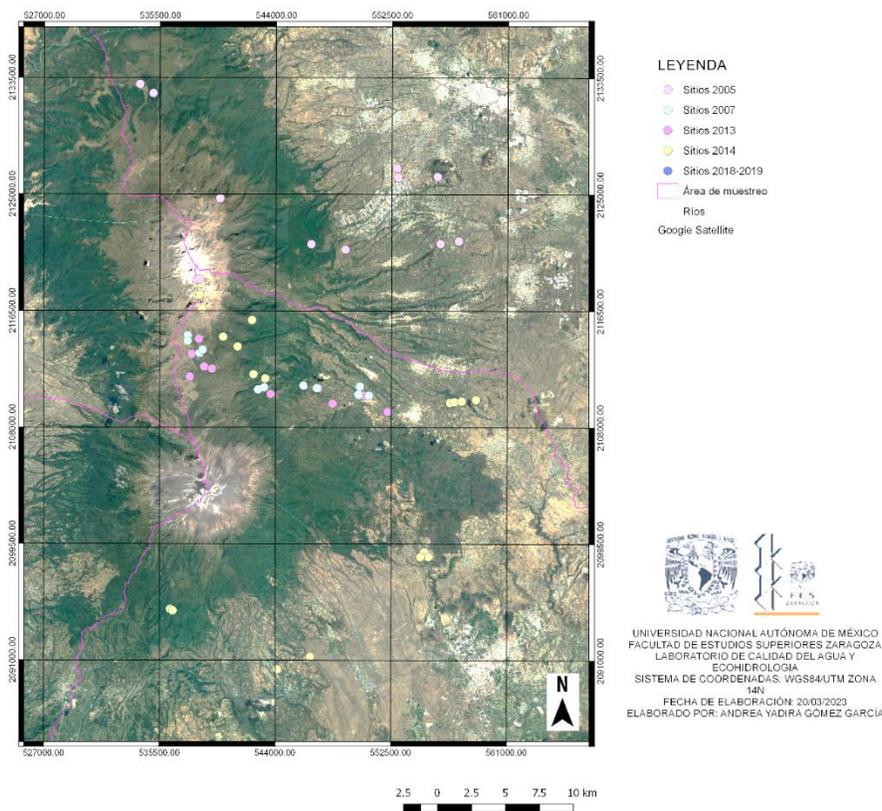


Figura 10. Ubicación de los sitios de estudio (Ilustración propia)

TRABAJO DE CAMPO

Los datos analizados son el resultado de salidas a campo que se realizaron, para agua en los años 2005, 2007, 2013, 2014 y 2013; para suelo 2014, 2018 y 2019. Se realizó la caracterización de cada sitio de estudio, lo cual consiste en tener datos sobre: fecha y hora, ubicación (coordenadas geográficas UTM), pendiente del terreno y del cauce, nubosidad, uso de suelo y tipo de vegetación.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Cuadro #2. Periodo de muestreo

AÑO	PERIODO DE MUESTREO
2005	Primavera
2007	Verano
2013	Primavera
2014	Verano e Invierno
2019	Otoño, invierno y Primavera

MUESTREO DE AGUA

Las muestras de agua se obtuvieron de forma manual utilizando recipientes de polietileno blancos de 1 L, 500 mL y 250 mL, y botellas ámbar de vidrio con capacidad de 500 mL. Las muestras se llenaron hasta la parte superior para reducir la interacción con la fase gaseosa y limitar su agitación durante el transporte. Posteriormente se le registro una clave que indica fecha, hora y número de muestra.

Se preservaron de acuerdo con lo mencionado en Guerra y Cruz, 2014 para nitratos, nitritos y ortofosfatos, para amonio y fosforo total lo citado en APHA, -AWWA, -WEF, 1992 y para oxígeno disuelto siguiendo el método de la NMX-AA-012-SCFL-2001, 2001.



Figura 11. Toma de muestra de agua (Ilustración propia)

MUESTREO DE SUELO

Para tomar las muestras de suelo previamente se limpió la superficie, eliminando la hojarasca, pedregosidad de la superficie y los restos de materia orgánica. Las muestras se obtuvieron de manera manual, posteriormente se almacenaron en bolsas herméticas de plástico.

De cada sitio se obtuvieron muestras compuestas, una por cada lado del cauce del río, las cuales fueron tomadas una distancia lateral de 1 m del cauce y conformadas

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

por tres muestras recolectadas a 0, 15 y 30 m a lo largo de un transecto marcado, y a una profundidad de 0 a 20 cm del área seleccionada, de tal manera que se tomaron tres muestras en la línea del lado izquierdo y tres a un metro del lado derecho. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico y se colocaron en una hielera para no alterar sus propiedades edáficas.

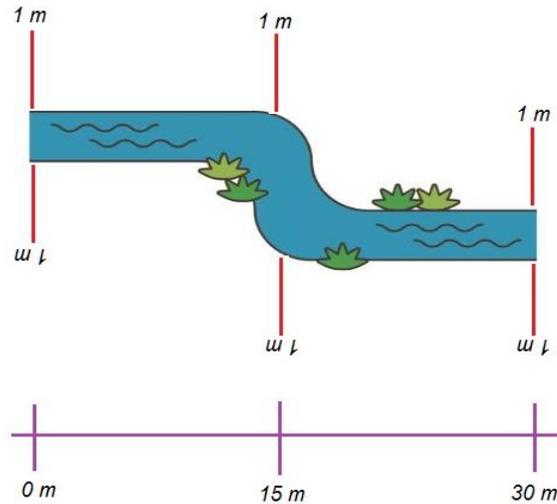


Figura 12. Diagrama del muestreo de suelo (Ilustración propia)



Figura 13. Toma de muestra de suelo (Ilustración propia)

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS *IN SITU*

Existen parámetros que se deben analizar en campo debido a que, en un periodo corto, sufren alteraciones por la luz, la temperatura o la interacción con otros materiales. Entre ellos se encuentran la temperatura, pH, conductividad eléctrica, y oxígeno disuelto.

La medición *in situ* de la temperatura, pH y conductividad eléctrica, se realizó con un multiparámetro (Combo HANNA HI98129), la determinación del oxígeno disuelto

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

se realizó con un oxímetro (YSI Modelo 55-25FT). En cada sitio se determinaron los siguientes parámetros hidrológicos: 1) velocidad de corriente, 2) ancho del cauce, y 3) el perfil batimétrico.

Al mismo tiempo el oxígeno disuelto fue determinado por el método de Winkler con la modificación de azida de sodio descrito en la NOM-AA-012-SCFL-2001, el cual consiste en la oxidación del hidróxido de manganeso disuelto para producir un precipitado de manganeso con valencia más alta. Se acidifica la muestra y los iones yoduro reducen el manganeso a su estado divalente produciéndose yodo equivalente al contenido de oxígeno original. El yodo se titula con una solución normalizada de tiosulfato de sodio. El punto final de la valoración se detecta visualmente con un indicador de almidón.



Figura 14. Parámetros in situ. A: Temperatura ambiente; B: Medición del transecto; C: Ancho del cauce; D: Traspacidad; E: Velocidad del cauce; F: Conductividad; G: pH y temperatura y H: Oxígeno disuelto (Ilustración propia)

TRABAJO DE LABORATORIO

PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE AGUA Y SUELOS RIBEREÑOS

Las muestras de agua y suelo fueron transportadas al laboratorio donde se analizaron parámetros físicos y químicos en agua y suelo.

En el cuadro #4 se muestran las propiedades tanto físicas y químicas de suelo y agua, que se registraron para cada sitio de estudio.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Cuadro #4. Propiedades físicas y químicas analizadas en agua y suelo

AGUA		SUELO	
Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades
Temperatura	°C	pH	Unidades de PH
Conductiva eléctrica	μScm^{-1}	Humedad Volumétrica	%
pH	Unidades de PH	Nitrógeno total	%
Oxígeno disuelto	$\text{mg O}_2\text{L}^{-1}$	Fósforo extractable	%
Nitratos	$\text{mg N-NO}_3\text{-L}^{-1}$		
Nitritos	$\text{mg N-NO}_2\text{-L}^{-1}$		
Amonio	$\text{mg N-NH}_4^+\text{L}^{-1}$		
Fósforo total	mg P-total L^{-1}		
Ortofosfatos	$\text{mg P-PO}_4^{3+}\text{L}^{-1}$		

PARÁMETROS HÍDRICOS

Las muestras de agua fueron almacenadas en refrigeración y analizadas en el laboratorio siguiendo los métodos de APHA-AWWA-WEF (2012), la NMX-AA-012-SCFL-2001 y Guerra y Cruz (2014), realizándose tres repeticiones por cada muestra. Los parámetros analizados fueron los siguientes:

- ❖ **Nitratos:** El ion nitrato es la forma termodinámica estable del nitrógeno combinado en los sistemas acuosos y terrestres oxigenados (Pacheco y Cabrera, 2003). La contaminación por nitratos es consecuencia de los fertilizantes nitrogenados y el mal manejo de las aguas residuales procedentes de las industrias y la urbanización. Para su determinación se utilizó el método de ácido fenoldisulfónico donde se requiere evaporar la muestra a sequedad, de tal manera que se concentren los nitratos y reaccionen con el ácido fenoldisulfónico para formar un nitroderivado, que en condiciones alcalinas es alterado ligeramente para producir un compuesto de color amarillo, la intensidad del color es proporcional a la concentración del nitrato en la muestra, lo que permite determinado por colorimetría, en comparación de una curva patrón (APHA-AWWA-WEF, 2012; Guerra y Cruz, 2014).
- ❖ **Nitritos:** El ion nitrito regularmente puede estar presente en las aguas como consecuencia de la oxidación del NH_3 o como resultado de la reducción microbiana o no de los nitratos (De Miguel-Fernández y Vázquez-Taset, 2006). Para su determinación se utilizó el método de ácido sulfanílico que se basa en la reacción de Griess, en donde los nitritos serán medidos colorimétricamente una vez que reaccionen con el ácido sulfanílico diazonizado con el clorhidrato de alfa- naftilamina, formando un color púrpura rojizo (APHA-AWWA-WEF, 2012).

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

- ❖ **Amonio:** El amonio es el producto final de la reducción de sustancias orgánicas o inorgánicas nitrogenadas que naturalmente se incorporan al agua subterránea (De Miguel-Fernández y Vázquez-Taset, 2006). El método seguido para su cuantificación fue el método fenato o azul de indofenol, el cual se basa en la reacción en condiciones alcalinas del amonio con fenol e hipoclorito catalizada por la sal manganosa, para formar indofenol de color azul que será medido colorimétricamente (APHA-AWWA-WEF, 2012).
- ❖ **Fósforo total:** El ion fosfato se forma a partir del fósforo inorgánico que existe como mineral, puede existir en solución como partículas, con fragmentos sueltos o en los cuerpos de organismos acuáticos. Opera como nutriente del crecimiento de algas por lo que un crecimiento descontrolado conduce a un proceso de eutrofización (Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017). El fósforo fue determinado por el método del fosfomolibdato, con una predigestión con persulfato de potasio, con el fin de hidrolizar los fosfatos presentes, para que posteriormente las formas químicas reaccionen con el ácido molibdeno y sufrir reducción por el efecto del cloruro de estaño, adquirirán un color azul, las cuales al ser medidas por colorimetría indicarán la concentración (APHA-AWWA-WEF, 2012).
- ❖ **Ortofosfatos:** El fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, los cuales se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados y fosfatos inorgánicos (NMX-AA-029-SCFI-2001, 1986). Fueron determinados por el método de fosfomolibdato, donde las formas químicas al reaccionar con el ácido molibdico y sufrir reducción por efecto del cloruro de estaño, adquirirán un color azul, las cuales al ser medida indicarán la concentración de ellos, siendo ésta proporcional a la intensidad del color adquirido (APHA-AWWA-WEF, 2012; Guerra y Cruz, 2014).

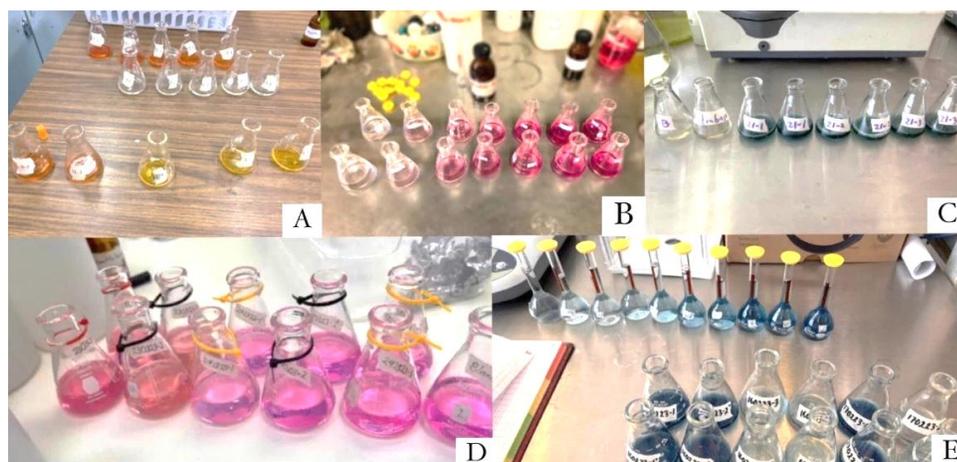


Figura 15. Parámetros hídricos determinados en laboratorio. A: Nitratos; B: Nitritos; C: Amonio; D: Fósforo total y E: Ortofosfatos (Ilustración propia)

PARÁMETROS EDÁFICOS

Después de realizar la colecta, las muestras de suelo fueron secadas al sol durante una semana y homogeneizadas, posteriormente fueron tamizadas con ayuda de una malla de #40. A continuación, se almacenaron en frascos de plástico hasta que se realizara el análisis físico y químico correspondiente.

Los métodos empleados fueron tomados por de Guerra-Hernández y Cruz-Flores (2014) y de la NOM-021-SEMARNAT-2001 (2001). Los parámetros analizados fueron los siguientes:

- ❖ **pH:** El pH del suelo influye en la disponibilidad de los nutrimentos para las plantas, debido a que es un factor que puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (Benton, 2003). Su determinación fue realizada siguiendo el método propuesto en Guerra-Hernández y Cruz-Flores (2014), a partir de una relación 1:2 con el agua.
- ❖ **Humedad volumétrica y gravimétrica:** El contenido de humedad del suelo es un indicador complementario y necesario para diferentes análisis pedológicos. El contenido es expresado como la proporción de la masa de humedad con respecto a la masa de la muestra de suelo después de que ha sido desecada a un peso constante, del mismo modo como el volumen de humedad presente respecto al volumen total de la muestra del suelo (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo [CIMMYT], 2014). La humedad volumétrica y gravimétrica hacen referencia al contenido de agua en el suelo y el método empleado para obtener estas propiedades fue sugerido por Guerra-Hernández y Cruz-Flores (2014).
- ❖ **Nitrógeno total:** El nitrógeno es un nutriente vital para las plantas, debido a que lo utilizan en la síntesis de proteínas para su crecimiento (Pacheco y Cabrera, 2003). Su deficiencia o exceso en los suelos puede provocar notables fluctuaciones en la producción vegetal, derivando consecuencias en la salud y en la productividad de los ecosistemas mundiales (Soledad *et al.*, 2014). Se determinó por el método de Kjeldhal el cual involucra dos etapas fundamentales; digestión de la muestra para convertir el nitrógeno orgánico a formas amoniacales y la destilación de la muestra digerida (Guerra-Hernández y Cruz-Flores, 2014; NOM-021-SEMARNAT-2000, 2001).
- ❖ **Fósforo extractable:** El fósforo en el suelo existe en formas orgánicas e inorgánicas, su disponibilidad depende de reacciones biológicas y geoquímicas (Giuffré *et al.*, 2000). Este nutriente es el menos móvil y con menos biodisponibilidad por lo que tiene una alta resistencia a ser lavado por la mayoría de los suelos, pero del mismo modo causa frecuentes deficiencias nutricionales en la producción agrícola (Holford, 1997). El fósforo se cuantificó por el método de Bray y Kurtz, este método es ampliamente usado

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

como índice de fósforo disponible en suelos ácidos, su extractante usa NH_4F que remueve el fósforo fácilmente. Este extractante disuelve a esos fosfatos por formación de complejos con esos metales en soluciones ácidas (Guerra-Hernández y Cruz-Flores, 2014; NOM-021-SEMARNAT-2000, 2001).



Figura 16. Parámetros edáficos determinados en laboratorio. A: pH; B: Humedad; C: Nitrógeno total y D. Fósforo total (Ilustración propia)

MANEJO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La información recabada durante los años de muestreo como resultado del trabajo en campo y de laboratorio correspondiente a dos subcuencas y 80 sitios de muestreo, fue reunida en una base de datos realizada en el programa Microsoft Office Excel.

Para el análisis estadístico en primera instancia una comparación de las variaciones espaciales de nitrógeno y fósforo en función de diferentes intervalos altitudinales, con ayuda del programa Microsoft Office Excel.

Posteriormente con el programa Statgraphics, se propuso realizar la comparación en función de los intervalos altitudinales. Dentro de las pruebas elegidas, inicialmente se propuso realizarlo a través de pruebas paramétricas, es decir un análisis de varianza, siempre y cuando los datos cumplieran los supuestos necesarios de normalidad y homocedasticidad, al no ser esto así, será necesario realizar la comparación a través de pruebas de comparación no paramétricas. Dentro de las pruebas elegidas, se propone aplicar Kruskal-Wallis para comprobar si la mediana en cada uno de los parámetros es la misma o presenta diferencias

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

significativas, posteriormente se aplicó la prueba de Mood's para comprobar si las medianas dentro de cada parámetro era la misma con $\alpha=5\%$.

Por último se llevó a cabo un análisis de correlación múltiple, entre las variables estudiadas para agua y suelo, con el propósito de identificar si las variables otorgaban información semejante de acuerdo a la colinealidad, para hacer reducción en el número de variables.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

RESULTADOS

En la figura 17 se muestran los 80 sitios estudiados, ubicados en las dos subcuencas Nexapa y Atoyac, los cuales fueron monitoreados en época de lluvia y estiaje. Los sitios monitoreados van desde los 2260 m s.n.m hasta los 4056 m s.n.m, los cuales se agruparon en 5 intervalos altitudinales: 1900-2600, 2600-3000, 3000-3600, 3600-3900 y 3900-4200 m s.n.m.

Los sitios se eligieron con los siguientes criterios: ubicaciones de lugares con distinto uso de suelo, que se tuviera una accesibilidad medida, que se nos otorgara el permiso de la localidad, que la corriente fuera permanente y que estas corrientes pertenecieran a un mismo cause en diferentes niveles altitudinales.

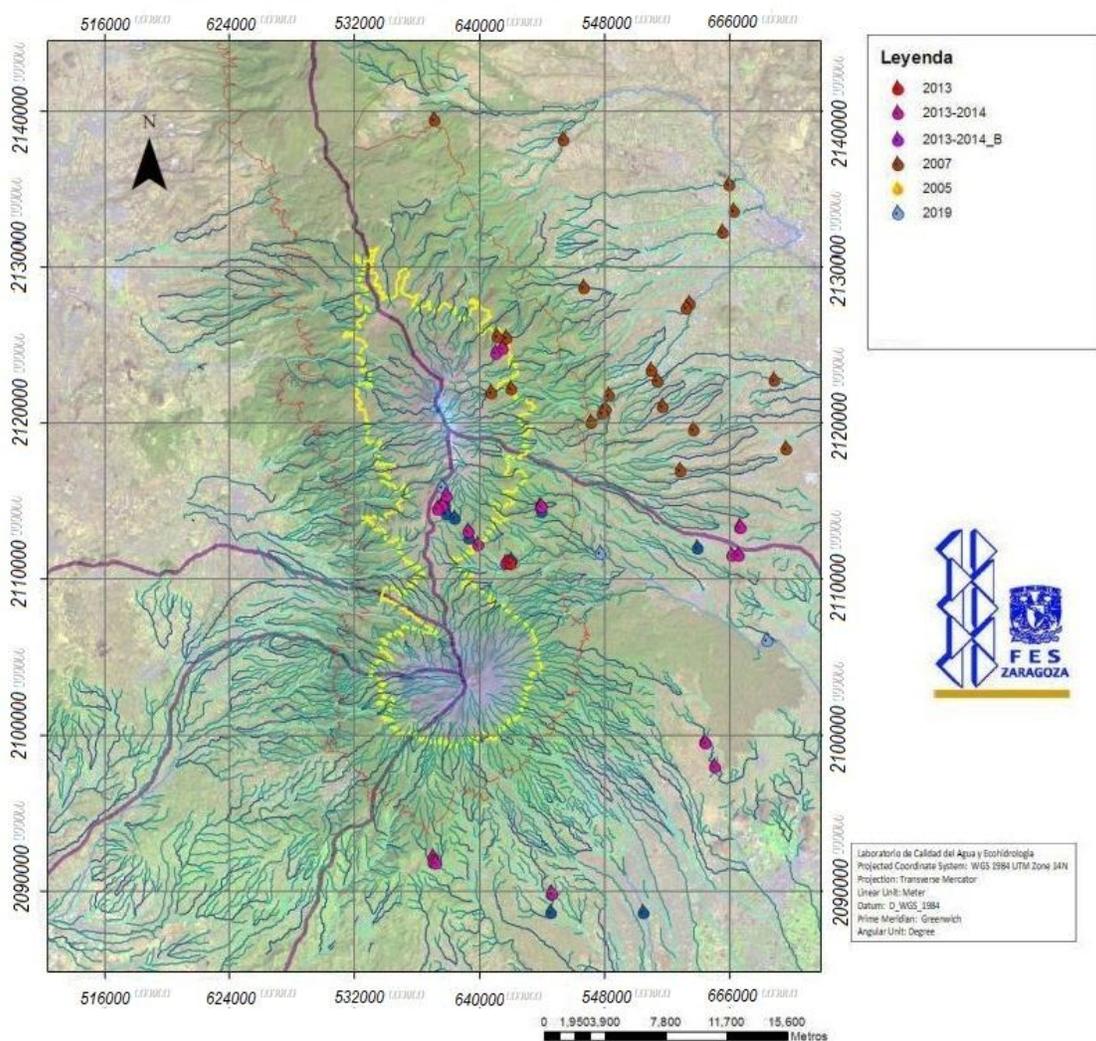


Figura 17. Ubicación de los sitios de muestreo de las subcuencas Nexapa y Atoyac (Ilustración propia)

VARIACION DE LAS PROPIEDADES HÍDRICO-EDÁFICAS

PARÁMETROS HÍDRICOS

➤ TEMPERATURA

La temperatura ambiental presentó el comportamiento esperado, es decir se observa un incremento en las temperaturas conforme desciende la altitud, manteniéndose la temperatura ambiental por arriba de la del agua para todos los años.

El valor mínimo registrado para la temperatura ambiente (figura 18) fue de 8°C y el mayor de 25°C. Se observó un comportamiento térmico superior en todos los niveles altitudinales, con un incremento paulatino de la zona alta a la zona baja.

La temperatura del agua presentó (figura 19) un valor mínimo fue de 5.7 °C y el máximo de 18°C. Los años con un comportamiento térmico superior fueron 2005 y 2014 A, con un incremento paulatino de la zona alta a la zona baja.

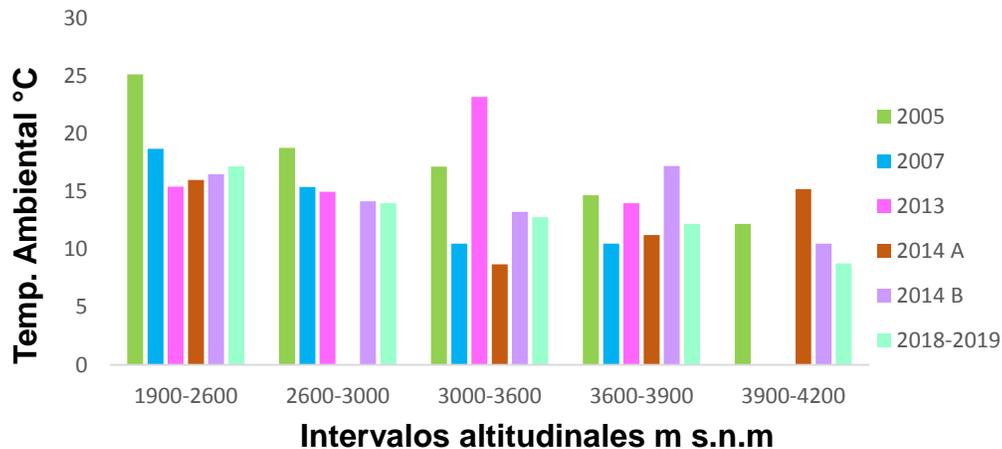


Figura 18. Variación altitudinal de la T. Ambiental con respecto a la altitud y el tiempo

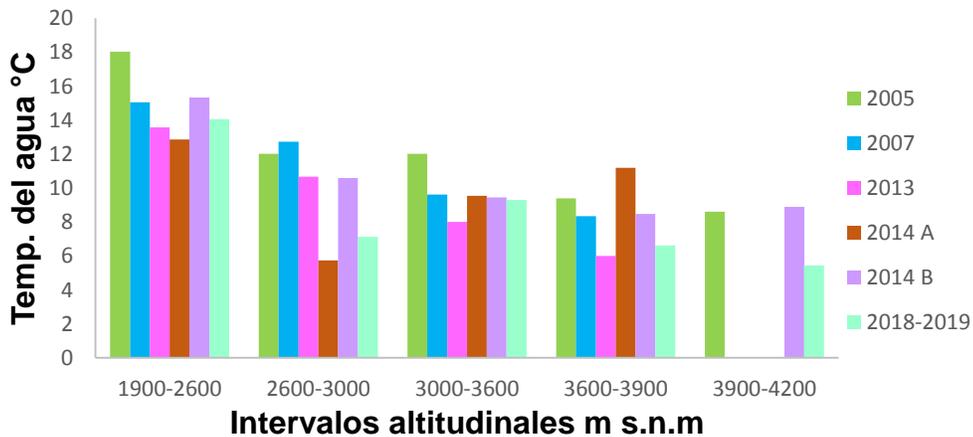


Figura 19. Variación altitudinal de la T. del agua con respecto a la altitud y el tiempo

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Al aplicar la prueba Kruskal-Wallis para la temperatura ambiente ($p_v = 0.0002$) se encontraron diferencias significativas entre las medianas de las muestras por años, (Figura 20), la temperatura del agua tuvo un comportamiento análogo ($p_v = 0.0001$) (Figura 21).

De acuerdo con la prueba de Mood ($p_v = 0.009$) las medias de las muestras son diferentes con un nivel de confianza del 95%.

Los pares de muestras correspondientes a los años 2005-2007, 2005-2013, 2005-2014 y 2005-2019 presentan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95.0% de confianza. El año 2005 tiene una diferencia importante con los años 2007, 2013, 2014 y 2019, por lo tanto no existe diferencia entre los demás años.

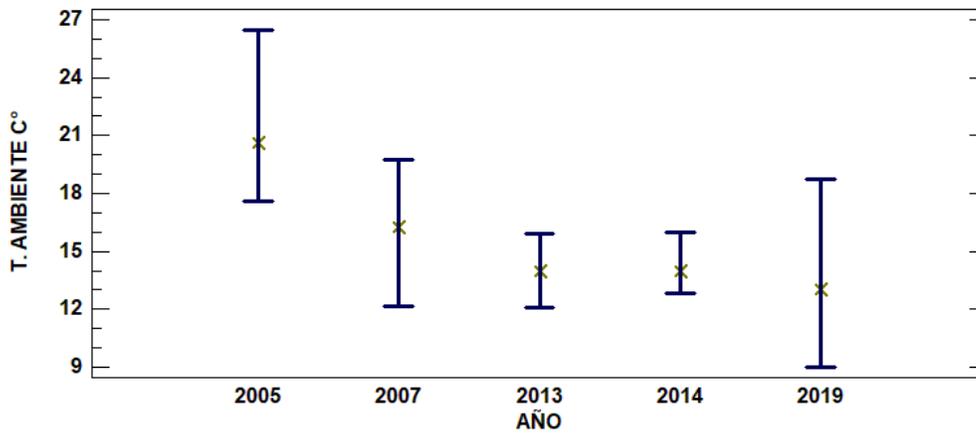


Figura 20. Comparación anual de la temperatura ambiente

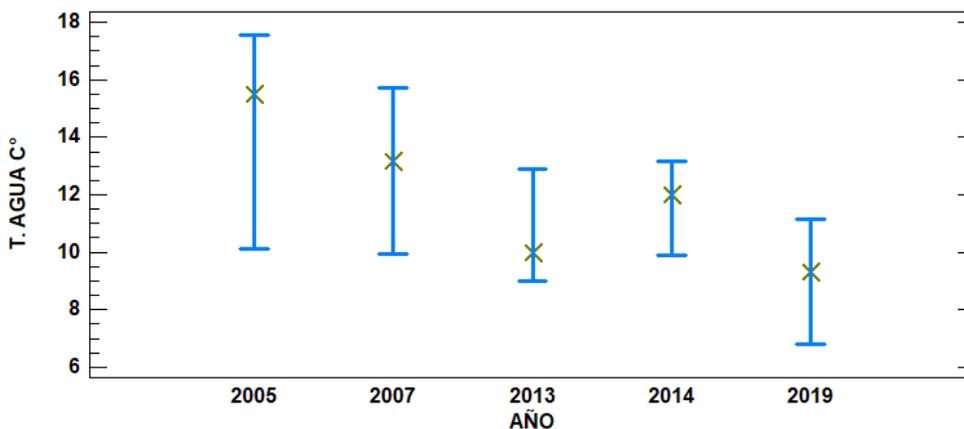


Figura 21. Comparación anual de la temperatura del agua

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

➤ pH

El pH (Figura 22) presentó valores por arriba de 5.0 en todos los intervalos altitudinales para los diferentes años.

En los años 2013 y 2014 se presentaron valores por debajo del rango aceptado en la NOM-127-SSA1-1994, los límites permisibles para uso y consumo de este recurso deben encontrarse entre 6.5 a 8.5, es decir ligeramente alcalina y neutra.

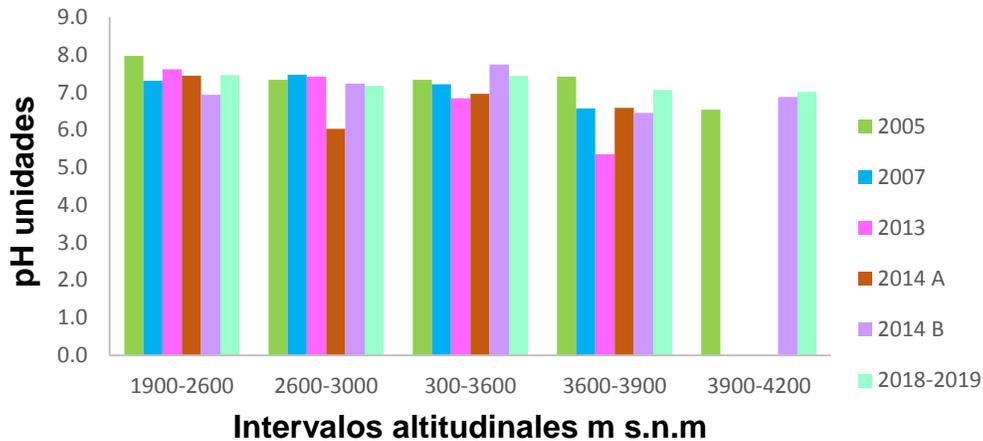


Figura 22. Variación altitudinal del pH en agua con respecto a la altitud y el tiempo

En la figura 23 se observa que existen diferencias significativas, lo que se comprueba con la prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 0.0003$) y de Mood ($p_v = 0.044$), ambas fueron realizadas a un nivel de confianza del 95.0%. Los pares de muestras que presentan una diferencia significativa son 2005-2013 y 2005-2014.

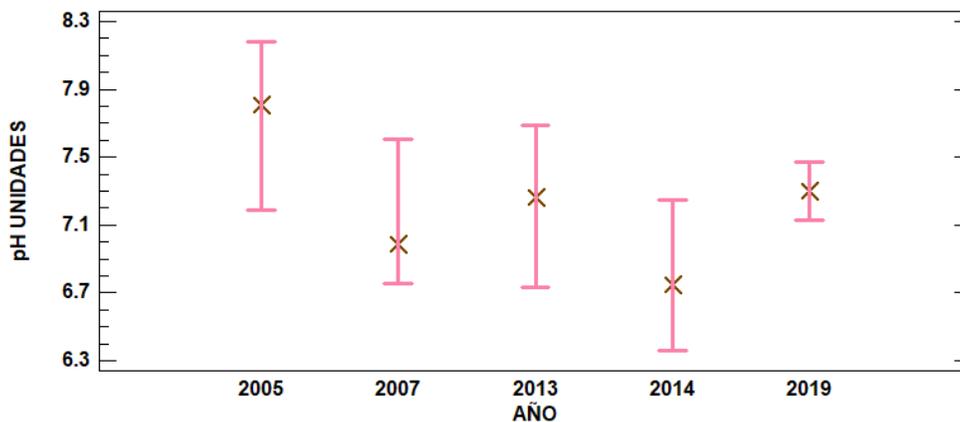


Figura 23. Comparación anual del pH del agua

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

➤ **CONDUCTIVIDAD**

La conductividad (Figura 24) aumentó conforme disminuye el gradiente altitudinal. Es decir, a mayores altitudes los valores de la conductividad son bajos, debido a que la cobertura vegetal funciona como filtro natural lo cual impide que los iones sean transportados al sistema. Las concentraciones registradas fueron de 18 a 317.9 $\mu\text{S cm}^{-1}$ de manera general.

En el año 2005 se presentaron valores elevados desde la zona alta y los siguientes años se observó un incremento constante, lo que se debe al aumento en la cantidad de sales que llega al sistema principalmente por agricultura, ganadería y presencia de asentamientos humanos.

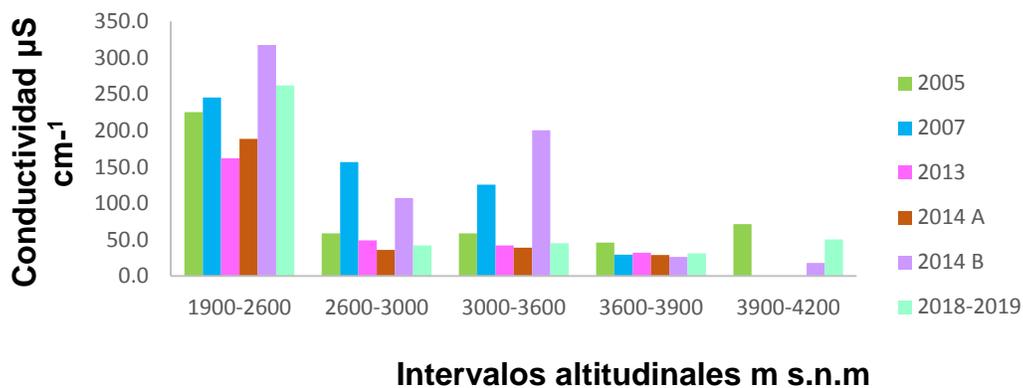


Figura 24. Variación altitudinal de la conductividad del agua con respecto a la altitud y el tiempo

La prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 0.0442$) y la prueba de Mood ($p_v = 0.016$) según las medianas de los años son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95.0%. Los pares de muestras correspondientes a los años 2007-2013, 2007-2014, 2013-2014 y 2014-2019 presentaron diferencias significativas a un nivel de confianza del 95.0%.

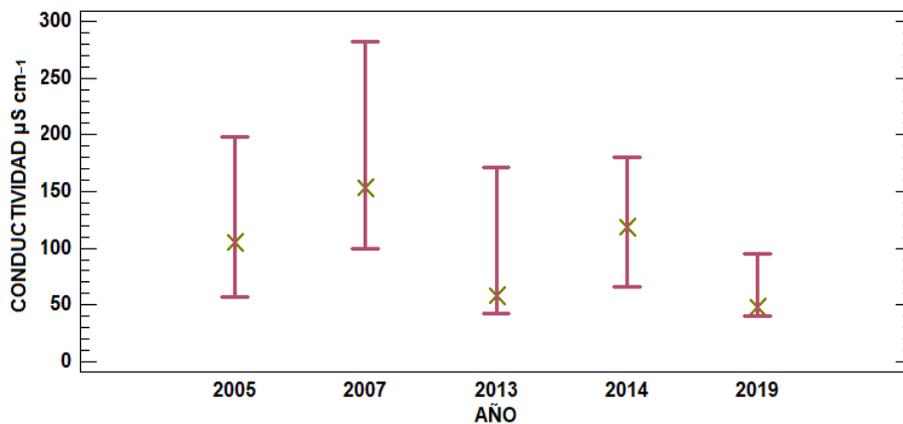


Figura 25. Comparación anual de la conductividad del agua

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

➤ **OXÍGENO DISUELTO**

El oxígeno disuelto es uno de los indicadores más importantes en la calidad del agua, los valores varían entre los 7.0 y 9.0 mg L⁻¹.

Los valores de oxígeno disuelto (figura 26) presentaron hasta los 9 mg L⁻¹, los factores naturales que influyen en estas concentraciones son la temperatura, la altitud y la velocidad de corriente.

Los valores no presentan ningún patrón y registran fluctuaciones para cada uno de los años. Se presenta una disminución en el intervalo altitudinal 1900-2600 m s.n.m relacionado con las altas concentraciones de nutrientes y la temperatura.

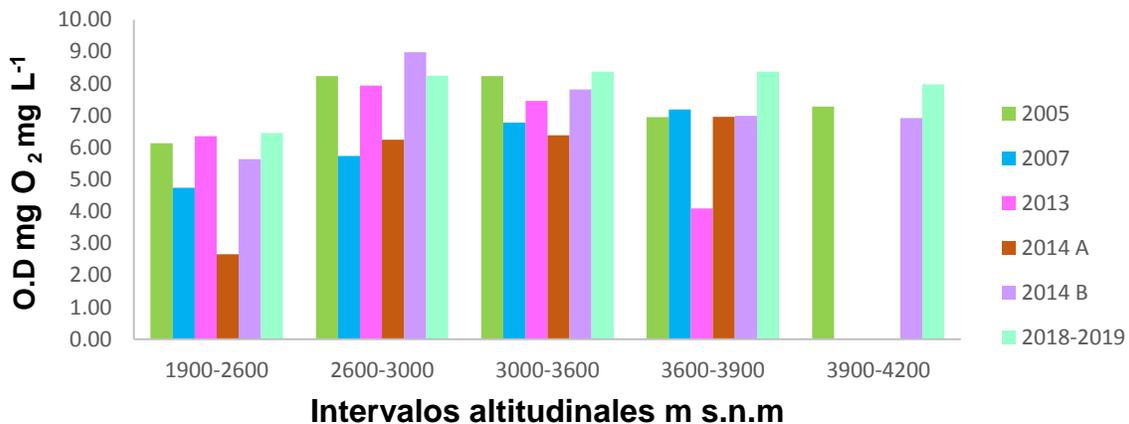


Figura 26. Variación altitudinal del O.D en agua con respecto a la altitud y el tiempo

Al realizar las pruebas de Kruskal-Wallis ($p_v = 0.0005$) y Mood ($p_v = 0.003$) indican que existen diferencias significativas en las medianas de las muestras en los años. Los pares de muestras de los años 2007-2013, 2007-2019, 2013-2014 y 2014-2019 presentan diferencias estadísticamente significativas, realizadas a un nivel de confianza del 95.0%.

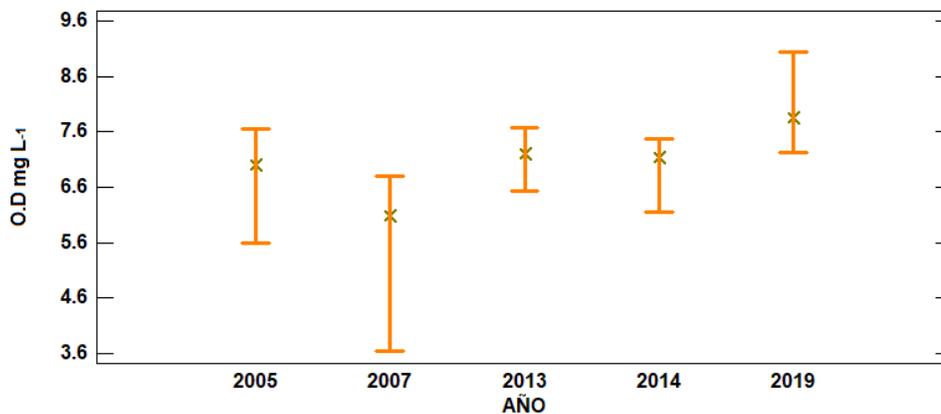


Figura 27. Comparación anual del O.D del agua

➤ NITRÓGENO

El nitrógeno en sus formas químicas nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y amonio (NH_4^+) tiene una tendencia aumentar durante los años, consecuencia de las actividades que se realizan en al área circundante a los sitios de muestreo.

Los nitratos (Figura 28) presentaron un valor máximo de 3.6 y un mínimo de 0.003 mg L^{-1} . Los valores más altos se presentaron en el intervalo altitudinal de 2600-1900 m s.n.m perteneciente al área donde se realizan la mayor cantidad de actividades antropológicas, lo que trae consigo el aumento de nutrientes en el sistema.

Los nitritos (Figura 29) presentaron de manera mínima en todos los años, teniendo una excepción en el primer intervalo 2600-1900 m s.n.m, con un valor máximo de 0.045 mg L^{-1} .

El amonio (Figura 30) presento valores elevados en el primer intervalo altitudinal 2600-1900 para todos los años, con un valor de 5.151 mg L^{-1} lo cual supera los valores permitidos por la NOM-127-SSA1-2021.

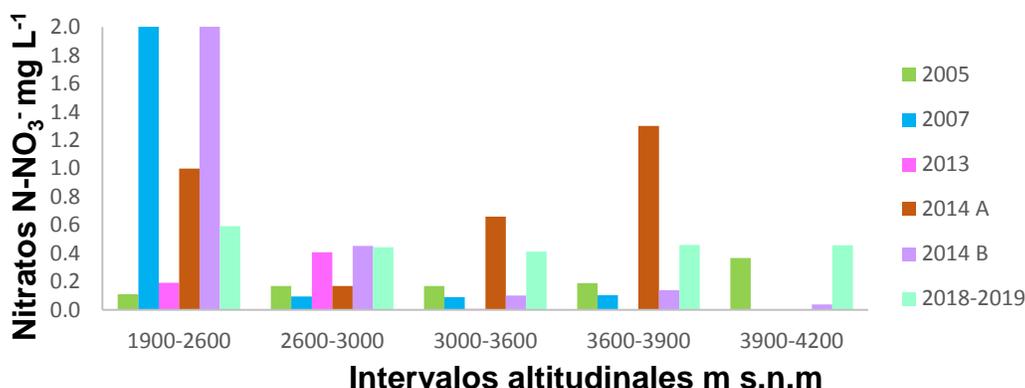


Figura 28. Variación altitudinal de nitratos en agua con respecto a la altitud y el tiempo

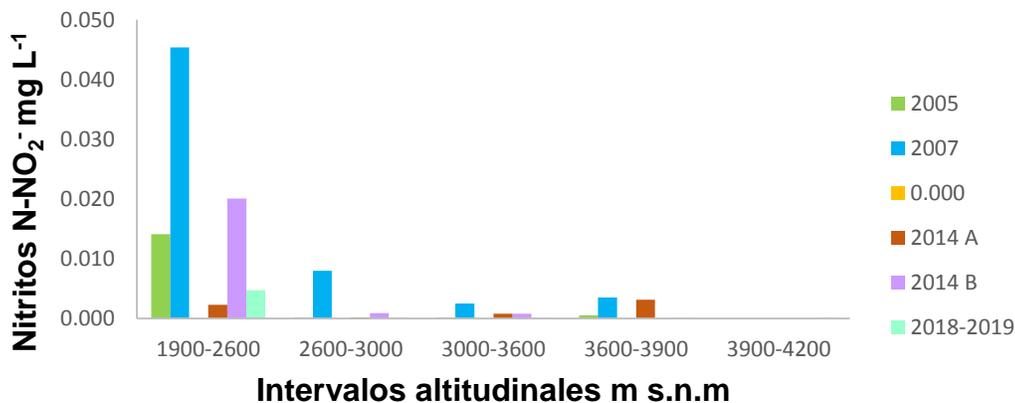


Figura 29. Variación altitudinal de nitritos en agua con respecto a la altitud y el tiempo

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

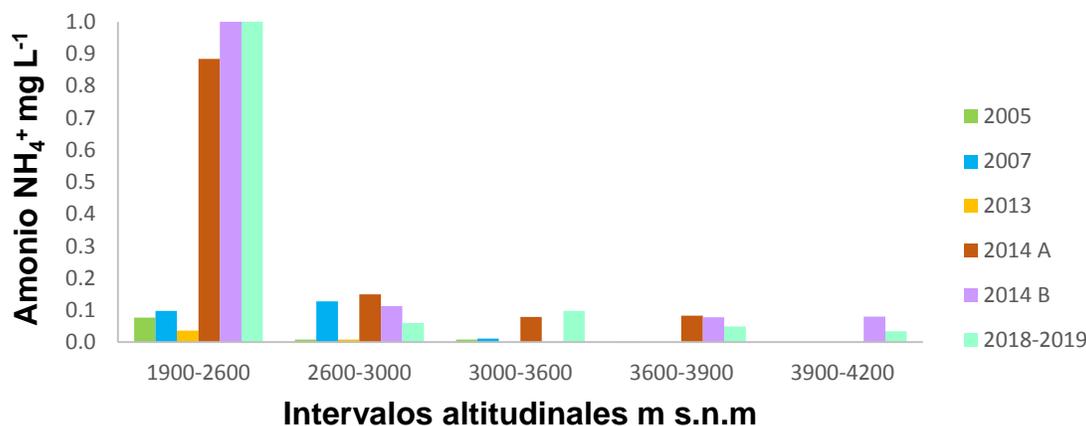


Figura 30. Variación altitudinal de amonio en agua con respecto a la altitud y el tiempo

Los nitratos (Figura 31) se presentan de manera uniforme y aumentan de manera importante en los dos últimos años, lo que indica una gran cantidad de nutrientes en el sistema, consecuencias de actividades biológicas, químicas y físicas.

Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 5.379$) se observa que la mediana dentro de las 5 columnas no es la misma. Mientras que la prueba de Mood ($p_v = 0.000002$) indica que la mediana de las muestras es significativamente diferente. Ambas pruebas se realizaron con un nivel de confianza del 95.0%

Los únicos pares de muestras que presentan diferencias significativas son 2005-2007 y 2007-2013, con un nivel de confianza del 95.0%.

Los nitritos (Figura 32) se presentan de manera mínima para los años, haciendo excepción el año 2007, donde existe un incremento importante, consecuencia del uso de suelo recreativo, agropecuario o agrícola

La prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 0.0062$) indica que existe una diferencia estadísticamente en la mediana de las 5 columnas. Respecto a la prueba de Mood ($p_v = 0.062$) se observa que las medianas de las muestras no son significativamente diferentes. Las dos pruebas se realizaron con un nivel de confianza del 95.0%.

Los pares de muestras que presentan diferencias significativas son 2005-2007, 2007-2013, 2007-2014 y 2007-2014, con un nivel de confianza del 95.0%, es importante resaltar que el año 2005 presentó diferencias importantes con los años 2007, 2013 y 2014, sin embargo no hay diferencias entre los demás años.

El amonio (Figura 33) se presenta de manera muy heterogénea, es decir no muestra ningún patrón, presenta fluctuaciones importantes en los años 2007, 2014 y 2019.

La prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 9.706$) indica que las medianas dentro de las 5 columnas no son las mismas. Al realizar la prueba de Mood ($p_v = 8.463$) las

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

medianas de las muestras son significativamente diferentes. Ambas pruebas se realizaron con un nivel del 95.0% de confianza.

El único par de muestra que presenta diferencias significativas en 2005-2014, con un nivel de confianza del 95.0%.

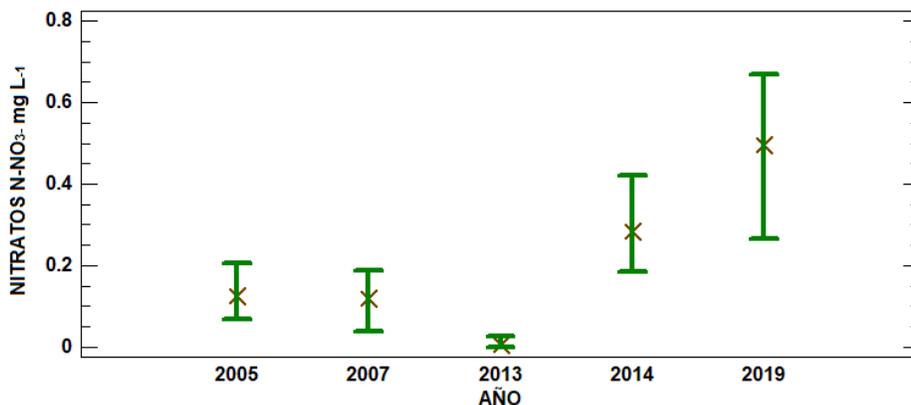


Figura 31. Comparación anual de nitratos del agua

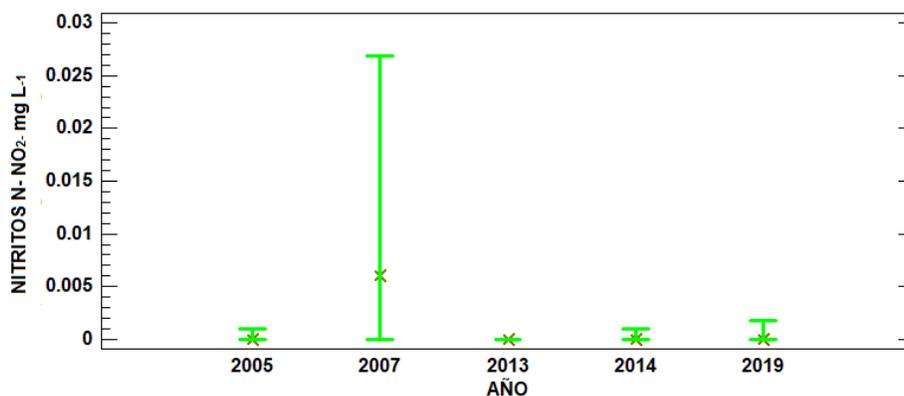


Figura 32. Comparación anual de nitritos del agua

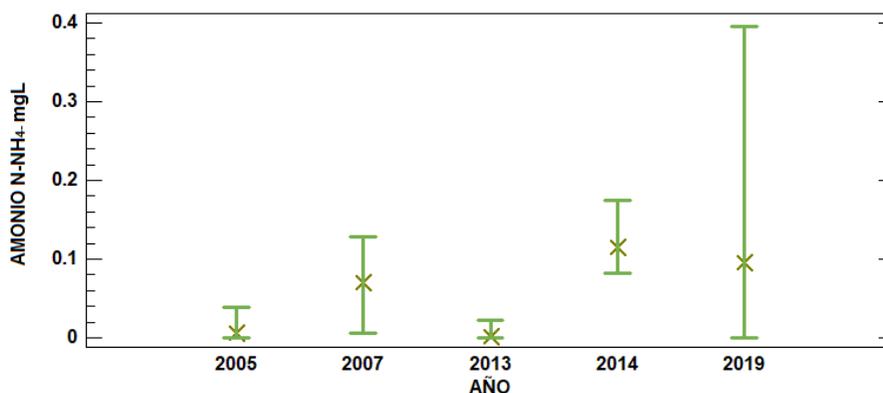


Figura 33. Comparación anual de amonio del agua

➤ FÓSFORO

El comportamiento altitudinal del fósforo (Figura 34) presento un aumento en todos los años, consecuencia de la introducción de fertilizantes comerciales, residuos de plantas, desechos industriales, domésticos y agrícolas, lo que coincide con Páez y colaboradores (2008).

El fósforo presenta un incremento a través los años, presentado valores de 0 hasta 2.6 mg L⁻¹ teniendo el valor más alto en el intervalo altitudinal de 1900-2600. Estos valores no rebasan los establecidos por la NOM-001-ECOL.1996. Se observa un incremento importante en los dos últimos años 2014 y 2018-2019, desde las zonas altas.

Los ortofosfatos (Figura 35) tuvieron una variación en los años, por lo que no presentaron un patrón. Se observa un aumento considerable en las zonas bajas para todos los años. Los ortofosfatos presentaron valores desde 0.001 hasta 0.689 mg L⁻¹, presentando el valor más alto en el primer intervalo altitudinal en el año 2005.

Es importante resaltar que en los primeros años 2007, 2013 y 2014 no se presentaban ortofosfatos en las zonas altas de las subcuencas, sin embargo los últimos años (2014 B y 2018-2019) ya presentan concentraciones elevadas de ortofosfatos.

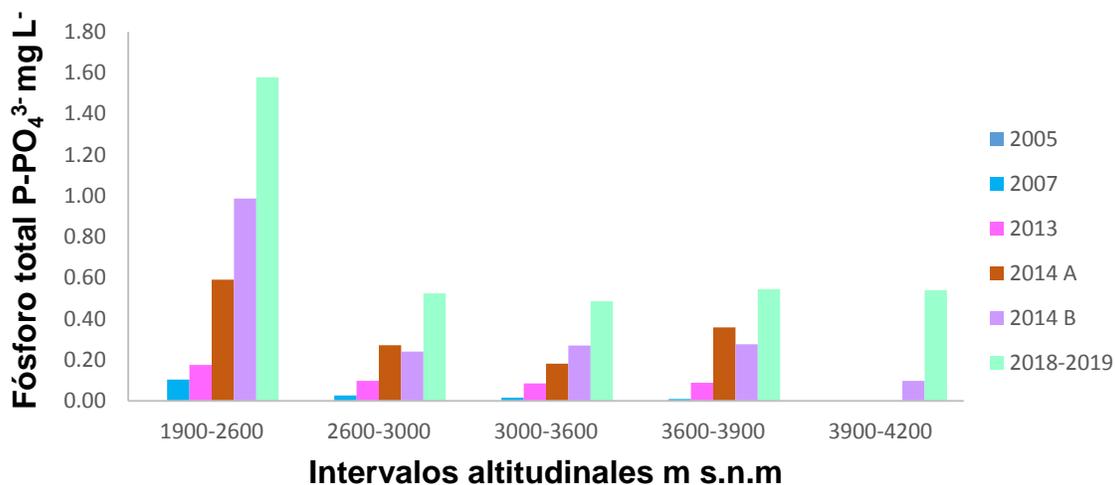


Figura 34. Variación altitudinal de fósforo total en agua con respecto a la altitud y el tiempo

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

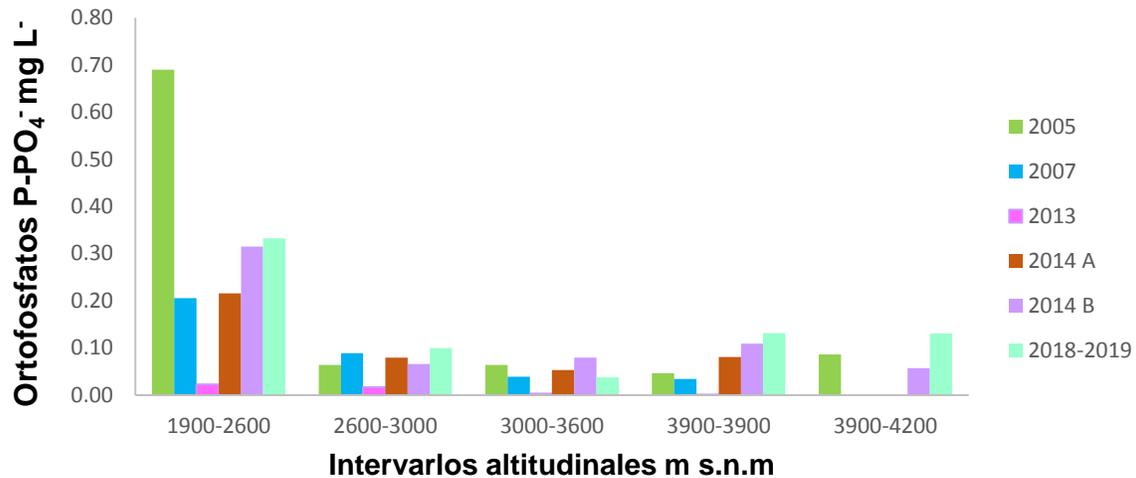


Figura 35. Variación altitudinal de ortofosfatos en agua con respecto a la altitud y el tiempo

En la figura 36 se observa que al realizar la prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 0$) existen diferencias significativas entre las medianas de los años. La prueba de Mood ($p_v = 1.441$) indica que las medianas de las 4 muestras son significativamente diferentes. Realizadas con un nivel de confianza de 95.0%

Los pares de muestras de los años 2007-2014, 2007-2019, 2013-2014 y 2013-2019 presentan diferencias significativas con un nivel de confianza del 95.0%.

Los ortofosfatos (Figura 37) presentan una reducción en los dos primeros años, lo que está relacionado con la disminución de las descargas de aguas residuales y la deforestación, sin embargo en los últimos dos años se presenta un incremento, con lo que se concluye que a medida que transcurren los años las actividades antrópicas aumentan de manera acelerada en las zonas monitoreadas.

Al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 3.537$) indica que las medianas dentro de las 5 columnas no es la misma. Para la prueba de Mood ($p_v = 0.00003$) se observa que las medianas de las muestras son significativamente diferentes. Las pruebas se realizaron con un nivel de confianza del 95.0%.

Los pares de muestras de los años 2005-2007, 2005-2013, 2005-2014 y 2005-2019 presentan diferencias significativas con un nivel de confianza del 95.0%, se observa que el año 2005 presenta diferencias importantes con los años 2007, 2013, 2014 y 2019, sin embargo no hay en los demás.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

De acuerdo con los niveles que se tienen de fósforo total, se puede observar una asimilación por la vegetación de forma rápida, lo que da como consecuencia los niveles que se presentan de ortofosfatos.

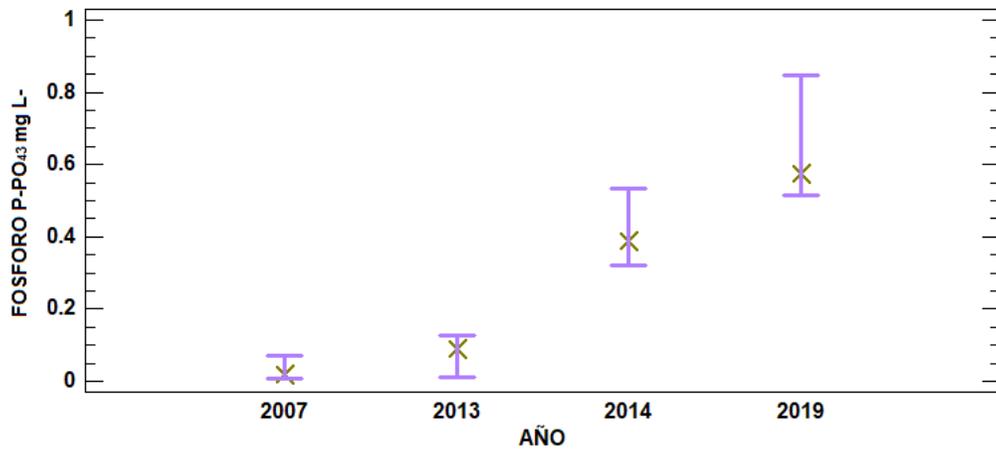


Figura 36. Comparación anual de fósforo del agua

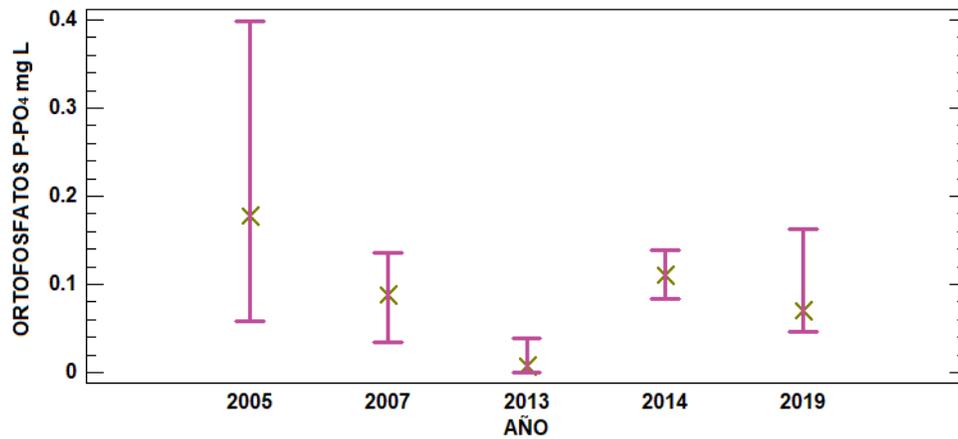


Figura 37. Comparación anual de ortofosfatos del agua

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

En el cuadro #5, se sintetizan los valores promedio, máximo y mínimo de cada una de las variables respecto a los años, lo que nos otorga un panorama general del cambio que se presentó en los años 2005, 2007, 2013, 2014 y 2019.

Cuadro #3. Promedio, Máximo y mínimo de las variables hídricas, por año

Año		T. Agua	Cond.	pH	O. D	Nitratos	Nitritos	Amonio	Fósforo	Ortofosfatos
2005	Prom.	14.7	7.65	7.65	6.78	0.51	0.007	0.04	0	0.40
	Máx.	27.0	8.53	8.53	10.1	0.36	0.07	0.34	0	3.69
	Min.	8.6	6.34	6.34	2.9	0.004	0	0	0	0
	Media	14.75	148.1	7.65	6.78	1.51	0.007	0.045	0	0.40
	Mediana	15.5	105.2	7.81	7	0.12	0	0.005	0	0.17
2007	Prom.	13.1	7.25	7.25	5.45	2.08	0.02	0.08	0.06	0.14
	Máx.	18.7	9.14	9.14	7.54	15.38	0.19	0.37	0.36	0.79
	Min.	8.15	6.56	6.56	2.27	0.002	0	0	0.003	0.02
	Media	13.18	188.4	7.25	5.45	2.08	0.027	0.084	0.66	0.14
	Mediana	13.15	153.5	6.99	6	0.12	0.006	0.07	0.019	0.08
2013	Prom.	11.2	7.20	7.20	7.02	0.13	0.009	0.55	0.10	0.02
	Máx.	22.0	8.3	8.3	8.9	0.64	0.23	13.52	0.53	0.13
	Min	6.0	5.35	5.35	4.09	0	0	0	0	0
	Media	11.27	97.9	7.2	7	0.13	0.009	0.55	0.10	0.02
	Mediana	10	58	7.26	7.2	0.006	0	0.002	0.088	0.007
2014	Prom.	11.7	6.92	6.92	5.29	1.27	0.002	1.51	0.57	0.18
	Máx.	20.0	11	11.0	10.9	24.2	0.03	20.46	3.88	1.23
	Min	4.6	5.62	5.62	0	0.46	0	0	0.05	0.02
	Media	11.71	18.14	6.9	5.69	1.27	0.002	1.51	0.57	0.18
	Mediana	12	119	6.74	7.1	0.28	0	0.11	0.38	0.111
2019	Prom.	9.15	7.25	7.25	7.81	0.48	0.001	0.77	0.77	0.15
	Máx.	7.9	7.9	7.9	10.31	0.93	0.008	6.144	2.30	0.71
	Min	6.2	6.2	6.2	2.63	0	0	0	0.11	0.01
	Media	9.15	93.5	7.25	7.81	0.48	0.001	0.77	0.77	0.15
	Mediana	9.3	48	7.3	7.2	0.497	0	0.95	0.57	0.07

PARÁMETROS EDÁFICOS

➤ *pH*

El pH (figura 38) del suelo mostró una tendencia ascendente conforme los años, indica una fuerte variación en la concentración de iones hidronio o acidez en los suelos registrándose suelos fuertemente ácidos o alcalinos.

De acuerdo con la NOM-020-ECOL-2001 el pH de los sitios estudiados se clasifica como fuertemente ácido (<5), moderadamente ácido (5.1- 6.5) y neutro (>6.6). Los valores más bajos se presentaron en el año 2014 en todos los intervalos altitudinales por otro parte los valores más alcalinos el último año.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

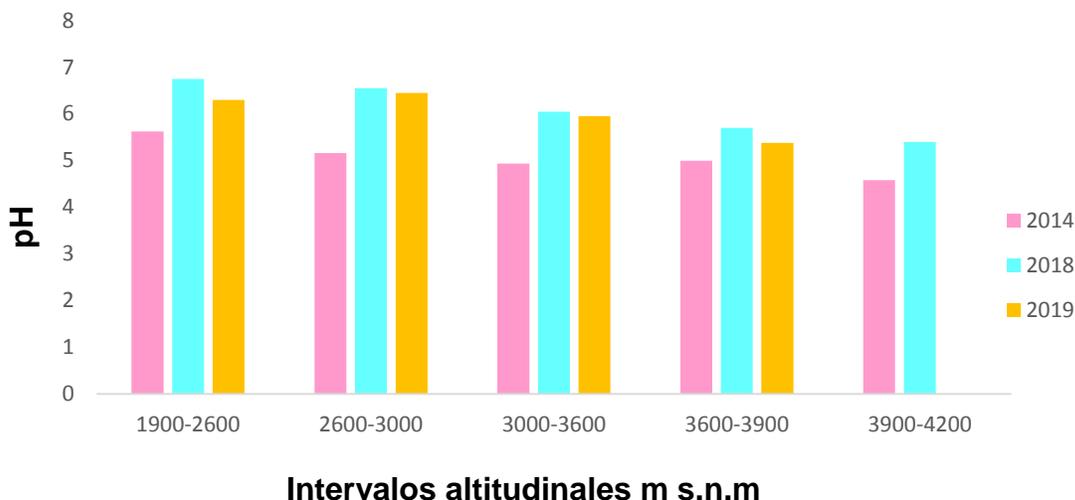


Figura 38. Variación altitudinal del pH del suelo con respecto a la altitud y el tiempo

Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 0.003$) nos indica que las medianas de los años no es la misma. Por otro lado la prueba de Mood ($p_v = 0.22$) denota que las medianas de las muestras no son significativamente diferentes. Las pruebas se realizaron con un nivel de confianza del 95.0% (figura 39)

Los pares de muestras que presentan diferencias significativas a un nivel de confianza del 95.0% son 2014-2018 y 2014-2019.

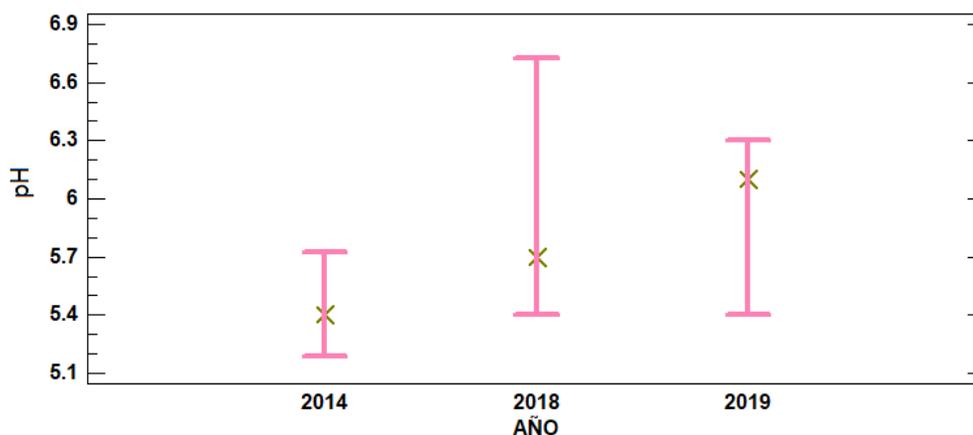


Figura 39. Comparación anual del pH del suelo

➤ **PORCENTAJE HUMEDAD**

Los valores de humedad (figura 40) son heterogéneos es decir no se encuentran diferencias significativas en los años respecto a los intervalos altitudinales, haciendo una excepción en el año 2018 lo cual se puede atribuir a la cantidad de lluvia anual de dicho año, la cual fue mayor que los años anteriores (CONAGUA, 2022).

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

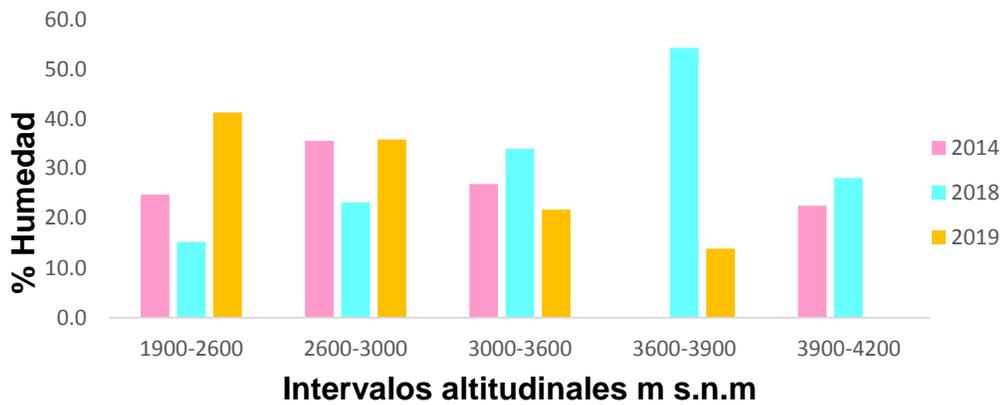


Figura 40. Variación altitudinal del %Humedad en suelo con respecto a la altitud y el tiempo

En la figura 41 se observa que no existen diferencias significativas en los años que se comprueba con la prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 0.633$) y de Mood ($p_v = 0.323$), ambas fueron realizadas a un nivel de confianza del 95.0%. Por lo que no se presentan diferencias en pares de muestras.

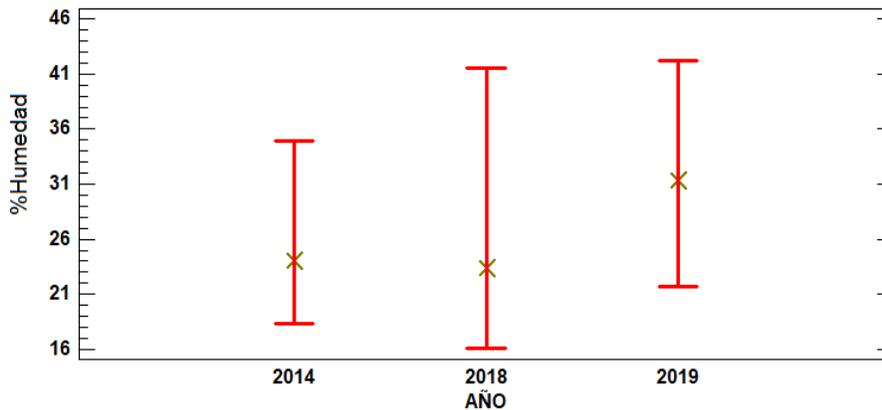


Figura 41. Comparación anual del %Humedad del suelo

➤ **PORCENTAJE NITRÓGENO**

La deficiencia de nitrógeno es poco probable que se presente en suelos cultivados. Sin embargo, los niveles de nitrógeno en los sitios de muestreo tienen una tendencia a disminuir en los tres años. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2001, el porcentaje nitrógeno en el suelo presenta valores muy bajos, por debajo de los 0.3 mg (figura 42).

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

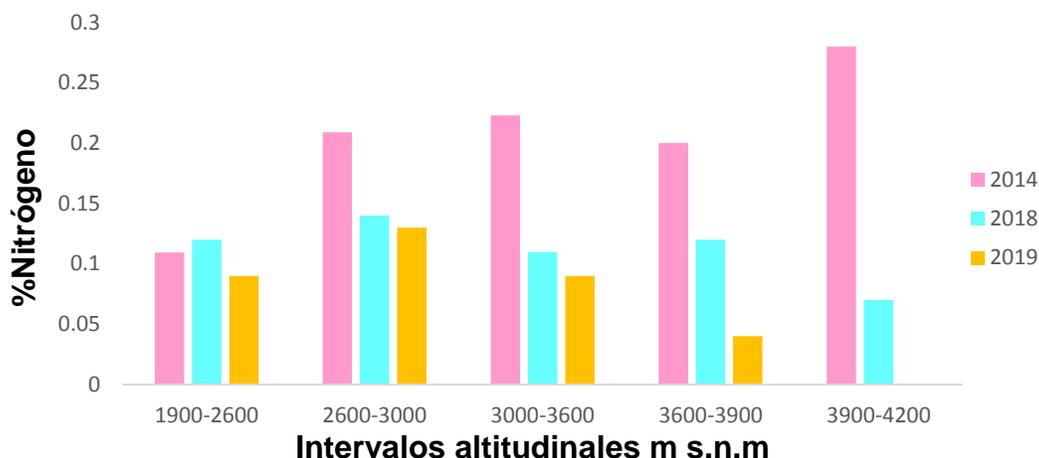


Figura 42. Variación altitudinal del nitrógeno en suelo con respecto a la altitud y el tiempo

Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 0.010$) y la prueba de Mood ($p_v = 0.0007$) según las medianas de las muestras son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95.0%. Para los pares de muestras correspondientes a los años 2014-2018 y 2014-2019 se presentaron diferencias significativas a un nivel de confianza del 95.0% (figura 43).

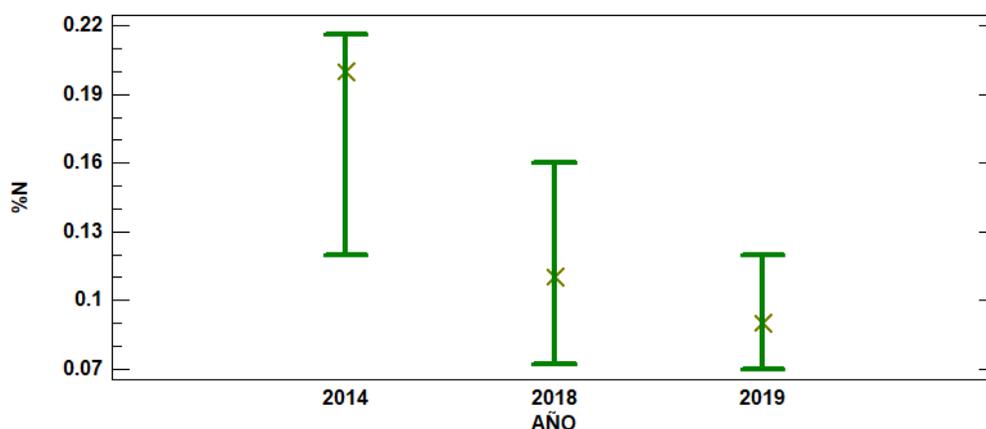


Figura 43. Comparación anual del %N del suelo por años

➤ **PORCENTAJE FÓSFORO**

Los valores del fósforo (figura 44) tienen una tendencia a aumentar conforme aumentan los años y desciende el intervalo altitudinal. Cabe destacar que los niveles para el año 2014 son menores a 15 mg posteriormente aumentan para el año 2018 y finalmente se presentan los valores más altos en el último nivel altitudinal para el año 2019 llegando a 80 mg kg⁻¹.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

Según el método Bray y Kurtz 1, se registraron valores bajos (<15 mg kg⁻¹), hasta altos (>30 mg kg⁻¹). Presentándose las mayores concentraciones en el último intervalo.

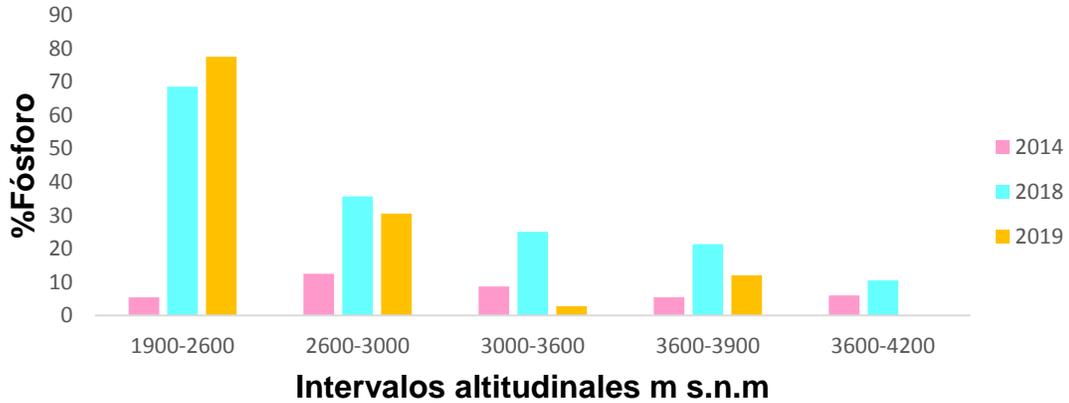


Figura 44. Variación altitudinal del fósforo con respecto a la altitud y el tiempo

En la figura 45 se observa que existen diferencias significativas en los años, lo que se comprueba con la prueba de Kruskal-Wallis ($p_v = 0.018$) y de Mood ($p_v = 0.14$), ambas fueron realizadas a un nivel de confianza del 95.0%. Los pares de muestras que presentan una diferencia significativa son 2014-2018 y 2014-2019.

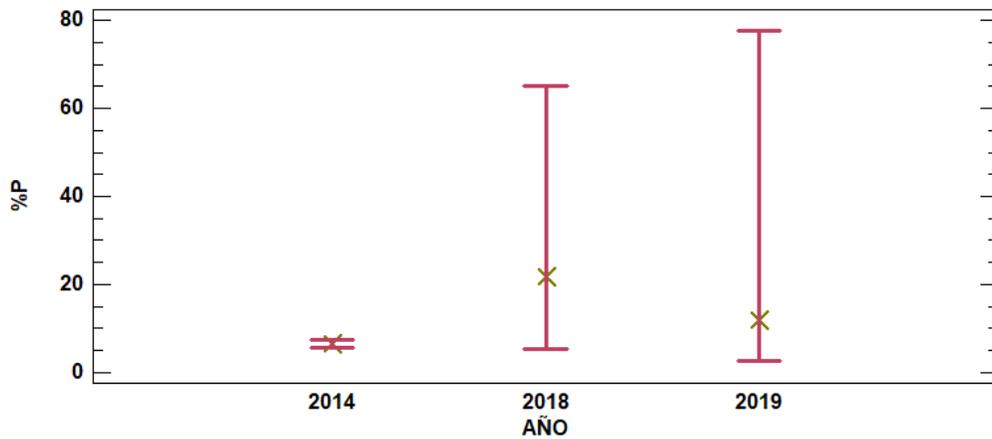


Figura 45. Comparación anual del %P del suelo

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

En el cuadro #6, se sintetizan los valores promedio, máximo y mínimo de cada una de las variables respecto a los años, lo que nos otorga un panorama general del cambio que se presentó en los años 2014, 2018 y 2019.

Cuadro #4. Promedio, máximo y mínimo de las variables edáficas, por año

AÑO		PH	%HUMEDAD	%NITRÓGENO	%FÓSFORO
2014	Prom.	5.38	27.58	0.17	7.82
	Máx.	6.32	70.28	0.33	22.71
	Min.	4.20	5.80	0.02	1.74
	Media	27.58	5.38	0.09	7.82
	Mediana	24.03	5.3	0.2	6.58
2018	Prom.	5.92	29.96	0.11	27.44
	Máx.	6.75	66.24	0.17	68.62
	Min.	5.4	15.24	0.07	5.23
	Media	29.96	5.92	0.11	27.46
	Mediana	23.38	5.7	0.11	21.73
2019	Prom.	5.9	31.38	0.09	38.36
	Máx.	6.45	55.68	0.14	77.77
	Min.	5.2	13.88	0.03	12.0
	Media	31.38	5.9	0.17	27.88
	Mediana	31.29	6.1	0.09	12

RELACIÓN N:P

La relación N:P se pensaba en función de la concentración que se da por uso agrícola y por procesos de eutrofización en los sitios de muestreo, sin embargo, no se encontró alguna significancia importante en cualquiera de los dos.

COMPARACIÓN ALTITUDINAL

AGUA

➤ *TEMPERATURA AMBIENTAL*

Los datos atípicos corresponden a los sitios: Santiago Xalizintla y Nealtican para para 1900-2600 m s.n.m.

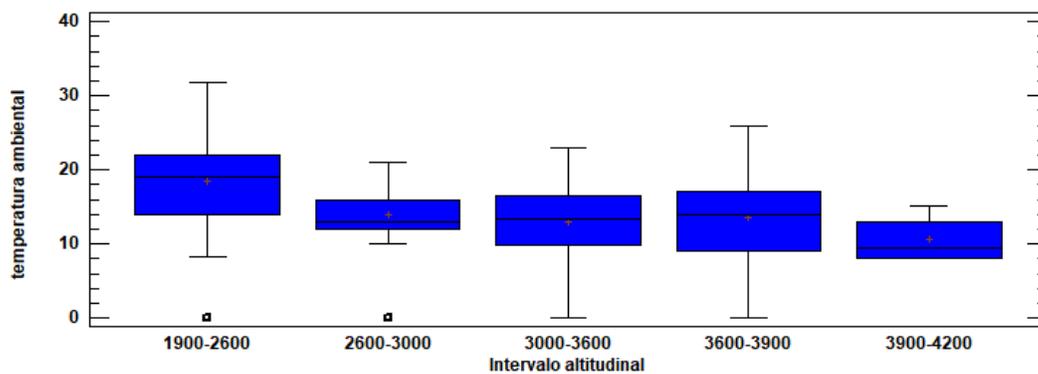


Figura 46. Comparación altitudinal de la temperatura ambiental

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

➤ **TEMPERATURA AGUA**

Los datos atípicos corresponden a los sitios: Nealtican, San Pedro Yancuitlapan, Tochimilco Manantial, Rio Alseseca-Calpan y San pedro Atlixco para 1900-2600 m s.n.m; Rio Apol, Apatlaco 7 y Buenavista para 300-3600 m s.n.m; y Vallecito para 3600-3900 m s.n.m.

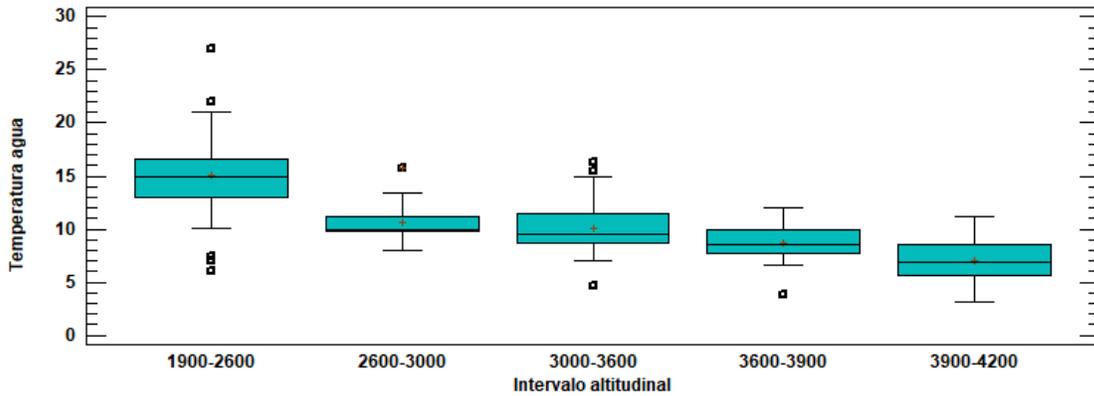


Figura 47. Comparación altitudinal de la temperatura del agua

➤ **pH**

Los datos atípicos corresponden a los sitios: Ex hacienda 1900-2600 m s.n.m; y Manantial Volkswagen para 3600-3900 m s.n.m.

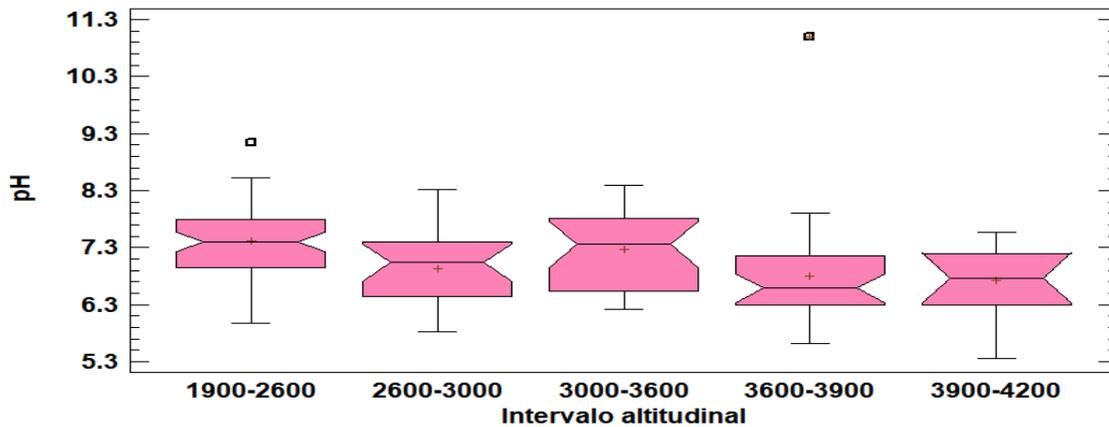


Figura 48. Comparación altitudinal del pH en agua

➤ **CONDUCTIVIDAD**

Los datos atípicos corresponden a los sitios: San Rafael Tlanalapa II, San Rafael Tlanalapa Rio y Tlacotepec para 1900-2600 m s.n.m; Rio Apol, Atzompa e instituto (1) para 2600-3000 m s.n.m; y Vallecito para 3600-3900 m s.n.m.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

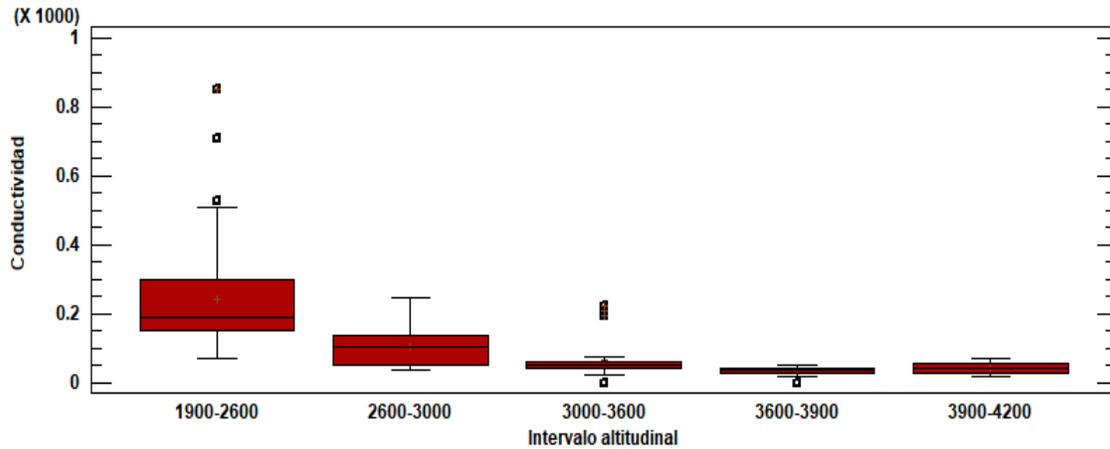


Figura 49. Comparación altitudinal de la conductividad en agua

➤ **OXIGENO DISUELTO**

Los sitios atípicos corresponden a: San Andres Zacalopan y Apipilolco Chico para 2600-3000 m s.n.m; Buenavista para 3000-3600 m s.n.m; Vallecito, Apatlaco 3 y Apatlaco 1 para 3600-3900 m s.n.m; y Buenavista para 3900-4200 m s.n.m.

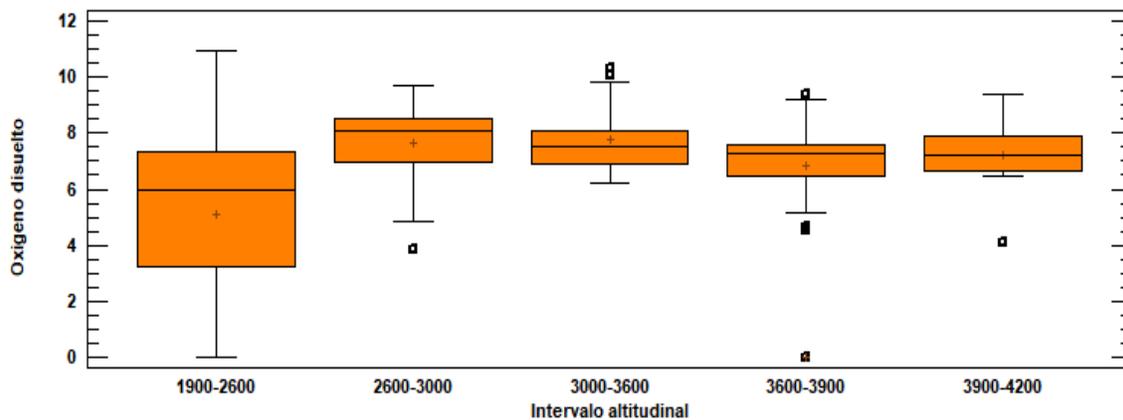


Figura 50. Comparación altitudinal del O.D en agua

➤ **NITRATOS**

Los datos atípicos representan los sitios: San Rafael Tlanalapan II, Ex hacienda, San Rafael Tlanalapan, Distrito Atoyac-Zahuapan, Tlacotepec y Calpan-Ameyal, San Simón Atzitzintla para 1900-2600 m s.n.m; Rio Cotzala para 2600-3000 m s.n.m; Buenavista 3000-3600 m s.n.m; y Apatlaco 1, Manantial Volkswagen y San Simón Atzitzintla para 3600-3900 m s.n.m.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

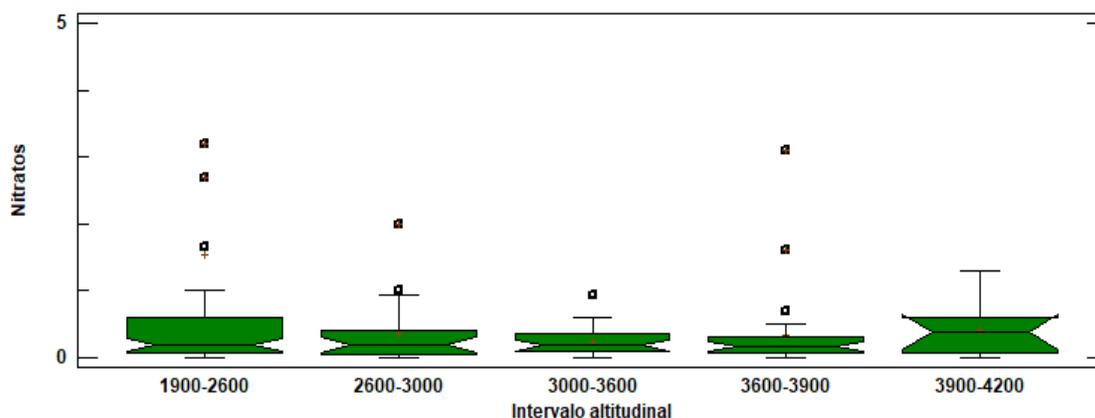


Figura 51. Comparación altitudinal de nitratos en agua

➤ **NITRITOS**

Los datos atípicos corresponden a los sitios: San Rafael Tlanalapa Rio, Coatzingo, Tlacotepec, Los Molinos, Tecuapan II, Atlimeyaya, San Rafael Tlanalapan II, San Simón Atzitzintla, San Felipe Teotlalcingo, Rio Alseseca, Atlimeyaya II para 1900-2600 m s.n.m; Puente Xilitla y San Andres Zecalocoayan para 2600-3000 m s.n.m; e Instituto (1), Atzopa, Rio Apol, Instituto (2), Apatlaco 1, Apatlaco 2 y Apatlaco 3 para 3600-4200 m s.n.m.

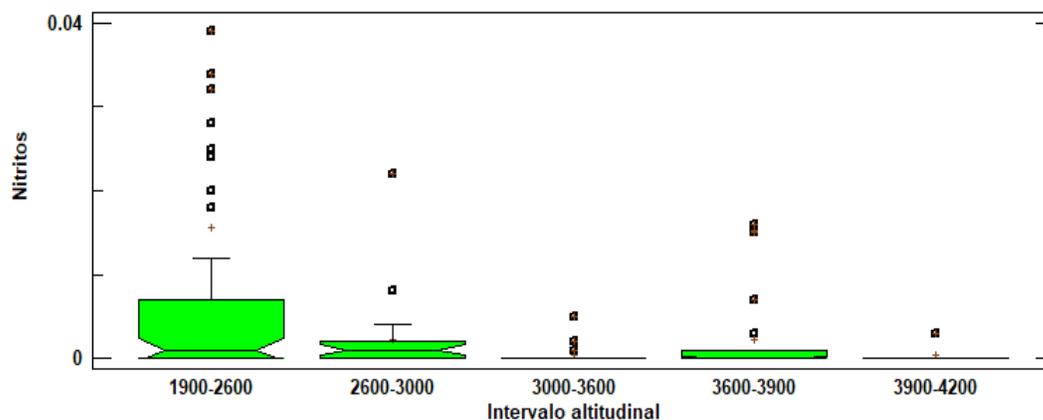


Figura 52. Comparación altitudinal de nitritos en agua

➤ **AMONIO**

Los sitios atípicos corresponden a: San Rafael Tlanalapan II, San Rafael Tlanalapan Rio, Distrito Atoyac-Zahuapan, San Simón Atzitzintla, Rio Alseseca-Calpan y Nealtican para 1900-2600 m s.n.m; Santiago Xalizintla para 2600-3000 m s.n.m; y Buenavista y Apatlaco 1 para 3000-3600 m s.n.m.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

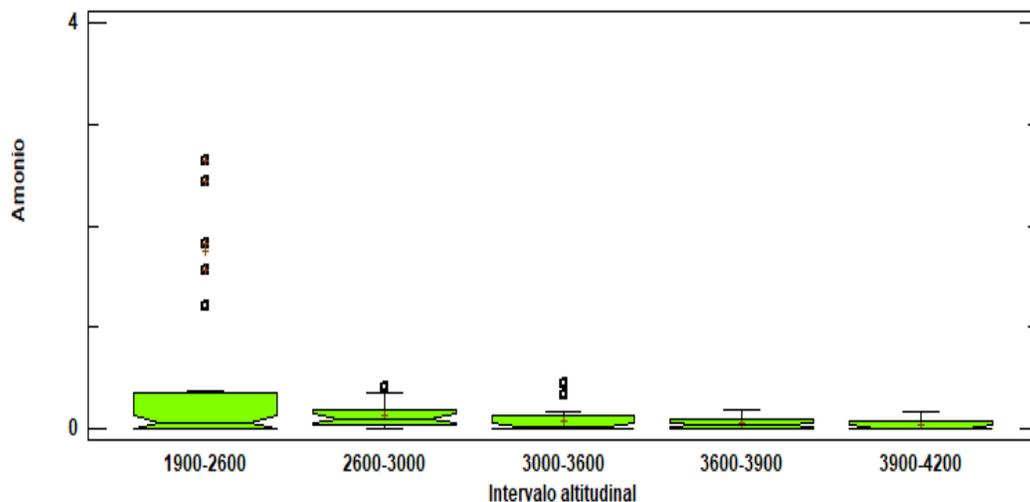


Figura 53. Comparación altitudinal de amonio en agua

➤ **FÓSFORO TOTAL**

Los datos atípicos corresponden a los sitios: Distrito Atoyac-Zahuapan, San Rafael Tlanalapan II y Nealtican para 1900-2600 m s.n.m.

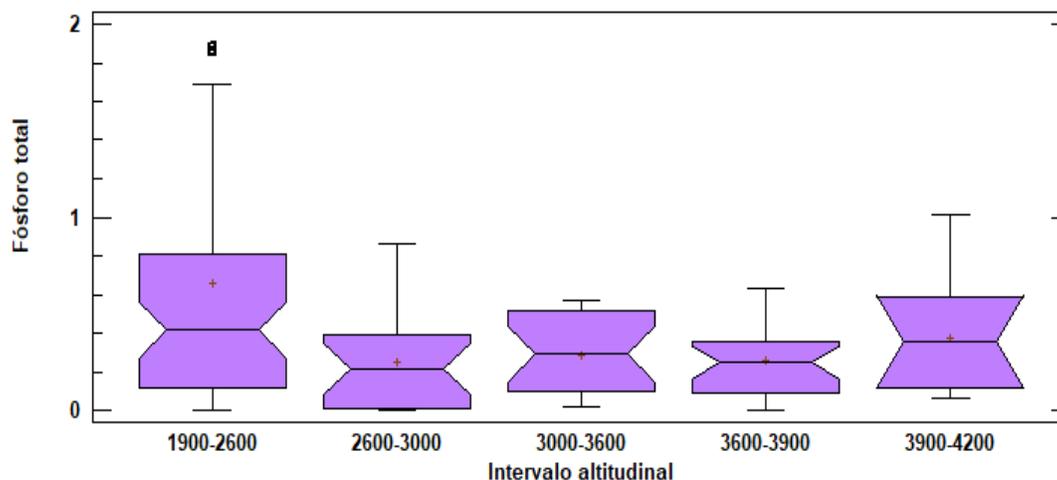


Figura 54. Comparación altitudinal de fósforo total en agua

➤ **ORTOFOSFATOS**

Los datos atípicos corresponden a Distrito Atoyac-Zahuapan, Nealtican, San Rafael Tlanalapan II, Los Molinos y Ex hacienda en el intervalo 1900-2600 m s.n.m; Alseseca, para 2600-3000 m s.n.m; y Vallecito, Apatlaco 1 y El Corral 3600-3900 m s.n.m.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

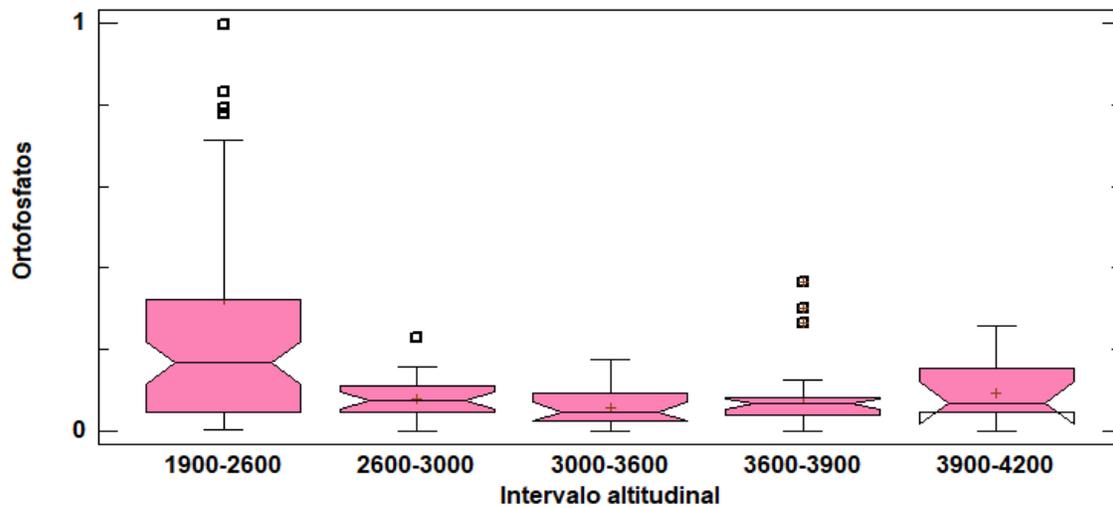


Figura 55. Comparación altitudinal de ortofosfatos en agua

SUELO

➤ *pH*

Los datos atípicos corresponden a los sitios: Calpan-Ameyal en el intervalo altitudinal 1900-2600 m s.n.m; Apatlaco 3 para 2600-3000 m s.n.m; y Vallecito para 3000-3600 m s.n.m.

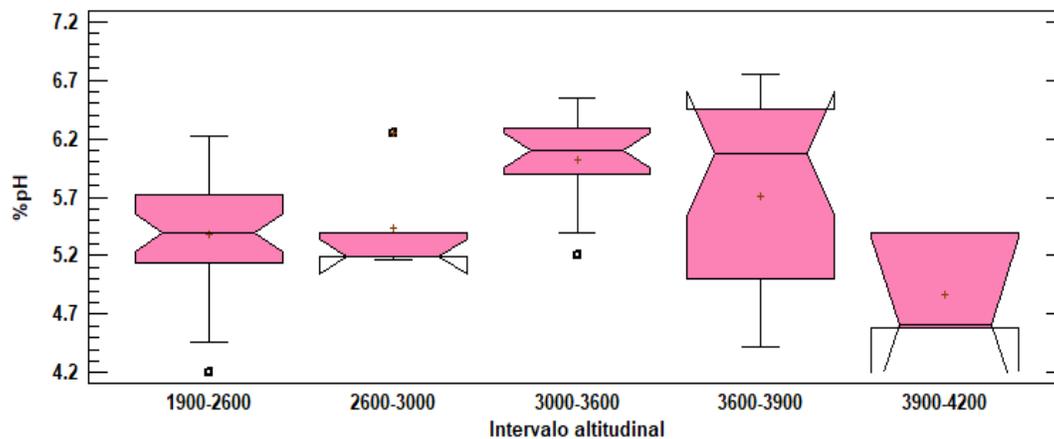


Figura 56. Comparación altitudinal de pH en suelo

➤ *PORCENTAJE HUMEDAD*

El único dato atípico corresponde a Calpan-Ameyal en el intervalo altitudinal 2600-3000 m s.n.m.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

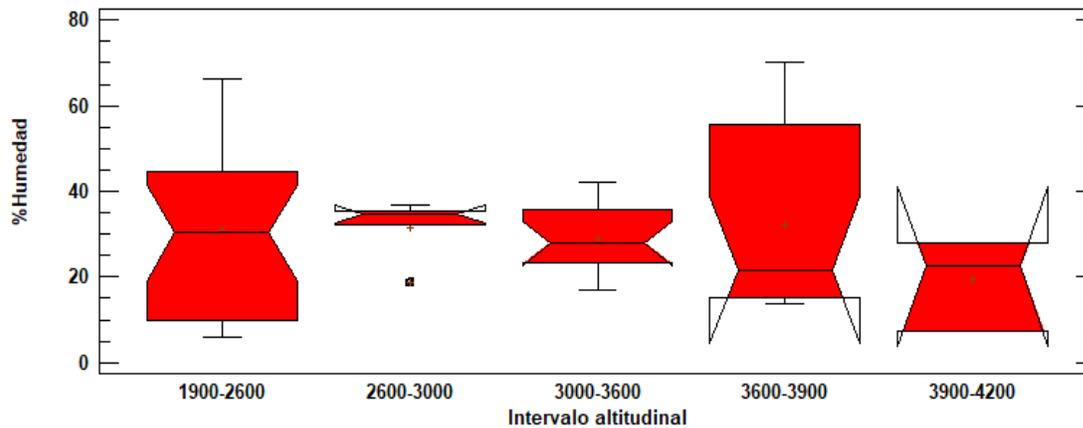


Figura 57. Comparación altitudinal de %humedad en suelo

➤ **PORCENTAJE DE NITRÓGENO**

No existen datos atípicos para nitratos.

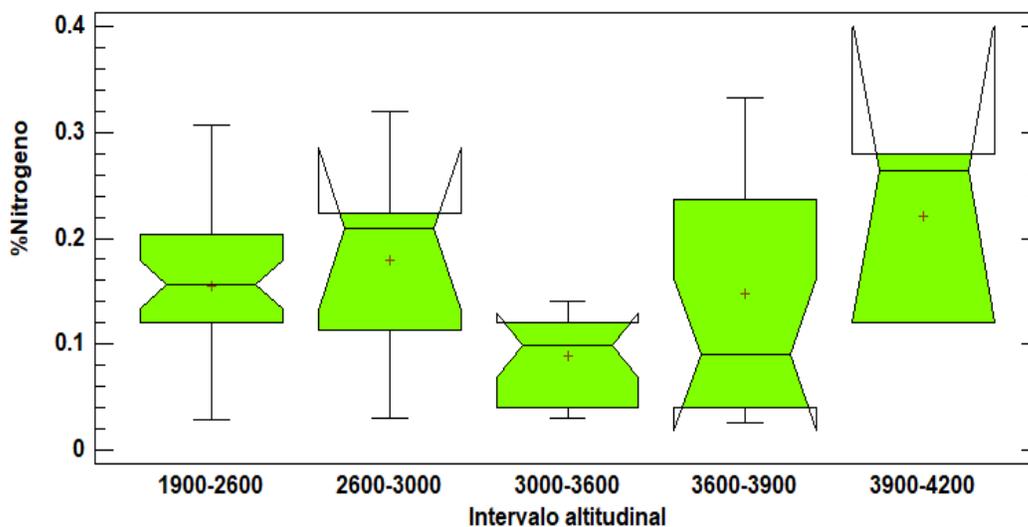


Figura 58. Comparación altitudinal de %nitratos en suelo

➤ **PORCENTAJE DE FÓSFORO**

Los datos atípicos corresponden a los sitios; Vallecito para 1900-2600 m s.n.m y Nealtican para 3600-3900 m s.n.m.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

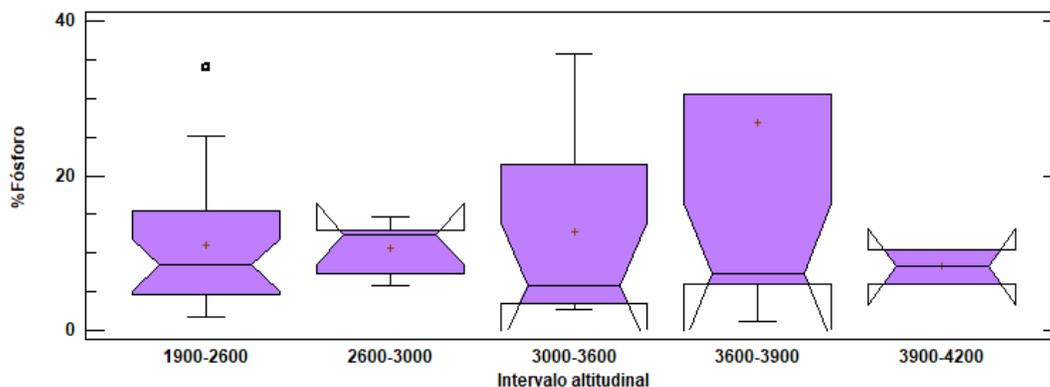


Figura 59. Comparación altitudinal de %fósforo en suelo

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE

Se realizó un análisis de correlación múltiple (CM) con las variables estudiadas, de agua y suelo, para identificar si algunas variables proporcionaban información semejante por existir colinealidad, además de identificar aquellas que presentaban correlaciones significativas. Fueron extraídas las que presentaron un nivel de significancia $p < 0.05$, con coeficiente de correlación $r > 0.3$ y $r > 0.5$, con (Cuadro #7)

Cuadro #5. Análisis de correlación múltiple

	T amb.	T agua	pH	Cond.	Nitratos	Nitritos	Amonio	P T	Ortofosfatos	pH S
T. amb										
T. agua	0.552									
pH		0.3404								
Cond.	0.419	0.696	0.390							
O.D										
Nitratos										
Nitritos		0.3772		0.413						
Amonio					0.462	0.341				
P T					0.5697		0.523			
Ortof.	0.309	0.379		0.422	0.414	0.306	0.474	0.58		
pH S										
%N						0.319				
%P										0.331

Rojo: correlación > 0.5

Azul: correlación > 0.3

En los sistemas lóticos de montaña como era de esperarse se encontró colinealidad entre la temperatura ambiente y la temperatura del agua. Y una correlación alta y significativa entre la temperatura del agua y la conductividad; fósforo total con ortofosfatos y con nitratos; los ortofosfatos con la conductividad, amonio y nitratos.

En el suelo se detectó una colinealidad entre el pH con el %P; %N con nitritos.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

AGUA

El componente térmico se presentó de manera esperada, es decir presentó un aumento conforme desciende el gradiente altitudinal. La temperatura ambiental se mantiene por arriba de la del agua para todos los años.

El valor menor registrado para la temperatura ambiente fue de 5°C y el mayor de 25°C en el periodo de estudio. La altitud está asociada a la existencia de los tipos de climas, por lo que la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68 °C por cada 100 metros (CONANP, 2013).

La temperatura del agua presentó un valor mínimo de 5.7°C y el mayor de 18°C, estos valores son alterados por la insolación del sistema, el gradiente altitudinal, la humedad, hora de muestro, estacionalidad y las actividades que se realizan en el área circundante.

Según Ferreras *et al.*, (1999) la temperatura desempeña un papel fundamental en el ecosistema, porque afecta la solubilidad iónica, solubilidad de gases, densidad, entre otros. La alteración de la temperatura en el agua genera un desequilibrio en el metabolismo del sistema.

Las localidades de Nealtican y Xalizintla corresponden a los sitios atípicos de la temperatura ambiental, están por debajo de los 2500 m s.n.m por lo que presentan una temperatura más alta, consecuencia de la altitud y de las actividades que se realizan en las zonas urbanizadas: minería, agricultura y ganadería.

Los datos atípicos para la temperatura de agua corresponden a los sitios Nealtican, San Pedro Yancuitlapan, Rio Alseseca-Calpan y San Pedro Atlixco entre 1900-2600 m s.n.m, estos cauces presentan basura, escombros y desechos vegetales. Los sitios de 3000-3600 m s.n.m corresponden a Rio Apol, Apatlaco 4 y Buenavista presentaron un promedio de 5.8 a 14 °C. Finalmente la localidad de Vallecito presenta un promedio de 7.0°C. Aquellos cuerpos de agua que presentan temperaturas altas, provocan disminución de oxígeno disuelto, lo que hace a los organismos de vida acuática más vulnerables a residuos tóxicos, parásitos y enfermedades, y favorece procesos de degradación con aumento de eutrofización y toxicidad (Koycheva y Karney, 2009).

El pH del agua presentó variabilidad en todos los años de muestreo, puesto que se tuvieron valores de 5.4 hasta 8.0. Los valores permisibles por la NOM-127-SSA1-1994, para uso y consumo de este recurso deben encontrarse entre 6.5 a 8.5, es decir ligeramente alcalina y neutra. Por lo que los años 2013 y 2014 presentaron valores por debajo de los permisibles.

El pH manifestó una tendencia a disminuir en los años 2007 y 2014 relacionado con sobrecarga orgánica y la presencia de agentes inhibidores o tóxicos en el agua. Las bacterias acidogénicas producen los ácidos grasos volátiles, que no logran ser utilizados por las bacterias metanogénicas, y se origina una acumulación en el sistema, por lo que no logran neutralizarse y ocasionan una rápida disminución en la alcalinidad y el pH (Pérez y Torres, 2008). Sin embargo, para 2005, 2013 y 2019 hubo un aumento en el pH lo cual está relacionado principalmente a la pérdida de vegetación, puesto que esto enriquece la concentración de carbonatos y bicarbonatos en el sistema provocando un aumento del pH.

Lo registrado en este caso coincide con lo mencionado por Pérez (2002), debido a que los valores de pH ácidos y son consecuencia de la influencia humada a través de la deforestación desde las zonas altas, las prácticas de encalado, uso de fertilizantes y compostas, eliminación de basuras urbanas, cambios de uso de suelo, manejo inadecuado de suelo y agua, lo que genera una aceleración los cambios físicos y químicos tanto del pH, así como la salinización, alcalinización y la contaminación.

En la comparación espacial del pH, los sitios atípicos corresponden a Ex hacienda y Manantial Volkswagen, con valores entre 5.79 y 7.2, siendo los más ácidos registrados en la época de lluvias, menores al límite inferior establecido para adecuada vida acuática y consumo (Guerra, 2020).

La conductividad eléctrica aumento hasta 500% al descender en el gradiente altitudinal. El aumento de la conductividad eléctrica en los años 2004 y 2009 se debe a que los sitios presentan desechos fecales, residuos de alimentos, abonos y el uso de los fertilizantes que se aplican en los cultivos de avena, maíz, fresa, zarzamora y cebada. Por otra parte, los años siguientes 2013, 2014 y 2019 la conductividad disminuye, indica que las cantidades de iones que se descargaron en el agua fueron menores, debido a que la cobertura vegetal funcionó como un filtro natural (Soledad, 2013).

Feijóo y colaboradores (1999) sugieren que la conductividad presenta una cierta dependencia altitudinal, consecuencia de la presencia de fuentes de contaminación, y la variación de temperatura. Es decir que existe una mayor presencia de actividades humanas en zonas más bajas y una temperatura más alta, lo que favorece la solubilidad de gran cantidad de sales, aumentando este parámetro.

El incremento constante de la conductividad a través de los años se debe al aumento en la cantidad de sales que llegan al sistema suelo-agua principalmente por la agricultura, ganadería y vertimiento de aguas residuales. De acuerdo con la NOM-069-ECOL-1994 ninguno de los valores excede los límites permisibles.

Los sitios atípicos de la conductividad corresponden a los sitios San Rafael Tlanalapa II, San Rafael Tlanalapa Rio y Tlacotepec para 1900-2600 m s.n.m presentaron una variación de 172 a 664 $\mu\text{S cm}^{-1}$, estos se localizan en zonas donde

se presenta la mayor cantidad de contaminantes por desechos sólidos, plásticos, textiles y vidrio, asimismo la interrupción de los cauces por vías de comunicación. Los sitios para 2600-3000 m s.n.m Rio Apol, Atzompa e instituto (1) presentan concentraciones por arriba de los 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Finalmente, la localidad de Vallecito correspondiente a 3600-3900 m s.n.m presentó un promedio de 31 $\mu\text{S cm}^{-1}$

El oxígeno disuelto en las zonas ribereñas incrementó conforme asciende el gradiente altitudinal, presentando niveles entre 2.6 y 8.9 mg L^{-1} . El aumento en las concentraciones de oxígeno disuelto se debe al movimiento del agua, asociado a las lluvias recurrentes durante la época de muestreo (Barceló *et al.*, 2012), así como a la temperatura, lo que corrobora lo señalado por Wetzel (1981), que las aguas frías tienen mayor capacidad para solubilizar el oxígeno disuelto. Lo cual, se observan en la variación en la concentración de oxígeno en relación con la disminución de la temperatura en los años de muestreo (Figura 21) y coincide con lo que dice Leal (2008), el oxígeno es parcialmente soluble en agua, fenómeno que depende de la altitud y la temperatura, que determinan la concentración de oxígeno en la atmósfera y el agua.

Los datos atípicos de oxígeno disuelto corresponden a los sitios: San Andrés Zacualpan y Apipilolco Chico para 2600-3000 m s.n.m, presentaron bajas concentraciones de oxígeno suelto (3 $\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$). Mientras que los sitios; Buenavista para 3000-3600 m s.n.m; Vallecito, Apatlaco 3 y Apatlaco 1 para 3600-3900 m s.n.m; presentan altas concentraciones (7 $\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$).

El nitrógeno en sus especies químicas nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y amonio (NH_4^+) aumento conforme disminuye el gradiente altitudinal, sin embargo, se presenta en altas concentraciones en las zonas con mayor altitud, consecuencia de las actividades que se realizan en el área circundante a los sitios de muestreo.

En el intervalo 1900-2600 m s.n.m, se presentaron las concentraciones más altas de nitratos (0.1 a 3.6 mg L^{-1}) en coincidencia de zonas con mayor actividad agrícola, urbanas y ganaderas. Sin embargo, ninguna de estas concentraciones rebasa las establecidas por la NOM-127-SSA1-1994. Una de las principales entradas de nitratos es la agricultura, ya que existen cultivos de hortalizas como lo son de cebolla, lechuga, zanahoria, espinaca y coliflor, que acumulan nitratos en sus partes verdes (Greenpeace, 2022). Por lo que, los escurrimientos de las zonas de riego incrementan las concentraciones nitratos, por el lavado de suelos ricos en nitratos y la aplicación excesiva de fertilizantes químicos.

La presencia de nitratos en las zonas altas nos indica la existencia de entradas y salidas de nitrógeno. Las entradas relacionadas con las lluvias, el agua procedente de los sistemas naturales, el uso de fertilizantes y aditivos usados en la acuicultura, agrosilvicultura o agricultura (Boyd, 2015), aguas utilizadas en ganadería que

arrastran estiércol, purines y restos de plaguicidas de origen ganadero, con grandes aportaciones de nitrógeno (Blancas y Hervás, 2001).

Los datos atípicos de nitratos corresponden a los sitios: San Rafael Tlanalapan II, Ex hacienda, San Rafael Tlanalapan, Distrito Atoyac-Zahuapan, Tlacotepec Calpan-Ameyal y San Simón Atzitzintla para 1900-2600 m s.n.m en donde las concentraciones de nitratos rebasan los límites permisibles para consumo, consecuencia de la contaminación severa de los cauces por plásticos, textiles, vidrios y sanitarios, el agua tiene un olor fétido y color oscuro, con espuma evidente por la presencia de jabones. Estos sitios rebasan los 18°C y por consiguiente presentan bajas cantidades de oxígeno disuelto. Los sitios en altitudes más altas presentan menores cantidades de nitratos; como Buenavista (3000-3600 m s.n.m), Apatlaco 1 y Manantial Volkswagen (3600-3900 m s.n.m)

El comportamiento de los nitritos, indica un aumento conforme disminuye el gradiente altitudinal, presentando valores de 0 hasta 0.045 mg L⁻¹. Sin embargo, ninguna de las concentraciones de los sitios de muestreo rebasa las establecidas por la NOM-127-SSA1-1994.

Los niveles altos de nitritos pueden indicar desechos biológicos en las etapas finales de estabilización o escorrentía en campos muy fertilizados.

Los nitritos de forma natural pueden encontrarse en suelos que contengan un pH superior a 7.7, lo que está relacionado con las concentraciones de pH que se obtuvieron en algunos años de muestreo en el sistema edáfico. (Figura 38) (De Miguel-Fernández y Vázquez-Taset, 2006).

Los datos atípicos para nitritos corresponden a los sitios San Rafael Tlanalapa Rio, Coatzingo, Tlacotepec, Los Molinos, Tecuapan II, Atlimeyaya, San Rafael Tlanalapan II, San Simón Atzitzintla, San Felipe Teotlalcingo, Rio Alseseca, Atlimeyaya II en un intervalo de 1900-2600 m s.n.m, con concentraciones muy altas de nitritos, por arriba de 0.024 N-NO₂⁻ L⁻¹, rebasando los límites permisibles para consumo. Los sitios con altitudes entre 3600-4200 m, Instituto (1), Atzompa, Rio Apol, Instituto (2), Apatlaco 1, Apatlaco 2 y Apatlaco 3 presentaron siempre concentraciones menores a 0.007 N-NO₂⁻ L⁻¹.

El amonio presente desde las zonas altas, indica contaminación por fertilizantes y heces, esto da lugar a una alta cantidad de materia orgánica en el agua y no se logra completar el proceso de nitrificación, y se acumula esta especie química, que indica contaminación reciente y peligrosa (Quintero *et al.*, 2010; Sardiñas y Pérez, 2004).

En el intervalo altitudinal 2600-1900 m s.n.m se presentaron los valores más altos de amonio (> 5 mg L⁻¹) debido a que en estos sitios se realizan la mayor cantidad

de actividades antropogénicas. De acuerdo con a la NOM-127-SSA1-2021 para las formas amoniacaes la concentración permitida para uso humano es de 0.5 mg L^{-1} por lo que fueron rebasadas en este intervalo altitudinal en cada uno de los años estudiados.

La mayoría de los sitios de muestreo se encuentran cerca de las localidades urbanas por lo que existen vertidos de uso domésticos directamente hacia el caudal, lo que incrementa las concentraciones de nitrógeno (Bolaños *et al.*, 2017). Al mismo tiempo estas formas químicas son consideradas indicadores indirectos de contaminación fecal (Blancas y Hervás, 2001).

Los datos atípicos de amonio corresponden a los sitios San Rafael Tlanalapan II, San Rafael Tlanalapan Rio, Distrito Atoyac-Zahuapan, San Simón Atzitzintla, Rio Alseseca-Calpan y Nealtican para 1900-2600 m s.n.m, las concentraciones rebasan los límites permisibles para consumo, y aumentan en época de estiaje, estos cauces se encuentran cerca de zonas urbanizadas por lo que reciben grandes descargas, lo que provoca el aumento de las concentraciones de amonio, principalmente por agricultura, ganadería y las vías de comunicación. Sin embargo, localidades como Buenavista y Apatlaco 1 (3000-3600 m s.n.m), con concentraciones mínimas o ausencia de amonio.

El comportamiento del fósforo total nos indica un aumento conforme disminuye el gradiente altitudinal, se observó una similitud en el aumento de las concentraciones para cada uno de los años en todos los intervalos altitudinales. Se presentaron valores de 0 hasta 1.6 mg L^{-1} . Los valores más altos se localizaron en el intervalo altitudinal de 1900-2600 m s.n.m.

Se considera que la entrada puntual de fósforo, son los vertidos de las aguas residuales domésticas las cuales tienen un alto contenido de fosfato por el empleo de detergentes y excreciones humanas (IDEAM, 2004). Asimismo, los vertidos que provienen de las áreas de ecoturismo.

Por otra parte, las entradas no puntuales están relacionadas con la escorrentía de las áreas agrícolas y domésticas. La fracción del fósforo que no es utilizada por las plantas es arrastrada por el agua y algunas cantidades se acumulan en el suelo, lo que permite que cantidades elevadas de fósforo ingresen en ríos y arroyos (Sánchez, 2001).

Los datos atípicos para el fósforo total corresponden a los sitios entre 1900-2600 m s.n.m; Distrito Atoyac-Zahuapan, San Rafael Tlanalapan II y Nealtican son localidades que tienen cantidades de fósforo que sobrepasan los límites permisibles para salud ambiental, agua para uso y consumo humano.

En los cauces se observa espuma, consecuencia de la utilización de jabones en las zonas urbanizadas, y llegan a los ríos y arroyos por las descargas frecuentes.

La concentración más alta para ortofosfatos fue de 0.7 mg L^{-1} se presentó en el primer nivel altitudinal 1900-2600 m s.n.m lo cual se tribuye a las actividades antropogénicas, como lo es la utilización desmedida de detergentes y fertilizantes.

El jabón y los detergentes cambian las concentraciones de los componentes químicos naturales del agua, causando concentraciones anormales, por lo que estas sustancias actúan en el deterioro de los sistemas acuáticos y los organismos asociados a ellos (Cárdenas, 2008).

Los datos atípicos de ortofosfatos corresponden a los sitios Distrito Atoyac-Zahuapan, Nealtican, San Rafael Tlanalapan II, Los Molinos y Ex hacienda para 1900-2600 m s.n.m. Alseseca para 2600-3000 m s.n.m presentó los valores más elevados de ortofosfatos 0.700 a $0.995 \text{ mg P-PO}_4\text{L}$ consecuencia de la presencia de desechos sólidos en el arroyo, así como animales muertos, el agua tiene un olor fétido y color oscuro. La zona de ribereña está afectada por el uso intensivo de pastoreo. Tomando en cuenta además que los cauces son impactados por vías de comunicación y la intervención antrópica en los arroyos o ríos. Los sitios como Vallecito, Apatlaco 1 y El Corral (3600-3900 m s.n.m) tienen cantidades mínimas de ortofosfatos.

SUELO

El pH del suelo presento un amplio intervalo de variación de 4.5 a 6.7, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2001, se consideran suelos fuertemente ácidos (<5), modernamente ácidos (5.1- 6.5) y neutros (>6.6) (SEMARNAT, 2000). Los valores más alcalinos se encontraron en los sitios influenciados por actividades antrópicas, mientras que los más ácidos corresponder a suelos volcánicos.

El pH es considerado como fuertemente ácido, se explica en función del lavado de sales y cationes del perfil, el uso excesivo de fertilizantes, actividades antropogénicas y biológicas (Conti, 2000). Por consiguiente, los suelos modernamente ácidos y neutros son efecto de las descargas agrícolas y domésticas, debido a que favorecen el incremento del pH.

El pH del suelo muestra una variabilidad ascendente, teniendo un promedio para 2014 de 5.58, 2018 de 5.92 y 2019 de 5.98 (cuadro 38), consecuencia del lavado de bases intercambiables por la lluvia y su reemplazo por otros cationes de carácter ácido, la descomposición de la materia orgánica, la oxidación del azufre y la nitrificación del amonio. Asimismo por la adición de los iones nitrato, sulfato y cloruro que proceden de los fertilizantes orgánicos e inorgánicos (Sadeghian, 2016).

Los datos atípicos para pH del suelo corresponden a los sitios: Calpan-Ameyal para 1900-2600 m s.n.m; Apatlaco 3 para 2600-3000 m s.n.m; y Vallecito para 3000-3600 m s.n.m, los cuales se clasifican como suelos fuertemente ácidos, debido a que poseen porcentajes por debajo de 5.0. Estos suelos se clasifican como suelos volcánicos.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

La humedad presentó una variación ascendente a través de los años, con porcentajes de 13.88 a 54.24%. En el año 2018 se hallaron los valores más altos, se atribuye a la cantidad de lluvia anual, la cual fue mayor que a los años anteriores (CONAGUA, 2022).

En los tres años de muestreo se observó una diferencia significativa, consecuencia del cambio de uso de suelo, ya que se modifica la interacción entre las fracciones mineral y orgánica del suelo, por ende, el arreglo estructural de las partículas edáficas.

El único dato atípico para la humedad corresponde a Calpan-Ameyal para 2600-3000 m s.n.m, con cantidades menores a 20%, consecuencia del cambio de uso de suelo.

El porcentaje de nitrógeno presento una disminución en los tres años de muestreo, los procesos de pérdida más importantes son la lixiviación y la desnitrificación, los cuales ocurren en condiciones de exceso de agua en los suelos, lo cual es más probable que ocurra en el período otoño-invierno, especialmente cuando el suelo está en barbecho, ya que no existe un cultivo que pueda remover el NO_3^- . Por otro lado puede ser consecuencia de las fuertes lluvias que se presentaron en los años de muestreo, según CONAGUA se presentó mayor cantidad de lluvia (mm) total acumulada en los años de muestreo, que en los años 2013, 2015, 2016 y 2017.

Las pérdidas en las zonas de muestreo se deben a la asimilación por parte de los cultivos, a la erosión, la lixiviación y a su volatilización, tanto en forma elemental como en forma de óxidos o de amoníaco. Asimismo el cultivo continuo y la cosecha de cereales en las zonas de muestreo, dan como resultado una disminución en el nitrógeno.

De acuerdo con la comparación espacial del porcentaje nitrógeno no se encontraron sitios atípicos.

Las concentraciones de fósforo para los suelos ribereños tienen una tendencia aumentar conforme los años, presentando valores bajos $<15 \text{ mg kg}^{-1}$ hasta altos $>30 \text{ mg kg}^{-1}$.

Los valores más altos se presentaron en el último intervalo altitudinal 2600-1900 m s.n.m, consecuencia de la aplicación de fertilizantes en los cultivos de zarzamora, maíz, fresa. Asimismo, por la entrada de tripolifosfato sódico compuesto perteneciente a los detergentes que se utilizan en las áreas urbanas.

En todos los suelos, y de forma continua, existen considerables entradas y salidas de nitrógeno, acompañadas de muchas transformaciones complejas. Algunos de estos cambios pueden ser controlados por el hombre, mientras que otros se encuentran más allá de su control (Florencia, 2019).

El fósforo es un elemento escaso en muchas rocas que son materiales originales de suelos, de modo que la deficiencia de fósforo es muy común en suelos naturales, por lo que se requiere la aplicación de fertilizantes fosfatados para alcanzar altos niveles de productividad (Fernández, 2011).

De acuerdo con Barber (1980) la temperatura es un factor determinante para la liberación del fósforo en el suelo, ya que el incremento de la temperatura aumenta la difusión del fósforo. Debido a esto, existe más fósforo a mayor temperatura y es fácilmente arrastrado por las aguas del sistema, consecuencia del lavado constante que tienen las orillas de los sistemas ribereños. Lo que tiene relación con el aumento del fósforo en relación con la temperatura que presentan los años de muestreo.

El único dato atípico en el porcentaje fósforo, corresponde a la localidad de Nealtican en los años 2018 y 2019. Corresponde al sitio más bajo altitudinalmente, y se encuentra en zonas urbanizadas, con diferentes actividades antropogénicas como lo son agricultura, ganadería y minería.

Monfil (2020) realizó un estudio donde coloca al sitio de Nealtican como una zona en degradación extrema, debido a que es una zona de fácil acceso, por lo que las actividades antropogénicas son fáciles de desarrollarse.

CONCLUSIONES

AGUA

- El nitrógeno en sus diferentes especies químicas nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y amonio (NH_4^+) aumento conforme disminuye el gradiente altitudinal. El aumento en los años 2005, 2007 y 2014 es resultado de los escurrimientos de las zonas de riego que incrementan las concentraciones por el lavado de suelos ricos en nitrógeno, la aplicación excesiva de fertilizantes químicos y la descarga de aguas residuales.
- Los valores de amonio del 2014 y 2019 sobrepasan los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 salud ambiental, agua para uso y consumo humano, lo que implica un desequilibrio en los ecosistemas por incremento en los procesos de degradación de materia orgánica.
- El fósforo total y los ortofosfatos aumentaron conforme disminuye el gradiente altitudinal. El aumento en los años 2005, 2007 y 2014 se atribuyen al uso desmedido de detergentes y fertilizantes de las zonas medias y bajas.
- Al realizar la comparación espacial y temporal, los sitios que mostraron frecuentemente presencia de valores atípicos fueron Nealtican, San Rafael Tlanalapa II, Atlimeyaya, Apatlaco 1, 2, 3 y 4, Rio Alseseca, Distrito Atoyac-Zahuapan y San Simón Atzitzintla, lo que indica su vulnerabilidad ante los aportes externos.
- El análisis de correlación múltiple indicó colinealidad entre la temperatura ambiente y la temperatura del agua. Y correlación alta y significativa entre la temperatura del agua y la conductividad; así como, fósforo total con nitratos y los ortofosfatos con fósforo total, conductividad, amonio y nitratos.
- Los vertidos domésticos e industriales, las modificaciones al canal, los cultivos y en general las actividades antropogénicas, dan lugar a las mayores problemáticas, de acuerdo a la información analizada.
- El aumento en las concentraciones de nitrógeno y fósforo en los últimos años indican que el sistema se conduce a un proceso de eutrofización que afecta la salud ecosistémica y humana y pone en riesgo el aprovechamiento y disponibilidad del recurso hídrico.

SUELO

- En el sistema edáfico el porcentaje de nitrógeno tienen una tendencia a disminuir a consecuencia de los procesos de lixiviación y desnitrificación que ocurrieron de forma acelerada por el impacto del flujo hídrico en los suelos, generada por lluvias intensivas y abundantes.
- De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2001 los suelos ribereños de las subcuencas Nexapa y Atoyac presentan valores muy bajos de N total (< 0.3 mg).

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

- El porcentaje de fósforo tiene una tendencia a aumentar conforme disminuye el gradiente altitudinal. El aumento en las zonas bajas en los años 2018 y 2019 es el resultado de aplicación de fertilizantes en los cultivos de zarzamora, maíz, fresa, igualmente por la entrada de tripolifosfato sódico compuesto que está presente en los detergentes.
- Los suelos ubicados a altitudes menores a 2600 m, registraron valores altos de fósforo ($>30 \text{ mg kg}^{-1}$).
- La comparación espacial y temporal, los sitios que mostraron frecuentemente presencia de valores atípicos de nitrógeno y fósforo en los suelos fueron San Baltazar Atlimeyaya, San Rafael Tlanalapa, Apatlaco 1, 3 y 4 y Nealtican.
- El análisis de correlación múltiple indicó la alta relación que se presentó entre el pH del agua y el porcentaje de fósforo total, mientras que el porcentaje de Nitrógeno total presentó alta correlación con los nitritos en el agua.
- Los vertidos domésticos e industriales, impactan fuertemente las zonas bajas generando suelos con muy bajos niveles de nitrógeno y altos niveles de fósforo.
- En los suelos de las zonas medias y bajas se genera un desequilibrio nutrimental que afecta el desarrollo de la vegetación natural y de las zonas de cultivo.

REFERENCIAS

- Angelier, E. (2002). *Ecología de las aguas corrientes*. Acribia, Zaragoza, España
- Alcala-Jauregui, J, A., Rodríguez, O, J, C., Hernández, M, A., Villareal, G, F., Cabrera, R, A., Beltrán, M, F y Díaz, F, P, E. (2014). Heavy metal contamination in sediments of a riparian area in San Luis Potosi, Mexico. *Rev. FCA UNCUYO*. 46 (2): 203-221
- Allan, D, J. (2004). Landscapes and riverscapes: The Influence of Land Use on Stream Ecosystems. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2004. 35:257-84
- Alonso, A. y Camargo, J. A. (2005). Estado actual y perspectivas en el empleo de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos como indicadora del estado ecológico de los ecosistemas fluviales españoles. *Ecosistemas*. 14 (3): 87-99
- APHA, (2012). American Public Health Association. Standard methods for examination of water and wastewater.
- APHA, AWWA, WPCF. (1992). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Díaz Santos. España. 9244 pp
- Atlas, R y Bartha, R. (2002). *Microbial Ecology: Fundamentals and applications*. Benjamin Cummings, Redwood City, California, pp 563
- Arshad, M.A y Martín, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 153-160.
- Baldwin, D, S. (2013) Organic phosphorus in the aquatic environment. *Environmental Chemistry*, 10, 436-454
- Barber, S, A. (1980). Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: Khasawneh FE, Sample EC and Kamprath EJ (ed.). *The Role of Phosphorus in Agriculture*, WI: American Society of Agronomy, pp. 591-616
- Barceló, Q, I., López, G, E., Solís, C, H., Domínguez, M y Gómez, S, S. (2012). Water Quality Assessment of Jose Antonio Alzate Dam, the Lerma River and Its Tributaries in the State of Mexico, Mexico. *Journal of Environmental Protection*, 3, 878-888 pp
- Bautista, C, A., Etchevers, B, J., del Castillo, R, F y Gutiérrez, C. (2014). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*. 13 (2): 90-97

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

- Becerra, E, MG. (2018). De Parque Nacional a Reserva de la Biosfera. Historia biocultural de la Sierra Nevada de México. Editorial Académica Española.
- Benton, J. J. Jr. 2003. Agronomic handbook. Management of crops, soils, and their fertility. CRC PRESS. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. USA. 450 pp.
- Blancas, C, C y Hervás, R, M. (2001). Contaminación de las aguas por nitratos y efectos sobre la salud. Consejería de Salud.
- Bolaños-Alfaro, J, D., Cordero-Castro, G y Segura-Araya, G. (2017). Determination of nitrites, nitrates, sulfates and phosphates in drinking water as indicators of contamination caused by human activities, in two cantons of Alajuela, province of Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, Vol 30, N° 4.
- Boyd, C, E. (2015). *Water Quality*. Springer International Publishing.
- Bray, R. y Kurtz, L. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*.59: 39-45
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de ciencias agrícolas*, Vol 33(2): 117-124
- Burgos, L, A., Bocco, G y Sosa, R, J. (2015). Dimensiones sociales en el manejo de cuencas. Primera edición. UNAM
- Calvo, G. (2013). Nueva metodología para valorar la calidad de las aguas superficiales para su uso como clase 2 en Costa Rica. *Tecnología en marcha*. 26 (2): 9-19.
- Castellanos-Navarrete, A., Chocobar-Guerra, A., Cox, R., Fonteyne, S., Govaerts, B., Jaspers, N., Kienle, F., Sauure, K y Verhulst, N. (2013). Contenido de humedad del suelo. Guía útil para comparas las prácticas de manejo de cultivo. CIMMYT
- Cárdenas, C, D, C. (2008). Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales para su reusó en el en el proceso productivo de una industria de jabones. *Ingeniería Ambiental y Sanitaria- Ciencia Unisalle*
- Cárdenas, C, G, L y Sánchez, O, I, A. (2013). Nitrogen in wastewater: origins, effects and removal mechanisms to preserve the environment and public health. *Revista Universidad y Salud*. Vol. 15(1) pp. 72-88
- Ceccon, E. (2003). Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. *Ciencias* 72, 46-53 pp.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

- Celaya-Michel, H y Castellanos-Villegas, A, E. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, vol 29 núm. 3, 343-356 pp
- Cerón, R, L, E y Aristizábal, G, F, A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol XIV.
- Cervantes-Carrillo, F., Pérez, J y Gómez, J. (2000). Avances en la Eliminación Biológica del Nitrógeno de las Aguas Residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 42:73-82
- Chacón, C, M, Y. (2016). Análisis físico y químico de la calidad del agua. Bogotá: Universidad Santo Tomas.
- Chavarría, A., R. (2005). Cuantificación retrospectiva (1993-1999) de la depositación ácida en suelos forestales del desierto de los leones, Izta-popo y Zoquiapan, y determinación multielemental aplicando la técnica de PIXE (Tesis de licenciatura) Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México.
- Chávez, M, J. (2023). Transformaciones de nitrógeno para evaluar el uso potencial de un digesto proveniente de residuos orgánicos municipales como fertilizante. (Tesis maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Contenido de Humedad del suelo. Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. (CIMMYT).
- Cirelli, A, F. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, Vol 11, núm. 3, pp: 147-170
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2004). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. Formulario de propuesta de Reserva de Biosfera UNESCO -Programa el Hombre y la Biosfera (MAB)
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2010). Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. <http://iztapopo.conanp.gob.mx>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2013). Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Programa de Manejo. México, D.F., México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). Programa hídrico visión 2030 del Estado de Morelos. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). (2023). Resúmenes Mensuales de temperaturas y lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Conti, M. (2000). Principios de edafología. 2da. Ed. Facultad de Agronomía, Argentina. pp. 430
- Cordell, D., Rosemarin, A., Schroder, J, J y Smit, A, L (2011). Towars global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere*, 84, 747-758.
- Cortés, G, A, L y Vega, M, K, L. (2013). Variaciones de carbono, nitrógeno y fósforo en sitios con distintos usos de suelo en dos Sistemas Ribereños del Río Amecameca (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM, México.
- Cotler, H. (2010). Las cuencas en México. Diagnóstico y priorización. Pluraria, México,
- Davidson, E, A., David, M, B., James, N, G., Goodale, C, L., Haeuber, R., Harrison, J, A., Howarth, R, W. Jaynes D, B., Lowrance, R, R., Nolan, B, T., Peel, L, J., Pinder, W, R., Porter, E., Snyder, C, S., Townsed, A, R y Ward, M, H. (2012). Exceso de Nitrógeno en el Medio Ambiente de EUA: Tendencias, Riesgos y Soluciones. *The Ecological Society of America*. No. 15
- De La Lanza-Espino, G y Álvarez, A. (1994). Lagunas costeras y el litoral mexicano. 1ª edición. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 72 pp
- De Miguel-Fernández, C y Vázquez-Taset, Y, M. (2006). Origen de los nitratos (NO₃) y nitritos (NO₂) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*, vol 22, núm. 3, pp. 1-9
- Denzin, C., Taboaba, F y Pacheco, V, R. (2017). El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica. Friedrich-Ebert-Stiftung. Ciudad de México, México. 256.
- Doran, J, W y Parkin, B, T. (1994). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2001). Parameters of Water Quality: Interpretation and standards. Environmental Protection Agency, Wexford

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). ¿Qué es el suelo? Consultado el 3 diciembre del 2021. <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- Feijóo, C, S., Giorgi, A., García, M, E y Momo, F. (1999). Temporal and spatial variability in streams of a pampean basin. *Hydrobiologia* 394.
- Fernández, M, T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol XLI, núm. 2.
- Fernández, C, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Revista Química Viva*, vol 11, núm 3.
- Ferreras, L. A., Costa, J. L y García F. O. (1999). Temperatura y contenido hídrico del suelo en superficie durante el cultivo de trigo bajo dos sistemas de labranza. *Facultad de Ciencias Agrarias, Ciencias del suelo* 17 (2):41.
- Florencia, B, A., Plasencia, A., D. Corbella, R., Andina, G, D., Sanzano, A., A. Sosa, F y Fernández, U, J. (2019). El nitrógeno en el suelo. *Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán.*
- Fuentes, W y González, O. (2007). Estimación de la mineralización neta de nitrógeno del suelo en sistemas agroforestales ya pleno sol en el cultivo del café (*Coffea arabica* L.), en el Pacífico de Nicaragua, departamento de Carazo. *Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua.*
- García, V, L y Gallardo, A. (2017). El ciclo global del nitrógeno. Una visión para el ecólogo terrestre. *Ecosistemas*, vol 26, núm. 1, pp. 4-6.
- Garrido, A., Pérez, D, J, L y Enríquez, C. (2010). Delimitación de zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México.
- Giorgi, A y Vilches, C. (2021). Rol de las riberas en los ecosistemas fluviales. *Conservación, manejo y restauración de sistemas fluviales*, 45-60 pp.
- Giuffré, L., Heredia, O, S., Pascale, C., Conti, M y González, M. (2000). Fósforo extractable y Fósforo orgánico lábil como indicadores de calidad de suelos de entre ríos. *Rev. Facultad de Agronomía*, 20 (1): 41-46
- González, L, J y Gonzáles, M, A. (2021). Nitrogen cycle. *Ecology, Biotechnological Applications and Environmental Impacts*. First edition. Boca Raton: CRC PRESS
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M, A y López-Ríos, G, F. (2006). Ecología de las Zonas Ribereñas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 12, núm. 1, 55-69 pp.

- Greenpeace. (2022). Amenaza invisible: la contaminación del agua por nitratos. Greenpeace
- Guerra-Hernández, E, A y Cruz-Flores, G. (2014). Métodos de evaluación y Diagnóstico para agua y suelo. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México.
- Guerra, H, A, E. (2020). Indicadores hídrico-edáficos de calidad para ambientes ribereños de la Reserva de la Biosfera “Los Volcanes” (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, A, J. (2021). Descripción de la variación espacial y temporal del nitrógeno en la cuenca del Rio Usumacinta 2017-2018. (Tesis de licenciatura) Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Holford, I. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plant. Aust. J. Soil Res. 35; 224-239
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2004). Fósforo total en agua por digestión acida, método de ácido ascórbico. Subdirección de Hidrología.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2019). Informe técnico de la cuenca hidrológica Alto Atoyac, humedales. México.
- Jiménez, C, B., Duran, A, J, C y Méndez, C, J, M. (2010). Calidad. El agua en México: cauces y encauces. Academia Mexicana de Ciencias
- Johnston, A, E y Syers, J, K. (2009). A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. Better Crops 93(3):14-15.
- Kalantar-Zadeh, K., Gutekunst, L., Mehrotra, R., Kovesdy, C, P., Bross, R., Shinaberger, C, S., Noori, N., Hirschberg, R., Benner, D., Nissenson, A, R y Kopple J, D. (2010). Understanding sources of dietary phosphorus in the treatment of patients with chronic kidney disease. Clin J Am Soc Nephrol 5(3):519-530.
- 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: 4-10.
- Koycheva, J y Karney, B. (2009). Stream Water temperature and climate change- An ecological perspective. International Symposium on Water management and Hydraulic Engineering. Macedonia. 771-777 pp
- Landa, R., Magaña, V y Neri, C. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Larios, L. (2009). Contaminación del agua por nitratos: significación sanitaria. AMC. 13 (2)
- Leal, A. M. T. (2008). Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático y su impacto en la biodiversidad, agricultura, salud, turismo e industria, Instituto Mexicano de tecnología del agua
- Lestayo, G, J, A. (2021). La deposición atmosférica húmeda como fuente de nitrógeno inorgánico disuelto en la zona costera de Cayo Coco, Cuba, en el periodo 2005-2017 (Tesis de maestría). Posgrado en Cuencas del Mar y Limnología. UNAM
- Likens, G. E. (2010). Biogeochemistry of inland waters. Academic Press
- Lobón, Z, M. (2018). Evaluación de los servicios ecosistémicos de la Cuenca hidrográfica del Río Barbate. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz.
- López, P, M de las nieves (2019). Determinación de fosfato mediante análisis por inyección de flujo. Trabajo de grado. Departamento de Ingeniería Química Industrial y Medio Ambiente
- Martínez, C, J, F. (2009). Contenido foliar de N, P, CA, MG Y K en especies arbóreas de bosques templados y cálidos del suelo de La Sierra de Manantlán y La Sierra Juárez (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, F, I y Saracho, R. (2009). El fósforo y sus implicaciones clínicas. Nefrología. Vol. 29. Núm. 5.
- Monfil, H. L. 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.
- Morales, B y Chávez, G. (2010). Estimación de la carga de nutrientes procedentes de la cuenca de drenaje superficial del río Tepenaguasapa. 23 (1): 18-26
- Morales, V, J, A. (2018). Evaluación de la condición ecológica del Rio Nexapa en la subcuenca Chietla, Puebla, México. Institutito de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Moreno, F, D, P., Quintero, M, Y y López, C, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. Universidad Autónoma Metropolitana.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

- Morales, B., Rodríguez, T. J. A y Torres, A, L. (2015). Modelo de contaminación del Rio Atoyac e incidencia de enfermedades en la región Puebla-Tlaxcala. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco. 2º Congreso Nacional AMICA.
- Naiman, R, J., Decamps, H., Pollock, M. (1993). The role riparian corridors in maintaining regional biodiversity. Ecological applications, Vol. 3, No. 3. Pp. 209-212.
- Naiman, R. y H. Décamps y M. McClain. (2010). Riparia: Ecology, Conservation and Management of Streamside Communities. Elsevier Academic Press. 440 p
- Navarro, A., Herrera, J., Caso, L y Marrugo, J. (2013). Calidad del agua del rio Nexapa: Tendencias espacio- temporales y sus implicaciones. Ciencias Naturales y Exactas. Handbook. 83-97.
- Navarro A.E., J.A. Herrera y J.M. Bayona. (2006). Determinación de alquibencenos lineales y alquilfenoles en aguas naturales y residuales en la subcuenca del río Nexapa. Memorias del V Congreso Internacional y XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, CAO-18, Primera edición, UAEM.
- NMX-AA-029-SCFI-2001. Que establece la determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NOM-AA-012-SCFL-2011. Que establece dos métodos de prueba para la determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales utilizando las técnicas de azida modificada y la electrométrica.
- NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-020-SEMARNAT-2001. Que establece los procedimientos y lineamientos que se deberán observar para la rehabilitación, mejoramiento y conservación de los terrenos forestales de pastoreo.
- NOM-021-SEMARNAT-2001. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- NOM-069-ECOL-1994. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de componentes eléctricos y electrónicos.

- Odum, E. 1987. Ecología. Tercera edición. Editorial Interamericana. México D.F.
- Oldeman, L, R. (1998). Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, pp 84
- Otegui, O., Zamalvide, J., Perdomo, C., Goyenola, R y Cerveñanasky, A. (2002). Momento de aplicación de nitrógeno: efecto en eficiencia de uso del fertilizante, rendimiento y concentración proteica en grano de cebada cervecera en Uruguay. Terra 20: 71-80
- Pacheco, A, J y Cabrera, S, A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. Ingeniería, vol 7, núm. 2. MÉRIDA México
- Pacheco, A, J., Pat, C, R y Cabrera, S, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. Ingeniería, vol. 5, núm. 3. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México.
- Páez, F., Ramírez, G., Ruíz, A., Soto, M. 2007. La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo. Serie Lagunas Costeras de Sinaloa. Primera edición. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. Mazatlán, México
- Peña, P, E. (2007). Calidad de Agua. Trabajo de investigación. Oxígeno disuelto (OD). Escuela Superior Politécnica. Ingeniera en Auditoría y Control de Gestión. Pérez, Z. O. (2002). Efecto de la aplicación de aguas residuales industriales en las propiedades físicas y químicas del suelo. Agrociencia, Vol 26, núm. 3. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30236302.pdf>
- Pérez, A y Torres, P. (2008). Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales acidificables. Ingeniería y Competitividad, vol. 10, núm. 2.
- Plaster, E. (2000). La ciencia del suelo y su manejo. Editorial Paraninfo. Madrid 419 pp.
- Poffenbarger, H, J., Sawyer, J, E., Barker, D, W., Olk, D, C., Six, J y Castellano, M, J. (2018). Legacy effects of long-term nitrogen fertilizer application on the face of nitrogen fertilizer inputs on continuous maize. Agriculture, Ecosystems & Environment. Vol. 265. Pp. 544-555

- Quintero, L., Agudelo, E., Quintara, Y., Cardona, S y Osorio, A. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. *Rev. Gestión y Ambiente*. 13 (3): 51-64.
- Ramakrishna, B. (1997). Estrategias de extensión para el Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas: Concepto y Experiencias. San José, IICAGTZ.
- Raes, L., Meza Prado, K., Nájera, M., Hawthorne, P., León Saborío, J., Chacón, Ó., Vogl, A., Sanchún, A. (2022). Atendiendo a compromisos globales y necesidades hídricas locales: Priorización de áreas de restauración en Costa Rica con la herramienta de optimización de oportunidades de restauración. Gland, Suiza: UICN
- Redfield, A, C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment: *American Scientist*, 46, 205-221
- Rivas, Z., Sánchez, J., Troncón, F., Márquez, R., Ledo, H., Colina, M y Gutiérrez, E. (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los Ríos Tributarios al Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia* 34(5): 308-314.
- Rodríguez, J.G. y J. Palerm. (2003). La Organización Social de los regantes en el río Nexapa, Estado de Puebla. En *Agua, medio ambiente y desarrollo en el siglo XXI. El colegio de Michoacán*, secretaria de Urbanismo y Medio Ambiente, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 476 pp.
- Rojas, M.J., Florencia, R.M y Guevara, G. (2012). Densidad aparente: comparación de métodos de determinación en ensayo de rotaciones de siembra directa. INTA. Centro Regional Chalco Formosa. Estación experimental agropecuaria Sáenz Peña. Argentina.
- Sabo, L, J., Sponseller, R., Dixon, M., Gade, K., Harms, T., Heffernan, J., Jani, A., Katz, G., Soykan, C., Watts, J y Welter, J. (2005). Riparian zones increase regional species richness by harboring different, not more, species. *Ecology*, 86 (1), pp. 56-62
- Sacristán, R, A. (2020). Evaluación Temporal de la carga de fósforo y su balance de masas en el embalse Valle de Bravo: un sistema eutrófico y con variaciones importantes de nivel de agua debido al impacto antrópico (Tesis de maestría) Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM.
- Sadeghian, K, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. Centro Nacional de Investigadores de Café, Manizales, Caldas, Colombia.

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

- Salazar, G, M. (2022). Fósforo inorgánico en el sistema lagunar Costero Grande, Veracruz (2018-2019) (Tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM.
- Sánchez, F, J. (2001). El fósforo, parámetro crítico de calidad de agua técnicas analíticas y muestreo. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambeital, ABES.
- Sardiñas, P, O y Pérez, C, A. (2004) Determinación de nitrógeno amoniacal y total en aguas de consumo y residuales por el método del fenato. Rev cubana Hig Epidemiol, vol. 42 núm.2
- Sarmiento, E., Fandiño, S y Gómez, L. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. Ecosistemas 27 (3): 130-139
- Sedeghian, K, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, Manizales, Caldas, Colombia.
- Segnini, S., y Chacón, M. M. (2005). Caracterización fisicoquímica del hábitat interno y ribereño de ríos andinos en la Cordillera de Mérida, Venezuela. Ecotropicos, 18(1), 38-61.
- SEMARNAT. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.
- SEMARNAT. (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México.
- SEMARNAT. (2022). Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2013. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/mce_index.html
- Severiche-Sierra, C y González-García, H. (2012). Determinación de Fosfatos en Aguas por Método Colorimétrico. Validación del Método. Chemistry Sciences. Vol. 2, N° 3.
- Soledad, P.A. (2013). Comportamiento nutrimental del sistema agua-suelo en la zona occidental del Parque Nacional Izta-Popo. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
- Soledad, E, A., Chimmer, R, A y Cremona, M, V. (2014). Long-term grazing negatively affects nitrogen dynamics in Northern Patagonian wet meadows. Journal of Arid Environments, Vol 109, 1-5

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA

- Sotelo, R, E, D., González, H, A., Cruz, B, G., Moreno, S, S y Cruz, G, C. (2011). Los suelos del Estado de México y su Actualización a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2006. Revista Mexicana de Ciencias Forestales vol 2, no. 8.
- SQI-Soil Quality Institute. (1996). Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA / The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Steinman, D, A y Spears M, B. (2020) Internal Phosphorus Loading in Lakes: Causes, Case Studies, and Management. Ross Publishing
- Sumner, M. E. (2000). Handbook of Soil Science. CRC Press. USA
- Sutton, M, A. (2011). The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge Univ. Press
- Teixeira, C, G., Sanchez, O, I, A., Gebara, D., Dall', A, S, M., Matsumoto, T. (2013). Remoción de fósforo de diferentes aguas residuales en reactores aeróbios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, núm. 67
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R y Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature, 418(6898): 671–677.
- Torres, P., Hernán, C, C y Patiño, P, J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. Revista Ingenierías. Universidad del Medellín, vol 8, No. 1579.94
- UNESCO-WWAR (2017). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2017: Aguas residuales: el recurso desaprovechado.
- Vásquez, V, A., Mejía, M, A., Faustino, M, J., Terán, A, R., Vásquez, R, I., Díaz, r, j., Vásquez, R, C., Castro, A, A., Tapia, M, A y Alcántara, R, J. (2016). Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas. Lima. Fondo editorial-UNALM: 646
- Villanueva M.J. 2008. Microcuenca. Universidad Autónoma Chapingo. México, México. Pp: 222
- Vitousek, P. M., y Denslow, J. S. (1986). Nitrogen and phosphorus availability in treefall gaps of a lowland tropical rainforest. The Journal of Ecology, 1167-1178

**COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AMBIENTES RIBEREÑOS
DE LA SUBCUENCAS NEXAPA Y ATOYAC, PUEBLA**

- Wetzel, R, G. (1975). Limnology. W. B. Saunders Company, Philadelphia. Wetzel, R. G. (1981). Limnología. Editorial Omega. España.
- Wetzel, R, G. y Likens, G, E. (2000). Limnological Analyses. Third Edition. Springer
- Yousuf, A y Singh, M. (2019). Watershed Hydrology, Management and Modeling. 1st Edition. Boca Raton.
- Yuan, Z., Jiang, S., Sheng, H., Liu, X., Hua, H., Liu, X. y Zhang, Y. (2018). Human Perturbation of the Global Phosphorus Cycle: Changes and Consequences. Environmental Science & Technology, 52: 2438–2450.

“HAS ESCUCHADO QUE LA FE MUEVE MONTAÑAS, PUES ESTOY SEGURO
QUE TÚ ERES FE, PERO DEJANDO A LADO ESA CREENCIA; ANDREA
PODRÍA NO MOVER SINO ESCALAR ESA MONTAÑA, NAVEGAR SOBRE
BALLENAS, NADAR COMO SIRENA, PERO COMO NO PRACTICO NINGUNA
CREENCIA, PARA MI ANDREA ES MAGIA”

O.M. A