INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

GRADO DE EUTROFIA Y RIESGO AMBIENTAL POR EXPORTACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA, TABASCO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

YAZIA PAMELA AGÜEROS CRUZ

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA

CODIRECTOR DE TESIS:

DRA. CINTHYA ALEJANDRA SOSA VILLALOBOS

ASESOR DE TESIS:

DR. SALVADOR PARTIDA SEDAS

JUNIO, 2020 **BOCA DEL RÍO, VERACRUZ**

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: A-0702-130818

En la ciudad de Boca del Rio, Ver., siendo las 12:00 horas del día 8 del mes de mayo de 2020 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

"GRADO DE EUTROFIA Y RIESGO AMBIENTAL POR EXPORTACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA, TABASCO"

Que presenta el (la) alumno(a):

YAZIA PAMELA AGÜEROS CRUZ
Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:

Dra. Itzel Galaviz Villa
Director

Dra. Cinthya Ale[illegible]r. Sosa Villalobos
Co-[illegible]tor

Dr. Salvador Partida Sedas
Asesor

Dra. Paula Zúñiga Ruiz
Asesor

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Boca del Rio, Ver 03/junio/2020

ASUNTO: **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

YAZIA PAMELA AGÜEROS CRUZ
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

"GRADO DE EUTROFIA Y RIESGO AMBIENTAL POR EXPORTACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA, TABASCO"

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos

EDUCACIÓN
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

M.C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFA DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB
c.c.p. Expediente

RESUMEN

El arrastre del fósforo disuelto en las escorrentías de suelos agropecuarios modifica la concentración de nutrientes disueltos en aguas superficiales. El objetivo de esta investigación fue determinar zonas de riesgo ambiental a partir de la exportación de fósforo en escorrentías agropecuarias hacia aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta. Los sitios de muestreo se establecieron en tres municipios del estado de Tabasco; Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta. Las muestras de escorrentías superficiales fueron colectadas durante la temporada de lluvias. Las concentraciones de PT en escorrentía superficial en temporada de lluvia oscilaron entre los valores mínimos de 0.02, 0.67 y 0.61 mg L^{-1} en Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta, respectivamente. Emiliano Zapata presenta la concentración media máxima de 2.62 mg L^{-1} de fósforo total; y Tenosique registro la concentración media mínima de 0.39 mg L^{-1}. La exportación de fósforo total (PT) por escorrentía superficial en temporada de lluvias osciló entre 0.54 y 23.91 mg m^{-2} mes^{-1} en Tenosique; 0.02 y 6.64 mg m^{-2} mes^{-1} en Emiliano Zapata; y entre 6.42 y 72.25 mg m^{-2} mes^{-1} en Jonuta. Se ejecutaron herramientas de geoestadística para identificar zonas de exportación de PT alta y muy alta que evidencian un riesgo ambiental. La exportación de fósforo aumenta conforme desciende la pendiente del cauce principal de la cuenca. Se aprecian diferencias entre las zonas con mayor Exp-PT. Emiliano Zapata presenta exportación “Alta” y “Media” a pesar de tener menor caudal. En Tenosique existe caudal inferior, lo cual permite inferir que existen múltiples factores que inciden en la Exp-PT a nivel de cuenca. La mayor concentración media de Exp-PT se produjo en Jonuta, que pone en manifiesto un riesgo de erosión mayor. Ocurre un desplazamiento de las partículas de arcilla y limo que ocupan los poros del suelo provocando su oclusión. La exportación mensual de PT puede ser un factor que propicie el aumento de la concentración de este nutriente en aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta. Las concentraciones de PT son consideradas un riesgo ambiental al rebasar los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) para la protección de la vida acuática en ríos y arroyos.

ABSTRACT

The drag of dissolved phosphorus into agricultural soil runoff changes the concentration of dissolved nutrients in surface water. The objective of this research was to identify environmental risk areas from the export of phosphorus in agricultural runoff to surface waters in the lower basin of the Usumacinta river. Sampling sites were established in three municipalities in Tabasco state; Tenosique, Emiliano Zapata and Jonuta. Surface runoff samples were collected during the rainy season. PT concentrations in surface runoff in the rainy season ranged from the minimum values of 0.02, 0.67 and 0.61 mg L^{-1} in Tenosique, Emiliano Zapata and Jonuta, respectively. Emiliano Zapata has the maximum mean concentration of 2.62 mg L^{-1} of total phosphorus; and Tenosique recorded the minimum mean concentration of 0.39 mg L^{-1}. The export of total phosphorus (PT) by surface runoff in the rainy season ranged from 0.54 to 23.91 mg m^{-2} $month^{-1}$ in Tenosique; 0.02 and 6.64 mg m^{-2} $month^{-1}$ in Emiliano Zapata; and between 6.42 and 72.25 mg m^{-2} $month^{-1}$ in Jonuta. Geostatistics tools were run to identify high and very high PT export areas that demonstrate an environmental risk. The export of phosphorus increases as the slope of the main riverbed of the basin descends. Differences are seen between areas with higher Exp-PT. Emiliano Zapata presents export "High" and "Medium" despite having lower flow. In Tenosique there is lower flow, which allows to infer that there are multiple factors that affect the Exp-PT at the basin level. The higher average concentration of Exp-PT occurred in Jonuta, which shows a higher risk of erosion. A displacement of clay and silt particles occupying the pores of the soil occurs causing their occlusion. Monthly PT export may be a factor that promotes increased concentration of this nutrient in surface waters in the lower basin of the Usumacinta river. PT concentrations are considered an environmental risk when oversteering the Ecological Water Quality Criteria (CE-CCA-001/89) for the protection of aquatic life in rivers and streams.

Dedicatorias

A mis padres y hermana por creer en mí, por su apoyo y cariño incondicional al embarcarme en esta travesía de ciencia y de vida.

A mi sobrina por ser la inspiración a ser mejor cada día.

A Ana, por compartir innumerables experiencias y ser mi compañera en esta aventura.

Agradecimientos

En especial, a la Dra. Itzel Galaviz Villa por la oportunidad de ser partícipe de su equipo de trabajo, por el tiempo, apoyo y confianza que me motivaron a culminar este trabajo. Sobre todo, por compartir siempre sus conocimientos y convertirse en la guía que me ayudo a crecer profesionalmente.

Al Dr. Salvador Partida Sedas por su asesoría y paciencia en el desarrollo de esta tesis y contribuir en mi formación profesional.

A la Dra. Magnolia que me motivo a tomar el camino correcto, por confiar en mí y por animarme siempre a encontrar la respuesta.

A todos los profesores del posgrado por el conocimiento y las herramientas brindadas en mi formación profesional.

Al Team Usumacinta, a Ivette, Lupita y Noemi porque hicieron que todas las horas de trabajo fueron amenas y cada reunión se convirtiera en aprendizaje.

A Toño, que, sin importar el lugar, día u hora, siempre estuvo apoyándome.

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado al proyecto 2014-248265 “Evaluación del efecto de las fuentes difusas de contaminación en la calidad del agua del Río Usumacinta, en el estado de Tabasco. Al Instituto Tecnológico Superior de Huatusco y al Instituto Tecnológico de Boca del Río, por las facilidades prestadas durante la realización del mismo.

Contenido

1.INTRODUCCIÓN 1
2.MARCO TEÓRICO 2
2.1 Cuenca hidrográfica 2
2.2 Tipos de abastecimiento de agua 2
2.3 Clasificación de contaminantes 3
2.3.1 *Microbiológicos* 3
2.3.2 *Fisicoquímicos* 3
2.4 Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi) 4
2.5 Dinámica del fósforo 4
2.6 Fertilizantes fosfatados 6
2.7 Efectos del uso excesivo de fertilizantes en el suelo 7
2.8 Comportamiento del P por tipo de suelo 7
2.9 Erosión hídrica y escorrentía superficial 8
2.10 Exportación de fósforo 9
2.11 Riesgo ambiental por exportación de fósforo hacia aguas superficiales 11
2.12 Uso de suelo y vegetación 14
2.13 Actividades productivas del área de estudio 15
2.14 Edafología 15
2.15 Relieve 16
2.16 Sistemas de Información Geográfica (SIG) 18
3.JUSTIFICACIÓN 20
4.HIPÓTESIS 22
5.OBJETIVOS 22
5.1 Objetivo General 22
5.2 Objetivos específicos 22
6.MATERIALES Y MÉTODOS 23
6.1 Área de estudio 23
6.2 Sitios de muestreo 30
6.3 Toma de muestras 30

6.5 Exportación de fósforo 32
6.6 Índice de estado trófico 33
6.7 Análisis estadístico..... 34
6.8 Zonas de riesgo 34
7. RESULTADOS..... 37
7.1 Concentración de fósforo total en las escorrentías de las zonas agropecuarias 37
7.2 Exportación de fósforo total de las escorrentías hacia aguas superficiales 37
7.3 Índice de eutrofización del agua superficial..... 38
7.4 Zonas de riesgo ambiental por Exp-PT..... 39
8. DISCUSIÓN 41
8.1 Concentración de fósforo total en las escorrentías de las zonas agropecuarias 41
8.2 Exportación de fósforo total de las escorrentías hacia aguas superficiales 42
8.3 Índice de eutrofización en agua superficial 43
8.4 Zonas de riesgo ambiental por Exp-PT..... 43
9. CONCLUSIONES 45
10. ALTERNATIVAS DE CONTROL..... 46
LITERATURA CITADA..... 49
ANEXOS 54

Índice de Figuras

Figura 1. Transporte y pérdida de fósforo de las tierras agropecuarias a las aguas superficiales (Modificado de Sharpley *et al.*, 2001). 9
Figura 2. Área de estudio en la cuenca baja del río Usumacinta en el estado de Tabasco. 24
Figura 3. Tipos de climas en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab. 25
Figura 4. Edafología de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco. 26
Figura 5. Tipo de uso de suelo presente en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab. 28
Figura 6. Relieve presente en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab. 30
Figura 7. Ubicación de los sitios de muestreo en la cuenca baja del río Usumacinta en el estado de Tabasco. 32
Figura 8. Mapa temático de la distribución espacial de la exportación de fósforo total (PT) en escorrentías superficiales en el área de estudio. 38
Figura 9. Variabilidad de los valores del Índice de Eutrofización (IE) para fósforo. 39
Figura 10. Identificación de zonas de riesgo ambiental por exportación de fósforo total (PT) en escorrentías agropecuarias. 40

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Interpretación de riesgo ambiental por fósforo. 12
Cuadro 2. Grupos de información de Uso de suelo y Vegetación. 14
Cuadro 3. Características de los diferentes tipos de suelo. 17
Cuadro 4. Temperatura y precipitación promedio en el área de estudio. 23
Cuadro 5. Tipos de suelo en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab. 26
Cuadro 6. Tipos de uso de suelo en la cuenca baja del río Usumacinta. 28
Cuadro 7. Tipo y uso de suelo en los sitios de muestreo de escorrentías superficiales. 31
Cuadro 8. Valores del estado de eutrofia. 34
Cuadro 9. Grupos de usos de suelo modificado. 35
Cuadro 10. Clasificación de los tipos de riesgo ambiental. 35
Cuadro 11. Ponderaciones para cada variable. 36
Cuadro 12. Simbología de mapas de riesgo. 36
Cuadro 13. Variabilidad de las concentraciones de fósforo total en escorrentías en temporada de lluvias. 37
Cuadro 14. Variabilidad de la exportación de fósforo total por escorrentías en temporada de lluvias. 37
Cuadro 16. Variabilidad de la exportación de fósforo total en pastizal cultivado por municipio. 42
Cuadro 17. Índice de eutrofización a partir de la exportación de fósforo total. 43

Índice de Anexos

Anexo 1. Río Usumacinta en municipio de Jonuta, Tab. 54
Anexo 2. Instalación de dispositivo Storm Water Sampler. 55
Anexo 3. Ráster de la pendiente en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab. 55
Anexo 4. Ráster de Uso de suelo y Vegetación de la cuenca baja del Río Usumacinta, Tab. 56
Anexo 5. Ráster de la Exportación de fósforo total PT en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab. 57
Anexo 6. Ráster de proximidad al río Usumacinta, Tab. 58
Anexo 7. NMX-AA-029-SCFI-2001 59

1. INTRODUCCIÓN

Una cuenca hidrográfica es una extensión territorial que se encuentra delimitada por las partes más altas de las montañas, donde se concentran los escurrimientos, ríos y arroyos originados por las precipitaciones, que confluyen y desembocan en un punto común, que puede ser un lago o el mar. Estas permiten cuantificar e identificar los impactos ambientales producto de las actividades antropogénicas sobre la calidad del agua y de los sedimentos en el ecosistema; y de la calidad de vida de sus habitantes a lo largo de la red hídrica (Cotler *et al.*, 2013). Los cambios de uso de suelo a escala de cuenca, particularmente en el caso de cuencas agrícolas, generan efectos indirectos a través de la alteración de los flujos hídricos y de nutrientes (Martínez *et al.*, 2013). Concentraciones elevadas de fósforo en aguas continentales superficiales lo convierten en el factor responsable de la eutrofización. La eutrofización en ecosistemas acuáticos representa actualmente uno de los principales problemas que afectan a la calidad del agua, por lo que existe necesidad de la aplicación de modelos simples de eutrofización que traten de predecir el incremento de la concentración de fósforo en cuerpos de agua a partir de descargas externas (Vicente y Cruz, 2003).

En una cuenca, la dinámica de nutrientes puede ser un indicador del nivel de alteración antropogénica. El ingreso y exportación de los mismos proporciona información acerca de perturbaciones en el ambiente y cambios del uso del suelo (Palacios, 2017).

En esta investigación se determinaron zonas de riesgo ambiental a partir de la exportación de fósforo en escorrentías agropecuarias hacia aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta. Se ejecutaron herramientas de geoestadística para identificar zonas de exportación de PT alta y muy alta que evidencian un riesgo ambiental. Integrar un análisis multicriterio coadyuva a establecer zonas de riesgo ambiental a nivel de cuenca.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una extensión territorial que se encuentra delimitada por las partes más altas de las montañas, donde se concentran todos los escurrimientos, como ríos y arroyos originados por las precipitaciones, que confluyen y desembocan en un punto común, que puede ser un lago o el mar. Las cuencas se delimitan a partir de las curvas de nivel del territorio. De acuerdo a la dinámica hidrológica, una cuenca se puede dividir en tres zonas: 1) Zona de captación, cabecera o cuenca alta. Áreas aledañas al límite de la cuenca, localizada en la parte más elevada de la cuenca, en esta zona se ubican los primeros escurrimientos. 2) Zona de almacenamiento, transición o cuenca media. Zona entre la cuenca alta y cuenca baja, los escurrimientos iniciales confluyen y aportan diversos caudales que aportan sedimentos, contaminantes y materia orgánica, es un área de transporte y erosión. 3) Zona de descarga, emisión o cuenca baja. Sitio donde el río principal desemboca en el mar o en un lago, es muy productiva para el uso agrícola y se acumulan los impactos de toda la cuenca (Cotler *et al.*, 2013).

En México se han definido 757 cuencas hidrológicas y se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas. Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros, destacan 51 ríos principales y las cuencas abarcan 65 % de la superficie territorial (CONAGUA, 2017).

2.2 Tipos de abastecimiento de agua

De acuerdo con su origen, los suministros de agua se clasifican en tres categorías (Ramalho, 1996):

1) Aguas superficiales, que incluyen cauces, océanos, lagos y aguas embalsadas.

2) Aguas subterráneas, las que se encuentran por debajo de la corteza terrestre.

3) Aguas meteorológicas, que provienen de las precipitaciones.

2.3 Clasificación de contaminantes

Los contaminantes del agua se clasifican en tres categorías: químicos, físicos y biológicos. Los contaminantes químicos incluyen compuestos orgánicos e inorgánicos; por ejemplo, los nutrientes. Algunos contaminantes físicos incluyen cambios térmicos, como el color, turbidez, espumas y radiactividad. Los contaminantes biológicos son los responsables de la transmisión de enfermedades en las aguas de abastecimiento (Ramalho, 1996).

2.3.1 Microbiológicos

Entre los principales microorganismos causantes de enfermedades, encontramos la *Salmonella*, *Endamoeba histolystica*, *Micobacterium tuberculosis*, *Vibrio cholerae*, los *ECHO* y *Poliovirus*. Estos provienen principalmente de las excretas humanas. Tienen efectos negativos directos en la salud humana y animal, al consumir aguas contaminadas (Ramos *et al.*, 2003).

2.3.2 Fisicoquímicos

Incluyen productos químicos orgánicos e inorgánicos y metales pesados, procedentes de fuentes industriales, agrícolas y escorrentía urbana. Los principales compuestos orgánicos son proteínas, carbohidratos y lípidos, originados principalmente por desechos animales y vegetales, y actividades antropogénicas, compuestos por combinaciones de carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno, azufre, fosforo y fierro. Los compuestos inorgánicos se presentan en forma de diluciones, soluciones, coloides y material suspendido. En su mayoría son sales inorgánicas como cloruros, sulfatos, silicatos y óxidos metálicos. Los efectos negativos son la toxicidad de los metales pesados; los nitritos y nitratos, que producen la metahemoglobinemia en concentraciones mayores de 45 mg/L; arsénico que ocasiona intoxicación endémica y cáncer; y las fluorosis y ostiofluorosis provocadas por los fluoruros (Ramos *et al.*, 2003).

2.4 Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi)

Las fuentes principales de compuestos orgánicos de fósforo (Po) las constituyen los residuos de plantas, animales y microorganismos. Estos residuos liberan compuestos como ácidos nucleicos, fosfolípidos y ésteres, que representa entre un 30 y un 60% del P total. Estos compuestos retornan a fosfatos HPO_4^{2-} y de $H_2PO_4^-$ inorgánicos (Pi) por el proceso de mineralización (proceso biológico que ocurre mediante la conversión de la materia orgánica a un estado inorgánico por la acción de microorganismos), lo que permite el reciclaje del elemento para que regrese a la biota (Cerón y Aristizábal, 2012).

El fósforo inorgánico se encuentra en las rocas o en los depósitos naturales de fósforo. Este elemento se mueve por efectos de erosión o lixiviación. Se presenta generalmente fijado fuertemente en forma de fosfatos de $Ca^{2+,}$ Fe^{2+}, Mg^{2+} y Al^{3+}, especialmente en arcillas del grupo de las caolinitas y ocluido en los óxidos de hierro y aluminio. El P, aplicado como fertilizante en forma de superfosfato, puede constituir fácilmente compuestos inorgánicos inutilizables, debido a su inmovilización sobre la materia orgánica y arcillas. Los fosfatos (Pi) son utilizados por autótrofos y heterótrofos, incluidos los descomponedores, en la cadena trófica, para ser devueltos por estos últimos (Cerón y Aristizábal, 2012).

La disponibilidad de los iones en las diversas formas de P está fuertemente influenciada por el pH del suelo y por la adición de fertilizantes. La disponibilidad del fósforo también está dada por el uso del suelo; cambios en la vegetación de pastizales a bosques de coníferas aumentan la mineralización del P (Cerón y Aristizábal, 2012).

2.5 Dinámica del fósforo

El fósforo es un elemento que reacciona con facilidad en la naturaleza, encontrándose en más de 170 compuestos minerales. La dinámica de estos compuestos depende de su solubilidad y evolucionan de formas muy solubles a poco solubles, debido a esto, el fósforo es un elemento con poca movilidad. Su proceso de liberación es muy lento (Villanueva, 2011).

Los principales pasos del ciclo del P son su mineralización, el almacenamiento, la adsorción/absorción del humus y su fijación química en el suelo. Los mecanismos que afectan la movilidad del P son la adsorción-precipitación, inmovilización biológica, asimilación en plantas y lixiviación (Cerón y Aristizábal, 2012).

Cuando el fósforo se encuentra disponible en el suelo se llevan a cabo procesos que involucran el material absorbido por las plantas y su retorno, a través de los residuos vegetales y animales. Además, reacciones de fijación en la superficie de las arcillas y óxidos; el recambio biológico dado por procesos de mineralización-inmovilización y la solubilidad dependiente de la actividad microbiana. El fosfato se libera paulatinamente de las apatitas (mineral que contiene fosfato de calcio conteniendo cloro o flúor hasta en un 96 %). La absorción de fósforo como fosfato en la superficie de las partículas del suelo es muy rápida, se alcanza el equilibrio en 24 horas. Este fosfato, que es muy móvil, facilita el intercambio iónico, reacciona con el suelo y da lugar a la fase inmóvil (Cerón y Aristizábal, 2012).

El P soluble lo absorben las plantas y la biomasa microbiana, luego se incorpora en la materia orgánica de los suelos y sedimentos, y nuevamente se forman minerales poco solubles. La mayoría del fósforo de los ecosistemas terrestres se encuentra localizado en el suelo, generalmente su contenido varía entre 100 a 3000 mg de P/kg; entre un 15 y 80% de éste se encuentra en formas orgánicas (Po) (Cerón y Aristizábal, 2012).

La principal contribución a la dinámica del fósforo en los suelos se da por el recambio de los procesos de mineralización-inmovilización microbianos, los cuales se llevan a cabo en la rizósfera. Estos organismos excretan ácidos orgánicos y enzimas con actividad fosfatasa que hidrolizan los mono, di y tri ésteres de fosfato, respectivamente.

La fracción orgánica (Po) está formada por diversas moléculas que modifican la velocidad de mineralización. Los ácidos nucléicos y fosfolípidos se mineralizan rápidamente debido a que los diésteres de fosfato se adsorben débilmente en los materiales del suelo, siendo más vulnerables a la degradación microbiana. Los monoésteres, como los fosfatos de inositol, son sintetizados por las plantas, no se

mineralizan tan fácilmente y se acumulan en grandes cantidades, estos son la forma dominante de la fracción orgánica (Po) (Cerón y Aristizábal, 2012).

La lixiviación del P se produce desde la superficie hasta el subsuelo, cuando el agua infiltrada circula a través de canales preferenciales de flujo (macroporos), no produciéndose entonces la interacción agua-medio sólido.

En el proceso de liberación de los grupos fosfatos del inositol intervienen fosfatasas específicas denominadas fitasas. Las fitasas se encuentran en el agua marina, lagos, sedimentos y suelos; el fitato en los ambientes acuáticos se mineraliza rápidamente mientras que en los ecosistemas terrestres se acumula (Cerón y Aristizábal, 2012).

2.6 Fertilizantes fosfatados

El fertilizante fosfatado, así como su destino, dependen de sus propiedades particulares y de los compuestos químicos del suelo donde es aplicado. Los fertilizantes fosfatados comunes son sales solubles, el agua y el vapor de agua ingresan en el gránulo, éste se satura y forma una solución menos soluble, la que se mueve del gránulo al suelo. Los fertilizantes comunes normalmente forman fosfato de calcio dihidratado, y con el tiempo se disuelve y forma fosfatos menos solubles. En el caso de suelos ácidos dominados por arcillas de carga permanente (montmorillonita, vermiculita, illita, etc.) se forman fosfatos de hierro y aluminio. al presentarse una reducción en el pH, se incrementa la acidez, y esto permite que la estructura de los minerales arcillosos se rompa y se libere Al y Fe. Estos reaccionan con el fosfato formando compuestos bastante insolubles. La superficie de las arcillas de estos suelos no es reactiva, por lo que retienen cantidades moderadas de P haciendo que las reacciones con Fe y Al sean las que inmovilizan P. En el caso de suelos ligeramente ácidos y alcalinos se forman fosfatos de calcio menos solubles (Fixen, 2003).

2.7 Efectos del uso excesivo de fertilizantes en el suelo

Los efectos del P, en sus diferentes formas en el suelo, dependen de la fuente de nutrientes y dosis aplicada de fertilizante.

La pérdida de P en el escurrimiento agrícola ocurre en formas disueltas y ligadas a los sedimentos, asociado a partículas del suelo y material orgánico erosionado durante eventos de flujo. Constituye entre el 60-90% del P transportado por la escorrentía superficial, en la mayoría de las tierras cultivo. El P disuelto se origina por la interacción entre las precipitaciones y una fina capa superficial del suelo, donde se libera y pasa a la escorrentía superficial. La mayor parte del P disuelto esta inmediatamente disponible para la absorción biológica; y el P del sedimento es una fuente a largo plazo para los organismos acuáticos fotosintéticos, debido que no está disponible tan rápidamente (Sharpley, 2010).

2.8 Comportamiento del P por tipo de suelo

La textura del suelo puede estar relacionada con los cambios y las transformaciones en las fracciones de P. La textura del suelo tiene un efecto en la transformación de P y afecta al Pi lábil, Po lábil y al P de la biomasa microbiana. El tamaño de partícula de las fracciones del suelo interviene en la proporción de variabilidad en las fracciones de P.

En suelos arenosos, de texturas gruesas, o en lotes con drenaje subsuperficial, el P puede ser transportado en las aguas de drenaje (Fixen, 2003).

La formación de compuestos fosfatados en el suelo está influenciada tanto por las propiedades del fertilizante como las propiedades del suelo. Los fertilizantes fosfatados comunes forman fosfato de calcio dihidratado, el cual con el tiempo se disuelve y forma fosfatos menos solubles. En suelos ácidos dominados por arcillas de carga permanente se forman fosfatos de hierro y aluminio. En estos suelos, la reducción de pH permite que la estructura de los minerales arcillosos se rompa y liberen Al y Fe, que se combinan con el fosfato y se forman compuestos bastante insolubles. En suelos ligeramente ácidos y alcalinos se forma fosfato de calcio menos soluble. Generalmente, cuando menos soluble es el mineral más lentamente

ocurren las reacciones. En suelos de regiones tropicales las reacciones de superficie ligan fuertemente el fosfato y se pierde una gran cantidad de forma casi irreversiblemente (Fixen, 2003).

2.9 Erosión hídrica y escorrentía superficial

Se define como erosión a la pérdida gradual de los materiales que constituyen el suelo, por la disgregación de los agregados y terrones a medida que se van quedando en la superficie del suelo. Cuando el agua es el agente erosivo que origina el desprendimiento y desplazamiento de los materiales del suelo se habla de erosión hídrica. Este proceso físico depende de las regiones climáticas, y del uso y manejo del suelo (Paz y Vidal, 2004).

El proceso de erosión hídrica presenta tres fases bien diferenciadas, las cuales son:

1. La primera se produce por la degradación de los agregados del suelo mediante la energía cinética de las gotas de lluvia, donde se desprenden partículas de tamaño fino.
2. En la segunda fase, las partículas se transportan por la escorrentía junto con los materiales desagregados en la superficie del suelo, provoca, además; el arrastre de partículas adicionales como consecuencia de la incisión de la lluvia en el terreno.
3. Durante la tercera fase, al disminuir la fuerza de arrastre, las partículas más gruesas comienzan a sedimentar en las zonas de menor pendiente de las laderas o de las cuencas, mientras que los materiales más finos en suspensión, con frecuencia alcanzan los cursos permanentes de agua.

En ausencia de cubierta vegetal, el impacto de la gota de lluvia en el suelo provoca la desagregación y formación de una costra superficial que afecta a los primeros milímetros o centímetros del horizonte de laboreo. Esto se debe a que ocurre un desplazamiento de las partículas de arcilla y limo que ocupan los poros del suelo provocando su oclusión. Con ello, disminuye la intensidad de infiltración, lo que favorece que se inicie la escorrentía superficial (Paz y Vidal, 2004).

Una escorrentía es la parte de la precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes, de una cuenca. Existen varios tipos de escorrentías dependiendo su procedencia; las escorrentías superficiales se forman con la precipitación que no se infiltra, se mueven por gravedad a través de la superficie del terreno hasta incorporarse a la red de drenaje (Barioglio, 2006).

2.10 Exportación de fósforo

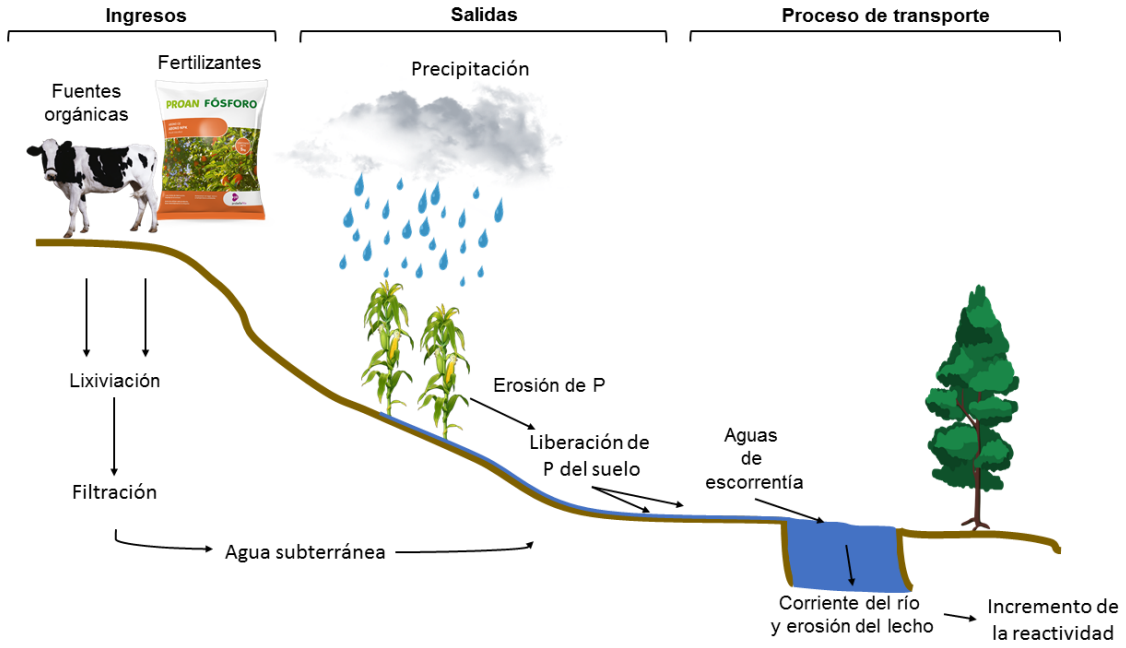


Figura 1. Transporte y pérdida de fósforo de las tierras agropecuarias a las aguas superficiales (Modificado de Sharpley *et al*., 2001).

El fósforo puede ser exportado en las aguas de escorrentía de suelos agrícolas o en las aguas de drenaje. En ambo, el fósforo puede estar presente en forma soluble o en partículas en suspensión. El fósforo del suelo se pierde por escorrentía superficial, debido a que las partículas sólidas son arrastradas por el agua (Figura 1). Estas pérdidas de P son considerables en suelos con pendiente topográfica elevada que favorecen la erosión hídrica. El fósforo disuelto en el agua de

escorrentía superficial procedente de fertilizantes inorgánicos o abonos orgánicos, contiene formas de fósforo muy solubles y se exporta fácilmente (Fernández, 2011). La eutrofización de los ecosistemas acuáticos representa uno de los principales problemas que afectan a la calidad del agua, por lo que existe una necesidad creciente de realizar investigaciones sobre aporte y dinámica de nutrientes, principalmente de fósforo.

Oyarzun *et al.* (1997), evaluaron los efectos de diferentes tipos de uso del suelo sobre la concentración y exportación de nitrógeno y fósforo hacia aguas superficiales, por medio de la aplicación de una ecuación matemática. De acuerdo con los resultados, se presentaron concentraciones menores de fósforo total en las cuencas de bosque nativo y praderas-renovales (de 65 mg m^{-2} $año^{-1}$), que en las cuencas dedicadas a praderas ganaderas y pradera de agricultura limitada (94 mg m^{-2} $año^{-1}$).

En una cuenca la exportación de PT desde áreas de cultivo agrícola fluctúa entre 22-100 mg m^{-2} $año^{-1}$ y desde pastizales entre 15-75 mg m^{-2} $año^{-1}$ (Chalar, 2006).

La evaluación del coeficiente de exportación de nutrientes en escorrentías para detectar zonas de riesgo ambiental ha permitido identificar coeficientes de exportación de 0.10 a 0.75 Kg ha^{-1} $año^{-1}$ en áreas de reforestación y zonas agropecuarias, respectivamente (Lisboa, 2006). Sin embargo, de acuerdo con Álvarez, *et al.* (2007), la exportación de fósforo en nueve cuencas de Latinoamerica oscila entre 0.04 y 4.50 Kg ha^{-1} $año^{-1}$, siendo los factores climáticos quienes determinan el comportamiento biogeoquímico de estos nutrimentos en el agroecosistema.

La aplicación del modelo NEWS2 (Nutrient Export WaterShed) desarrollado por la UNESCO para predecir las cargas de nutrientes en la desembocadura de cuencas hidrológicas, ha registrado concentraciones de P y N de 18.67 Kg Km^{-2} $año^{-1}$ y 80.92 Kg Km^{-2} $año^{-1}$ respectivamente; tomando en cuenta los efectos de la atenuación natural (Jayme, 2014).

2.11 Riesgo ambiental por exportación de fósforo hacia aguas superficiales

La USEPA en 2001, define riesgo como la probabilidad de que ocurra algo con consecuencias negativas a causa de un peligro. La evaluación de un riesgo es la estimación cuantitativa o cualitativa del mismo. La evaluación del riesgo ambiental se enfoca en los contaminantes químicos y posible impacto negativo sobre la salud humana y los ecosistemas, en el que se relaciona una dosis con la respuesta y caracterización del riesgo. El resultado de la evaluación constituye un instrumento en la toma de decisiones y ayuda a dirigir los recursos económicos y humanos hacia la atención del peligro más significativo. Esto, a través de programas y acciones de reducción de riesgos (Ize *et al.,* 2010).

Cuando los agricultores aplican fertilizantes fosfatados en exceso para aumentar el rendimiento de los cultivos, aumenta la pérdida de este nutriente. La mayoría del fósforo se encuentra adherido a las partículas del suelo, y con las precipitaciones el agua escurre hacia la cuenca, erosionando el suelo y arrastrando el fósforo. Este se deposita en el agua superficial, convirtiéndose en un riesgo ambiental importante en las zonas agropecuarias (Iida y Shock, 2009).

El exceso de este nutriente en superficiales se ve reflejado en procesos de eutrofización. Que dan lugar a la proliferación de algas y plantas acuáticas, pérdida de la transparencia del agua y disminución de la penetración de luz.

El análisis del riesgo de contaminación por fósforo integra factores de fuente (uso de suelo) y transporte (la pendiente, exportación de fósforo total y proximidad al río). Para identificar la vulnerabilidad de las zonas se establece una categorización del riesgo (Cuadro 1) (Fernández, 2011).

2.11.1 Eutroficación

El término *eutrofía*, se originó a partir del adjetivo griego *eutrophe*, y se refiere a “rico en nutrientes.” La eutroficación es el enriquecimiento de las aguas con nutrientes a un ritmo tal que no puede ser compensado por eliminación o mineralización total. En este proceso ocurre una proliferación de algas y plantas acuáticas en función de la carga de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo.

Las algas utilizan el oxígeno en el agua para la respiración, el nivel de oxígeno se reduce cuando las algas mueren ya que su descomposición consume grandes cantidades, las capas superficiales se saturan, hay un bloqueo de luz solar hacia capas inferiores y aumenta la turbidez dando como resultado una pérdida de biodiversidad (López, 2008).

Durante el proceso de eutroficación el fósforo actúa como nutriente limitante, es decir, la tasa de crecimiento algal estará restringida por este elemento. Cuando el P procede de los fertilizantes agrícolas, aguas residuales, pastizales y de sedimentos de las cuencas erosionadas, se acumula en los cuerpos de agua donde satura los ríos y lagos, hace proliferar las algas, plantas acuáticas y deteriora la calidad del agua (Villanueva, 2011).

Cuadro 1. Interpretación de riesgo ambiental por fósforo.

Riesgo	Interpretación
Bajo	Bajo potencial de pérdida de fósforo. Manteniendo el manejo actual existe una baja probabilidad de impactos adversos sobre aguas superficiales.
Medio	Potencial medio de pérdida de fósforo. Existe el riesgo de impactos adversos sobre aguas superficiales y deben tomarse algunas medidas de remediación para minimizar la probabilidad de perdida de fósforo.
Alto	Alto potencial de pérdida de fósforo e impacto sobre aguas superficiales. Deben tomarse medidas de conservación de suelos y establecer un plan de manejo para minimizar la probabilidad de pérdida de fósforo.
Muy alto	Muy alto potencial de pérdida de fósforo e impactos adversos sobre aguas superficiales. Deben ponerse en práctica todas las medidas de conservación de suelos y establecer un plan de manejo para minimizar la pérdida de fósforo. Debe cesar toda aplicación de fósforo en el suelo.

Fuente: Sherplay *et al.* (2001) citado por Fernández (2011).

2.11.2 *Niveles tróficos*

El estado trófico se puede evaluar con diversos métodos y haciendo uso de diferentes parámetros, la OECD en 1982 propuso una secuencia de categorías tróficas basándose en las concentraciones de fósforo total, clorofila a, nitrógeno total

y transparencia medida (disco de Secchi). Normalmente esta clasificación se basa en el fósforo como nutriente limitante (Moreno *et al*, 2010). La clasificación de los cuerpos de agua se divide normalmente en: oligotróficos (agua con bajo contenido de nutrientes y producción vegetal mínima), eutróficos (alto contenido de nutrientes y producción vegetal excesiva) y mesotróficos (nivel medio entre los anteriores) (Benjumea *et al.*, 2014).

2.11.3 Índice del estado trófico por nutriente

Un método para evaluar el nivel de estado del cuerpo de agua es el índice del estado trófico por nutriente (I_E) que considera el aporte de un nutriente en distintas áreas. Se puede aplicar a cualquier cuerpo de agua y como resultado se obtiene el grado de eutrofia en el que se encuentra el área de estudio. Este método establece la siguiente escala (Moreno *et al.*, 2010):

$I_E < 3$ para agua oligotrófica

I_E entre 3 y 5 mesotrófica

$I_E > 5$ aguas eutróficas

Se han reportado diversas técnicas para evaluar el grado de eutrofia en un cuerpo de agua. Entre ellos el Índice de eutrofización por nutriente, el cual considera su aporte en diferentes áreas y tipos de agua (Moreno, 2010).

Se han diseñado cartas de distribución del índice de eutrofización para nitrógeno total inorgánico y fósforo inorgánico, obteniéndose la localización de los máximos de concentración en áreas adyacentes a los principales sistemas lagunares y cuencas hidrográficas. Esto corrobora que las mayores exportaciones dependen, mayoritariamente, del régimen de precipitaciones y escurrimiento de las cuencas hidrográficas (Betanzos *et al.*,2012).

2.11.4 Florecimientos algales nocivos

Los florecimientos algales nocivos (FAN) son resultado del proceso de eutroficación. Estos impactan negativamente los ecosistemas acuáticos, el sector pesquero, la salud animal y humana. Pueden causar mortandad masiva de peces e incluso

contaminar diversos productos marinos y alterar negativamente los ecosistemas. Este fenómeno ambiental es comúnmente conocido como marea roja. Un FAN tóxico es la proliferación de microalgas productoras de toxinas y otros metabolitos que impactan la salud de los animales y del humano. Los FAN nocivos se catalogan como no tóxicos, los cuales, se asocian a eventos naturales como escorrentía de los ríos y exceso atípicos de lluvias (López *et al.*, 2015).

2.12 Uso de suelo y vegetación

La cobertura de la tierra y su uso representan los elementos integrantes de los recursos básicos. En este concepto se definen los grandes grupos de información de Uso del Suelo y Vegetación, de acuerdo a sus afinidades y similitud de usos (Cuadro 2) (INEGI, 2017).

Cuadro 2. Grupos de información de Uso de suelo y Vegetación.

Grupo	Información
Ecológica, florística y fisonómica	Incluye las agrupaciones de las comunidades vegetales, definidas con base a sus afinidades ecológicas y florísticas.
Agrícola, pecuaria, forestal	Presenta información sobre áreas dedicadas a las actividades agropecuarias, así como zonas con plantaciones comerciales con fines de explotación forestal.
Otro rasgo	Incluye información que se genera o actualiza de acuerdo con el insumo base y complementa la información temática.

Fuente: INEGI (2017).

Los tipos de vegetación hacen referencia a diferentes agrupaciones vegetales presentes en el país y forman parte de la información ecológica, florística y fisonómica registrada (INEGI, 2017).

Los agroecosistemas son aquellos ecosistemas dedicados a los tipos de agricultura, actividades pecuarias y forestales. Las zonas agrícolas son áreas de producción de cultivos, para emplearse como alimento, forraje, ornamental o industrial. Las zonas con uso pecuario son lugares donde se realiza la explotación ganadera de manera

intensiva o extensiva para la obtención de diferentes productos como carne, leche, huevo, entre otros. El uso forestal se refiere a la utilización de especies forestales cultivadas *ex profeso* para la obtención de diferentes productos (INEGI, 2017).

El grupo que incluye otros rasgos no forma parte de la cobertura vegetal ni de las áreas manejadas, pero que inciden sobre ellas, tales como; extensiones con cubierta de agua, urbano construido, y área desprovista de vegetación donde la vegetación natural o inducida ha sido eliminada por diferentes actividades humanas y sin vegetación aparente. Considera las áreas donde no es visible o detectable alguna comunidad vegetal (INEGI, 2017).

2.13 Actividades productivas del área de estudio

Las superficies dedicadas a la producción están dominadas por sistemas productivos no sustentables. Domina la agricultura de subsistencia de roza-tumba y quema, que aún utiliza importantes cantidades de agroquímicos y ganadería extensiva. Las áreas dedicadas a la agricultura comercial incluyen cultivos de maíz, calabaza, chile y frijol. Los recursos forestales siguen siendo aprovechados bajo modelos de explotación no sustentables o bien de forma ilegal (March y Castro, 2010).

2.14 Edafología

La palabra edafología proviene de las raíces *"edafos"*, suelo y *"logos"*, estudio, que significa estudio de los suelos. El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, donde encuentra soporte la cubierta vegetal natural y gran parte de las actividades humanas. Es el resultado de la interacción de varios factores del ambiente y fundamentalmente del clima, material parental o tipo de roca a partir de la cual se originan los suelos, vegetación y uso del suelo, relieve y tiempo. Para que se realice un buen manejo agrícola, pecuario, forestal, artesanal o de ingeniería civil, es necesario conocer las características de los suelos (Cuadro 3) (INEGI, 2004).

2.15 Relieve

El relieve permite representar de manera simplificada las formas que adquiere o tiene la corteza terrestre en su parte superficial como son las montañas, mesetas, valles, planicies, depresiones, terrazas, mesetas, entre las principales. Con el fin de modelar los espacios geográficos para conocer aspectos tales como; altura, pendiente, secciones, desnivel, áreas sujetas a inundación, delimitación de cuencas, entre otros (INEGI, 2019).

Las curvas de nivel son líneas que unen puntos situados a la misma elevación o cota (isolíneas) y tienden a una trayectoria horizontal. Son trazadas generalmente con un intervalo determinado y equidistante sobre un plano de referencia para modelar o cartografiar un espacio geográfico. Definen la forma tridimensional de la superficie terrestre en un mapa, en el que se identifican los declives, los puntos altos y bajos del terreno, los valles, las zonas planas y los sectores de fuerte pendiente en un lugar concreto. Por tanto, tiene la finalidad de evaluar los paisajes y la geomorfología de una zona determinada (INEGI, 2019).

Cuadro 3. Características de los diferentes tipos de suelo.

Tipo de suelo	Características
Acrisol	Suelos ácidos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. Acumulan arcilla en el subsuelo. Presentan colores rojos, amarillos o amarillos claros con manchas rojas, muy ácidos y pobres en nutrientes.
Arenosol	Suelos con textura arenosa, muy permeables y con escasa capacidad para retener agua y nutrientes.
Cambisol	Suelos pardos en una etapa inicial de formación, se caracteriza por formación de minerales de arcilla y óxidos de hierro o por remoción de carbonatos o yeso.
Foezem	Tierra parda que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Tiene una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes.
Fluvisol	Suelo de río. Se caracterizan por estar formados de materiales acarreados por agua. Muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta.
Gleysol	Suelos pantanosos que se encuentran en zonas donde se acumula y estanca el agua la mayor parte del año dentro de los 50 cm de profundidad.
Litosol	Suelo de piedra con profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales.
Luvisol	Suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales, de tonos rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser obscuros.
Regosol	Manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca. Son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen.
Rendzina	Suelos someros que producen ruido con el arado por su pedregosidad. Tienen una capa superficial. Suelos arcillosos y abundantes en materia orgánica.
Vertisol	Alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento con baja susceptibilidad a la erosión.

Fuente: INEGI (2004).

2.16 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

El análisis de la distribución espacial de un compuesto como el fósforo se puede realizar utilizando el método de interpolación mediante herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) (Moreno *et al.*, 2010). La categorización de los diferentes valores interpolados se realiza aplicando la geoestadística. Existen diversas técnicas gráficas para describir y realizar distribuciones espaciales. La representación cartográfica de la variable se puede realizar a través de mapas temáticos donde el valor de una variable se representa mediante símbolos y colores para cada intervalo de valores, que representen cada una de las unidades geográficas estudiadas como países, regiones, entre otros. Dentro de los mapas temáticos más importantes para la representar la tendencia espacial de una variable se encuentra el mapa de cuantiles, donde se representa el comportamiento de una variable espacialmente distribuida, para lo cual; los datos se dividen y se agrupan en una serie de categorías que se denominan cuantiles, que contienen igual número de observaciones (De Corso y Pinilla, 2017).

La ventaja de representar información geográfica en mapas radica en que se pueden utilizar para tareas específicas, como lo son los mapas de análisis, que se utilizan para realizar consultas, encontrar ubicaciones adecuadas, solucionar problemas, analizar situaciones hipotéticas, modelar procesos, generar informes, entre otras tareas. Esto, con la finalidad de solucionar problemas a través de la combinación de herramientas y datos adecuados (ArcGIS, 2016).

Existen diversas herramientas para realizar el análisis geográfico, entre ellas se encuentran las evaluaciones multicriterio que permiten aplicar determinado peso o valor a varias entradas y combinarlas en una sola salida para resolver un problema. Entre las herramientas de superposición disponibles en los SIG se encuentra la superposición ponderada. La cual, superpone varios rásteres con una escala de medición común y pondera, según su importancia, combinando los siguientes pasos:

1. Reclasifica los valores en los rásteres de entrada en una escala de evaluación común de adecuación o preferencia, riesgo, o similar a una escala unificadora.
2. Multiplica los valores de la celda de cada ráster de entrada por el peso o valor de importancia de los rásteres.
3. Suma los valores de celda resultantes para producir el ráster de salida (ArcGIS, 2016).

Este análisis es útil para evaluaciones de riesgos ambientales, ya que en los problemas de carácter ambiental influyen una serie de factores. Por ejemplo, para evaluar el riesgo de incendio de una zona determinada se consideran factores como la pendiente del terreno, el tipo de cobertura vegetal, los usos del suelo, entre otros; y cada uno de ellos tendrá una mayor o menor influencia en él (Benayas, 2018).

La aplicación de la modelación espacial ha servido para identificar zonas geográficas de América Latina y el Caribe para la biofortificación de cultivos; cuyo objetivo fue reducir las deficiencias nutricionales generando un sistema de información geográfica (SIG). Para esto fue necesario incluir registros sobre riesgos nutricionales, producción de cultivos, consumos alimenticios, y datos demográficos y socioeconómicos de 11 países; a través de un análisis exploratorio y descriptivo de mapas temáticos, y su superposición y comparación para identificar patrones espaciales y zonas posibles de intervención (Monserrate *et al.*, 2009).

3. JUSTIFICACIÓN

El arrastre de los nutrientes disueltos en escorrentías de suelos de uso agropecuario es una de las causas de alteración en la concentración de los mismos en aguas superficiales. Los cambios de uso de suelo actividades agropecuarias producen un aumento en el ingreso de nutrientes como el fósforo (Oyarzun *et al.*, 1997). El resultado de una fertilización descontrolada trae como consecuencia la alteración en el equilibrio del fósforo, afectando el poder de captación de este nutriente en el cultivo, dando origen a pérdidas de nutrientes en el suelo y degradación ambiental como la eutrofización. Proceso por el cual los fosfatos y nitratos influyen directamente (Rivas *et al.*, 2009).

El fósforo puede ser exportado de suelos agrícolas por medio de las escorrentías superficiales. La precipitación no se infiltra y fluye sobre la superficie del terreno por acción de la gravedad, según la pendiente del terreno, hasta incorporarse a la red de drenaje (Paz y Vidal, 2004). En la ganadería, el fósforo proviene del estiércol y la orina de animales de pastoreo, los cual son depositados en el suelo. El contenido de fósforo del estiércol varía de acuerdo a la especie animal, la dieta y el método de manipulación (Flores *et al.*, 2014).

Una vez que los compuestos fosfatados son exportados hacia la red de drenaje, pueden estimular el crecimiento de ciertos organismos vegetales como las microalgas (eutrofización), las cuales al morir y descomponerse consumen grandes cantidades de oxígeno. Este se reduce en el agua y las capas superficiales se saturan, hay bloqueo de luz solar hacia capas inferiores y aumenta la turbidez; lo que da como resultado una pérdida de biodiversidad (Villanueva, 2011).

Exportaciones elevadas de fósforo a través de la red hídrica de la cuenca hacia zonas costeras, se puede convertir en un precursor de florecimientos algales nocivos (FAN). A nivel mundial, en las últimas tres décadas se ha registrado un incremento en la intensidad, duración y distribución geográfica de los FAN. Las investigaciones acerca de su formación en el ambiente se asocian a eventos naturales como escorrentía de los ríos. y excedentes de fertilizantes agrícolas indirectamente depositados en los ríos (López *et al.*, 2015).

De acuerdo con Sánchez-Hernández (2013), la cuenca del Grijalva-Usumacinta presenta riesgos ambientales que van de medio a alto, en más de 7 millones de ha (83 % del área total de la cuenca). Esta cuenca presenta un bajo nivel de riesgo de eutrofización por ser un área receptora de sedimentos. La identificación de zonas de riesgo por altos niveles de exportación de fósforo hacia aguas superficiales, contribuye al diseño de un plan de gestión y desarrollo de la cuenca para mitigar el flujo de fósforo hacia la costa, a causa de la expansión de áreas cultivadas (Lisboa, 2016). Por lo anterior, el presente proyecto tiene como objetivo determinar sobre el grado de eutrofia y riesgo ambiental, debido a la exportación excesiva de fósforo total disuelto en las escorrentías de zonas agropecuarias, hacia agua superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

4. HIPÓTESIS

Existe un grado de eutrofia y riesgo ambiental severo generado por la exportación de fósforo total disuelto en las escorrentías de zonas agropecuarias, sobre el estado trófico del agua superficial de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Evaluar el estado trófico y riesgo ambiental por exportación de fósforo total disuelto en las escorrentías en zonas agropecuarias, en aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

5.2 Objetivos específicos

1. Determinar la concentración de fósforo total en las escorrentías de las zonas agropecuarias de la cuenca baja del río Usumacinta, Tab.
2. Analizar la exportación de fósforo total de las escorrentías hacia aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.
3. Determinar el estado trófico a partir de la concentración de fósforo total en aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta.
4. Identificar zonas de riesgo de acuerdo a la exportación de fósforo en la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

La cuenca del río Usumacinta se localiza entre los 14º 50' y 18º 45' de latitud Norte y los 89º 20' y 92º 40' de longitud al Oeste.

Se encuentra delimitada al Norte por las cuencas hidrológicas San Pedro y San Pablo, Laguna del Pom y Atasta, Palizada y Cumpan, al Este por la cuenca hidrológica San Pedro y por la República de Guatemala, al Sur por las cuencas hidrológicas Lacantún y Lacanjá y al Oeste por las cuencas hidrológicas Chocaljah, Chacamax, Tulijá, Chilapa y Grijalva (CONAGUA, 2014).

El estudio se realizó en tres municipios pertenecientes a la cuenca baja del Río Usumacinta (Figura 2), esta cuenca tiene una superficie correspondiente para el estado de Tabasco de 724,547 ha, de las más de siete millones de hectáreas de superficie total.

La cuenca baja ocupa 40.1% de este territorio (1 351 025.9 hectáreas), para tabasco la cuenca baja tiene 760,228.41 ha (Cotler, 2010).

6.1.1 Condiciones climáticas

De acuerdo con los valores para el periodo de datos analizados (Cuadro 4), la región de la cuenca baja de río Usumacinta indican una temperatura promedio anual de 27.2 °C, con una mínima de 22.6 °C, y una máxima de 31.8 °C. En 2015, se registró una precipitación anual de 1,607.8 mm (CICESE, 2015).

Cuadro 4. Temperatura y precipitación promedio en el área de estudio.

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura **(**°C)	23.3	25.4	27.5	30.0	29.8	28.7	28.8	29.3	28.3	27.4	26.1	25.1
Precipitación (mm)	224.5	24.8	6.8	0.6	3.6	33.2	73.3	93.5	106.1	753.6	119.9	167.9

Fuente: CICESE (2015).

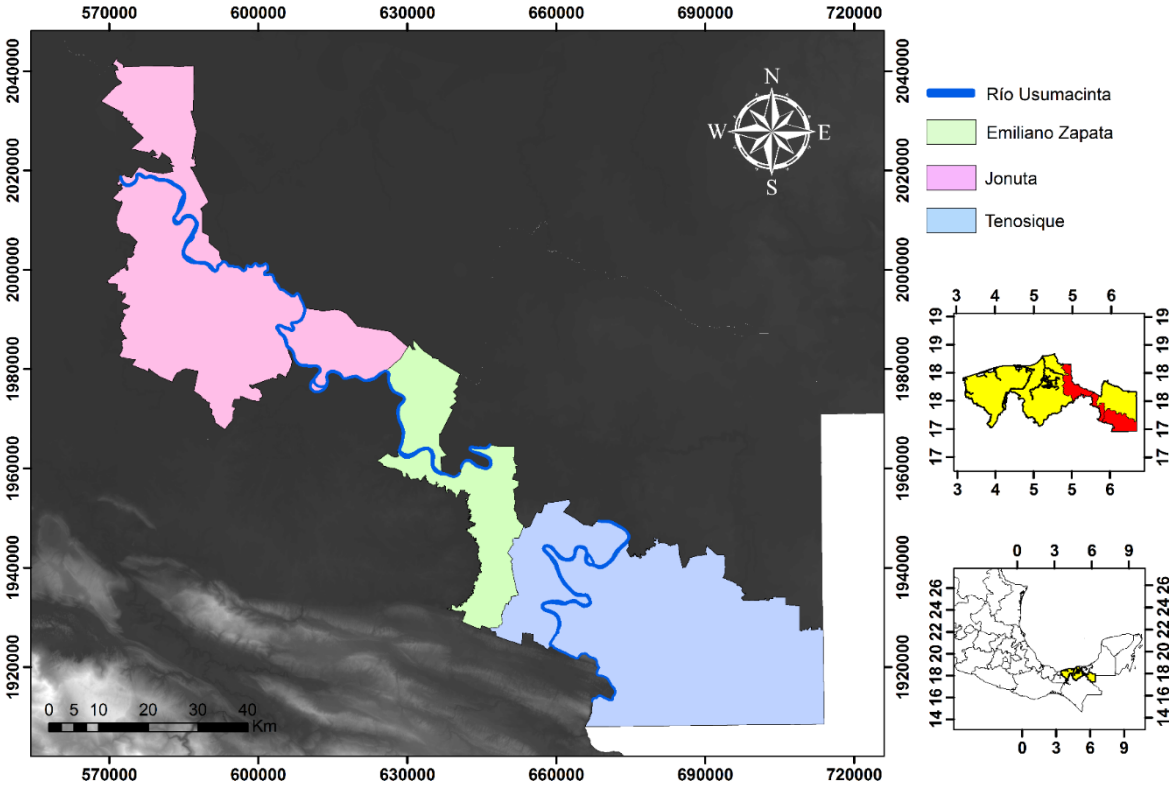


Figura 2. Área de estudio en la cuenca baja del río Usumacinta en el estado de Tabasco.

6.1.2 Clima

De acuerdo con los datos obtenidos de la carta climática 1:600,000 del INEGI (2008), la cuenca baja presenta dos tipos de clima (Figura 3). Af(m) que se caracteriza por ser un clima cálido húmedo con lluvias todo el año, precipitación del mes más seco superior a los 60 mm, lluvia invernal menor al 18%. Am(f) se caracteriza por ser un clima cálido húmedo con lluvias intensas en verano y lluvia invernal mayor a 10.2%.

6.1.3 Edafología

En la cuenca baja se encuentran 18 tipos de suelo (Figura 4). Los tres tipos de suelo con mayor extensión es el Gleysol vértico con 92,355.66 ha, seguido por Vertisol pélico con 80, 464.05 ha, y Gleysol éutrico con 67,423.09 ha (Cuadro 5).

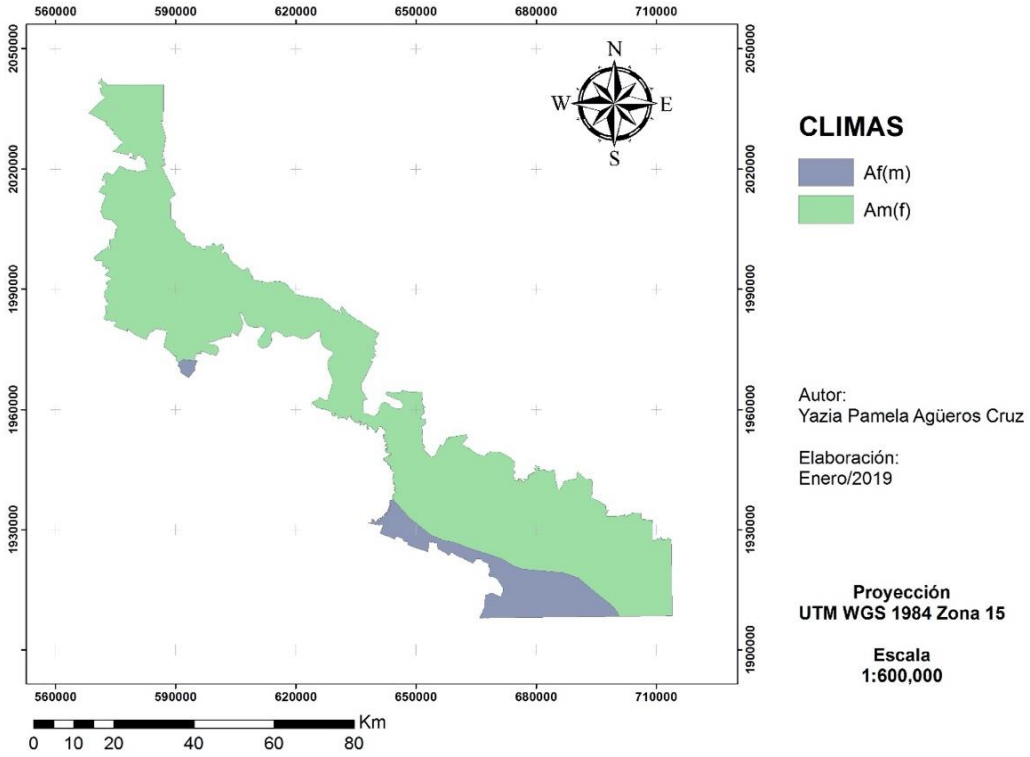


Figura 3. Tipos de climas en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab.

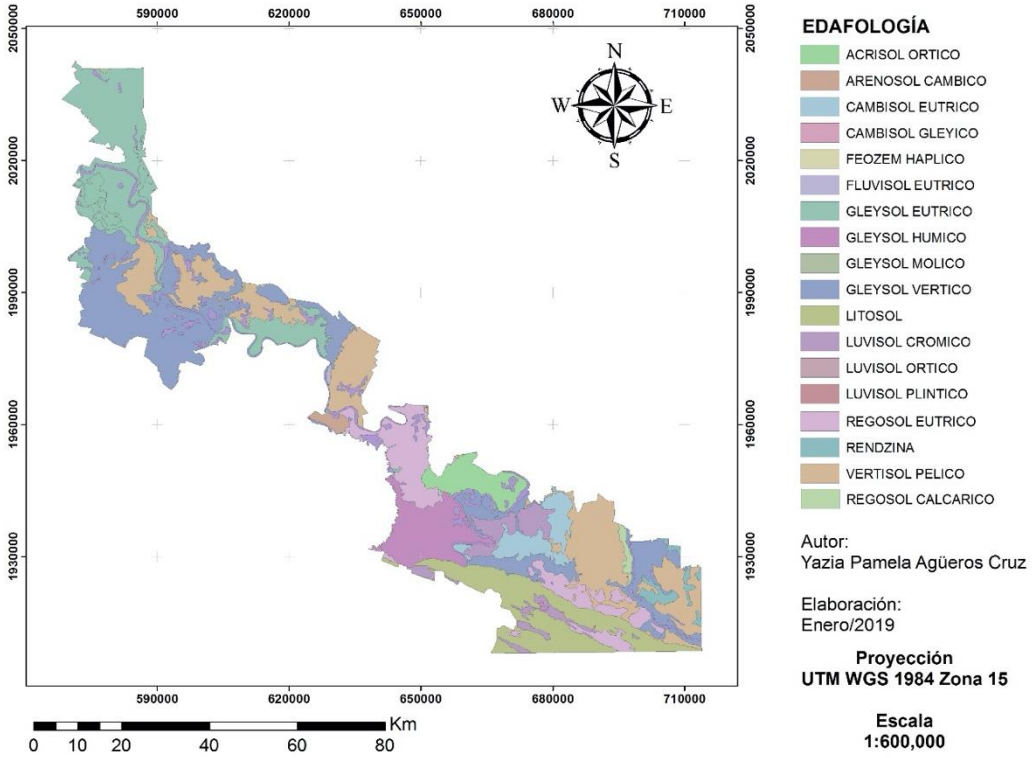


Figura 4. Edafología de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

Cuadro 5. Tipos de suelo en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab.

Edafología	Superficie	
	Área ha	%
Acrisol Órtico	13549.95	3.46
Arenosol Cambico	2365.92	0.60
Cambisol Eutrico	13787.2	3.52
Cambisol Gleyico	0.21	0.00
Feozem Haplico	25.28	0.01
Fluvisol Eutrico	378.48	0.10
Gleysol Eutrico	67423.09	17.23
Gleysol Humico	24368.3	6.23
Gleysol Molico	260.95	0.07
Gleysol Vertico	92355.66	23.60
Litosol	40152.31	10.26
Luvisol Cromico	15573.31	3.98

Luvisol Órtico	0.01	0.00
Luvisol Plintico	20.89	0.01
Regosol Calcarico	1851.93	0.47
Regosol Eutrico	34175.51	8.73
Rendzina	4519.36	1.16
Vertisol Pelico	80464.05	20.56
Total	**391272.4**	**100**

Fuente: Carta edafológica 1:600,000 (INEGI, 2014).

6.1.4 Uso de suelo

En la cuenca baja del río Usumacinta se encuentran presente los siguientes tipos de uso de suelo (Cuadro 6), de los cuales pastizal cultivado es el de mayor superficie representado por 186,410.82 ha, seguido por vegetación tular (comunidad de plantas acuáticas) con 44,156.04 ha, y vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia con 36,853.66 ha (Figura 5).

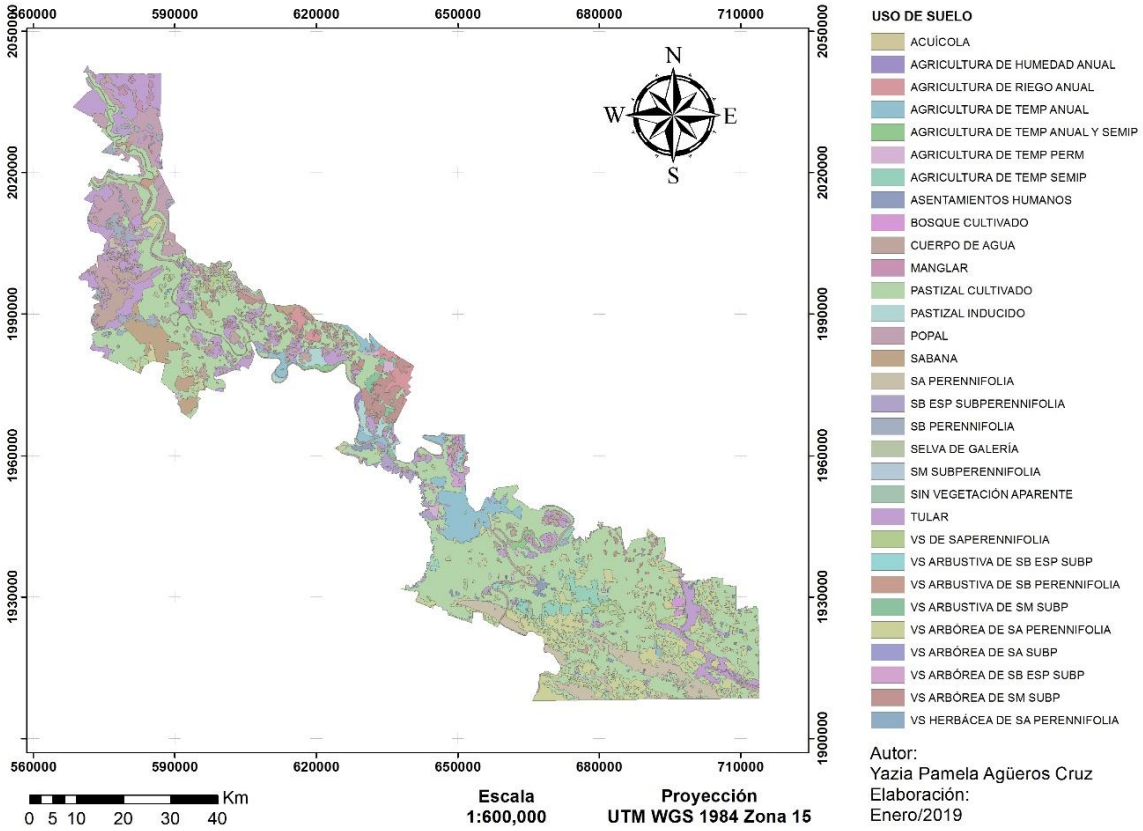


Figura 5. Tipo de uso de suelo presente en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab.

Cuadro 6. Tipos de uso de suelo en la cuenca baja del río Usumacinta.

Uso de suelo	Superficie	
	Área ha	%
Acuícola	11.40	0.003
Agricultura de humedad anual	321.84	0.08
Agricultura de riego anual	4,256.24	1.03
Agricultura de temporal anual	14,881.08	3.61
Agricultura de temporal anual y semipermanente	1,398.55	0.34
Agricultura de temporal permanente	2,327.25	0.57
Agricultura de temporal semipermanente	5,724.72	1.39
Asentamientos humanos	2,461.84	0.60
Bosque cultivado	823.98	0.20
Cuerpo de agua	2,8635.16	6.96
Manglar	1,321.35	0.32

Pastizal cultivado	186,410.82	45.28
Pastizal inducido	3,806.40	0.92
Popal	21,901.07	5.32
Sabana	8,951.23	2.17
Selva alta perennifolia	16,670.17	4.05
Selva baja esp subperennifolia	3,613.78	0.88
Selva baja perennifolia	5,024.87	1.22
Selva de galería	27.34	0.01
Selva mediana subperennifolia	0.10	0.00
Sin vegetación aparente	0.52	0.00
Tular	44,156.04	10.73
VS arbórea de SA perennifolia	36,853.66	8.95
VS arbórea de SA subperennifolia	33.96	0.01
VS arbórea de SB esp subperennifolia	2,377.68	0.58
VS arbórea de SM subperennifolia	11,219.36	2.73
VS arbustiva de SA perennifolia	4,836.06	1.17
VS arbustiva de SB esp subperennifolia	1,191.25	0.29
VS arbustiva de SB perennifolia	664.77	0.16
VS arbustiva de SM subperennifolia	1,715.72	0.42
VS herbácea de SA perennifolia	84.09	0.02
	411,702.31	**100**

VS: vegetación secundaria, SA: selva alta, SM: selva media, SB: selva baja.

Fuente: Carta de uso de suelo y vegetación 1:600,000 INEGI (2017).

6.1.5 Relieve

De acuerdo al conjunto de datos vectoriales de información topográfica digital escala 1: 250 000 INEGI (2018), la cuenca baja del río Usumacinta presenta una cota máxima de 648 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y una cota mínima de -13 m.s.n.m. (Figura 6). Tenosique presenta una cota máxima de 640 m.s.n.m.; Emiliano Zapata una cota máxima de 260 m.s.n.m.; Jonuta presenta una cota máxima de 20 m.s.n.m.

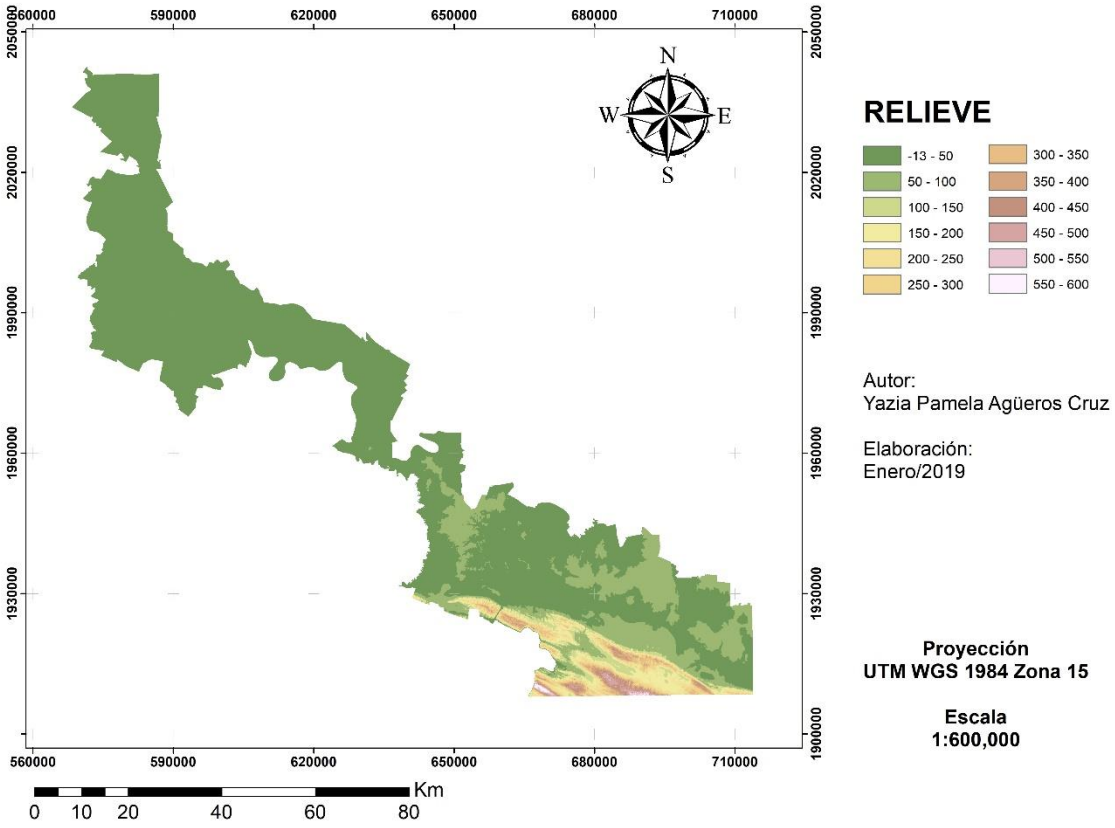


Figura 6. Relieve presente en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab.

6.2 Sitios de muestreo

El número de muestras y ubicación de la toma de las mismas se seleccionaron en función de las vías de acceso y a su representatividad por tipo y uso del suelo en la superficie de la cuenca (Cuadro 7).

Se ubicaron diez sitios de muestreo distribuidos en tres municipios del estado de Tabasco; Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta (Figura 7).

6.3 Toma de muestras

Las muestras de escorrentías superficiales fueron colectadas durante la temporada de lluvias, en el periodo de noviembre de 2017 a mayo de 2018. Se colocaron tres dispositivos Storm Water Sampler, por punto de muestreo, cada uno con una botella muestreadora de agua de escorrentía (Anexo 2). Una vez registradas las primeras

lluvias, los dispositivos fueron recolectados de acuerdo con los lineamientos propuestos para el manejo y trasporte de muestras que establece el IMTA (2017). Las muestras de agua superficial se colectaron en botes de vidrio ámbar de 500 ml directamente en el sitio de muestreo.

Cuadro 7. Tipo y uso de suelo en los sitios de muestreo de escorrentías superficiales.

Clave	Tipo de suelo	Uso de suelo
ES1	Regosol éutrico	Agricultura de temporal semipermanente
ES2	Litosol	Pastizal cultivado
ES3	Gleysol vértico	Agricultura de temporal semipermanente
ES4	Litosol	Agricultura de temporal semipermanente
ES5	Cambisol éutrico	Pastizal cultivado
ES6	Gleysol vértico	Pastizal cultivado
ES7	Luvisol crómico	Pastizal cultivado
ES9	Gleysol vértico	Agricultura temporal anual y semipermanente
ES10	Regosol éutrico	VS arbórea de SA perennifolia
ES11	Gleysol vértico	Pastizal cultivado
ES21	Arenosol cámbico	Bosque cultivado
ES23	Arenosol cámbico	Pastizal cultivado
ES24	Regosol éutrico	Pastizal cultivado
ES25	Arenosol cámbico	Pastizal cultivado
ES26	Arenosol cámbico	Pastizal cultivado
ES27	Arenosol cámbico	VS arbórea de SA perennifolia
ES28	Regosol éutrico	Pastizal cultivado
ES30	Gleysol vértico	Pastizal cultivado
ES32	Gleysol vértico	Pastizal cultivado
ES39	Gleysol vértico	Pastizal cultivado
ES40	Vertisol pélico	Pastizal cultivado

Fuente: Carta edafológica 1:600,000 y Carta de uso de suelo y vegetación 1:600,000 INEGI (2014-2017).

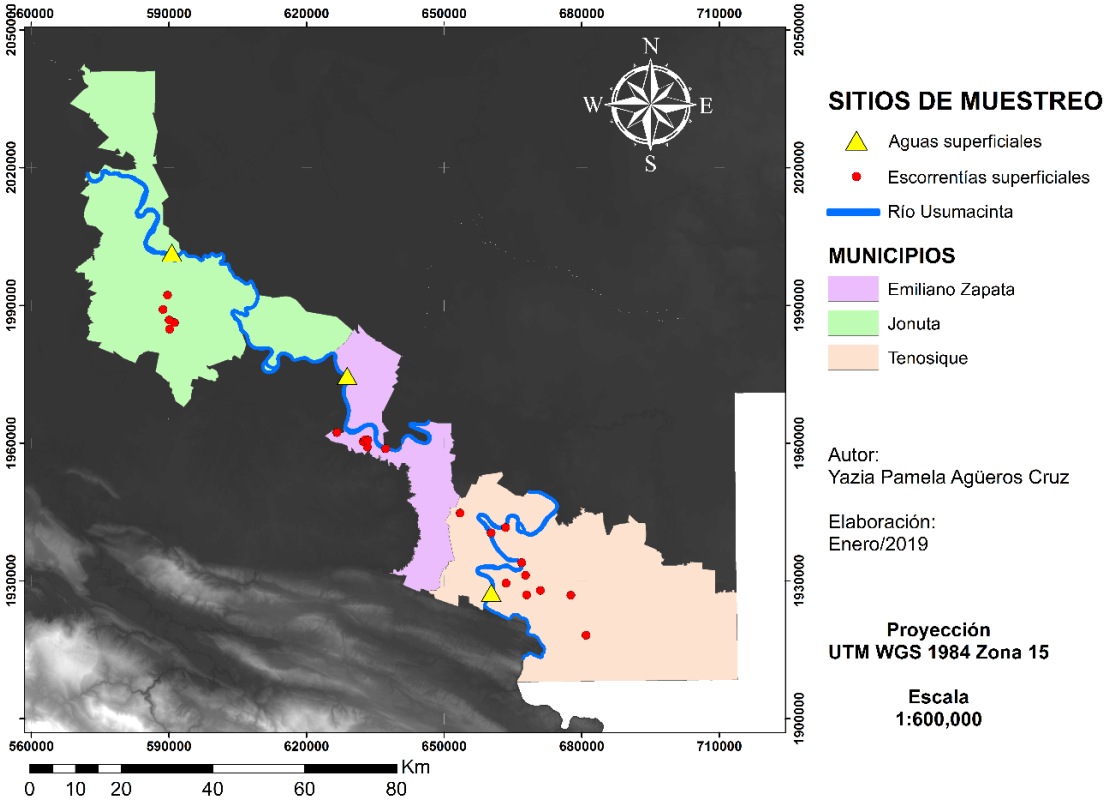


Figura 7. Ubicación de los sitios de muestreo en la cuenca baja del río Usumacinta en el estado de Tabasco.

6.4 Análisis químico

El análisis de la concentración de fósforo total de las muestras de escorrentía, así como de agua superficial se realizó bajo el protocolo oficial de la NMX-AA-029-SCFI-2001.

6.5 Exportación de fósforo

La exportación mensual de fósforo (P) se obtuvo con la siguiente ecuación (Cárdenas, 2007):

(1)

$$Exp = (\partial * Q)/100{,}000$$

Donde:

∂: Concentración media mensual de fósforo (µg/L).

Q: Caudal (L/s).
100,000: Factor de conversión.

El caudal del río se estimó con la siguiente formula, donde:
(2)

$$Q = AV$$

A: Es el área de la sección transversal del río.
V: La velocidad de la corriente.

El área de la sección transversal (A) y la velocidad de la corriente (V) fue obtenida con un equipo Acoustic Doppler Current Profiler; ADCP por sus siglas en ingles.
La exportación anual de fósforo (P) por municipio se evaluó multiplicando los valores de las medias mensuales de las concentraciones (µg/L) por el caudal medio mensual (L/s) del Río Usumacinta.

6.6 Índice de estado trófico

Para evaluar el estado trófico se utilizó el índice de eutrofización (I_E) propuesto por Karydis *et al.* (1983), el cual requiere únicamente los valores de las concentraciones del nutriente. El índice de eutrofización para fósforo total por campaña de muestreo se evaluó con la ecuación expresada de la siguiente forma:
(3)

$$I_E = \frac{C}{C - \log Xi} + \log A$$

Donde:
I_E: Es el índice de eutrofización para el nutriente en el sitio de muestreo durante el período de estudio, compuesto por M muestreos.
A: Número de sitios de muestreo durante el período de estudio.
C: Logaritmo de la concentración total del nutriente por campaña.

Xi: Concentración total de PT en la estación.

El índice de eutrofización establece la siguiente escala de valores para evaluar el estado de eutrofia:

Cuadro 8. Valores del estado de eutrofia.

Estado de eutrofia	I_E
Oligotrófico	<3
Mesotrófico	>3 y <5
Eutrófico	>5

Fuente: Moreno (2010).

6.7 Análisis estadístico

Se confeccionaron graficas del Índice de eutrofización por nutriente para el agua superficial con líneas de referencia de límites máximos permisibles (LMP).

6.8 Zonas de riesgo

Con el software Ar cGIS versión 13.3, por método de interpolación tipo Kriging y aplicando la geoestadística, se confeccionaron cartas de distribución espacial de la exportación de fósforo total (PT) para determinar zonas de riesgo: bajo, medio, alto y muy alto, sobre un mapa temático de cuantiles.

Para evaluar el riesgo ambiental, se realizó un mapa de análisis utilizando la herramienta de evaluación multicriterio conocida como superposición ponderada, tomando en cuenta el ráster con cuatro grupos de usos de suelo (Cuadro 9), modificado a partir de la carta de uso de suelo y vegetación con escala 1:600,000 (INEGI, 2017).

El ráster de la pendiente se confecciono a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) a 15 metros (INEGI, 2013). Se obtuvo el ráster de proximidad al río Usumacinta a partir de la carta de uso de suelo y vegetación con escala 1:600,000 (INEGI, 2017). Por último, se obtuvo el ráster reclasificado de la

exportación de PT a partir de mapa temático de la exportación de fósforo total (PT). (Anexos 3 a 6). Se otorgaron cuatro valoraciones cualitativas que sirvieron para establecer el tipo de riesgo (Cuadro 10).

Cuadro 9. Grupos de usos de suelo modificado.

Grupos de información	Usos de suelo
Sin Vegetación	Sin vegetación aparente
	Cuerpo de agua
Vegetación	Bosque
	Selva
	Manglar
	Popal
	Sabana
	Tular
Asentamientos Humanos	Zonas urbanas
Agroecosistemas	Pastizal inducido
	Pastizal cultivado
	Bosque cultivado
	Acuícola
	Agricultura de humedad anual
	Agricultura de riego anual
	Agricultura de temporal anual
	Agricultura de temporal anual y semipermanente
	Agricultura de temporal permanente
	Agricultura de temporal semipermanente

Fuente: Carta de uso de suelo y vegetación con escala 1:600,000 (INEGI, 2017).

Cuadro 10. Clasificación de los tipos de riesgo ambiental.

Riesgo	Valor
Bajo	4
Medio	3
Alto	2
Muy alto	1

En el cuadro 11 se muestra un resumen de los valores de las ponderaciones y los rangos de cada variable propuesta, para determinar el riesgo ambiental.

Con el objetivo de facilitar la interpretación visual de los resultados representados en la cartografía, se utilizó la gama de colores representada en el cuadro 12.

Cuadro 11. Ponderaciones para cada variable.

Ponderación	Variable	Rangos	Valor
20	Pendiente (%)	< 2	4
		2 - 6	3
		6 - 8	2
		> 8	1
20	Proximidad a ríos (m)	< 100	1
		100 - 300	2
		300 - 500	3
		> 500	4
40	Exportación de PT ($mg/m^2/mes$)	< 1.7	4
		1.7 - 15	3
		15 - 43	2
		> 43	1
20	Uso de suelo	Sin Vegetación	4
		Vegetación	3
		Asentamientos Humanos	2
		Agroecosistemas	1

Cuadro 12. Simbología de mapas de riesgo.

	Bajo
	Medio
	Alto
	Muy alto

Para analizar los cuatro factores en consideración de la ponderación de cada uno, se utilizó la herramienta de superposición ponderada de ArcGIS versión 13.3.

7. RESULTADOS

7.1 Concentración de fósforo total en las escorrentías de las zonas agropecuarias

Las concentraciones de fósforo total en escorrentía superficial en temporada de lluvia oscilaron entre los valores mínimos de 0.02, 0.67 y 0.61 mg L^{-1} en Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta, respectivamente. Los valores máximos observados fueron de 1.21, 6.85 y 6.84 mg L^{-1}. Emiliano Zapata presenta la concentración media máxima de 2.62 mg L^{-1} de fósforo total; Tenosique registro la concentración media mínima de 0.39 mg L^{-1} de fósforo total.

Cuadro 13. Variabilidad de las concentraciones de fósforo total en escorrentías en temporada de lluvias.

Municipio	Fósforo Total mg L^{-1}			
	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Tenosique	0.02	1.25	0.39	0.44
Emiliano Zapata	0.67	6.85	2.62	2.43
Jonuta	0.61	6.84	2.19	3.10

7.2 Exportación de fósforo total de las escorrentías hacia aguas superficiales

La exportación de fósforo total (PT) por escorrentía superficial en temporada de lluvias osciló entre 0.54 y 23.91 mg m^{-2} mes^{-1} en Tenosique; 0.02 y 6.64 mg m^{-2} mes^{-1} en Emiliano Zapata; y entre 6.42 y 72.25 mg m^{-2} mes^{-1} en Jonuta. De acuerdo a la distribución espacial de la exportación de PT (Cuadro 14), el municipio de Jonuta presenta la media máxima de 23.15 mg m^{-2} $año^{-1}$ de exportación de fósforo; y en Tenosique se registró la media mínima de 1.52 mg m^{-2} $año^{-1}$ de exportación.

Cuadro 14. Variabilidad de la exportación de fósforo total por escorrentías en temporada de lluvias.

Municipio	Fósforo Total mg L^{-1}			
	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Tenosique	0.54	23.91	5.90	6.93
Emiliano Zapata	0.02	6.64	1.52	2.65

Jonuta	6.42	72.25	23.15	32.74

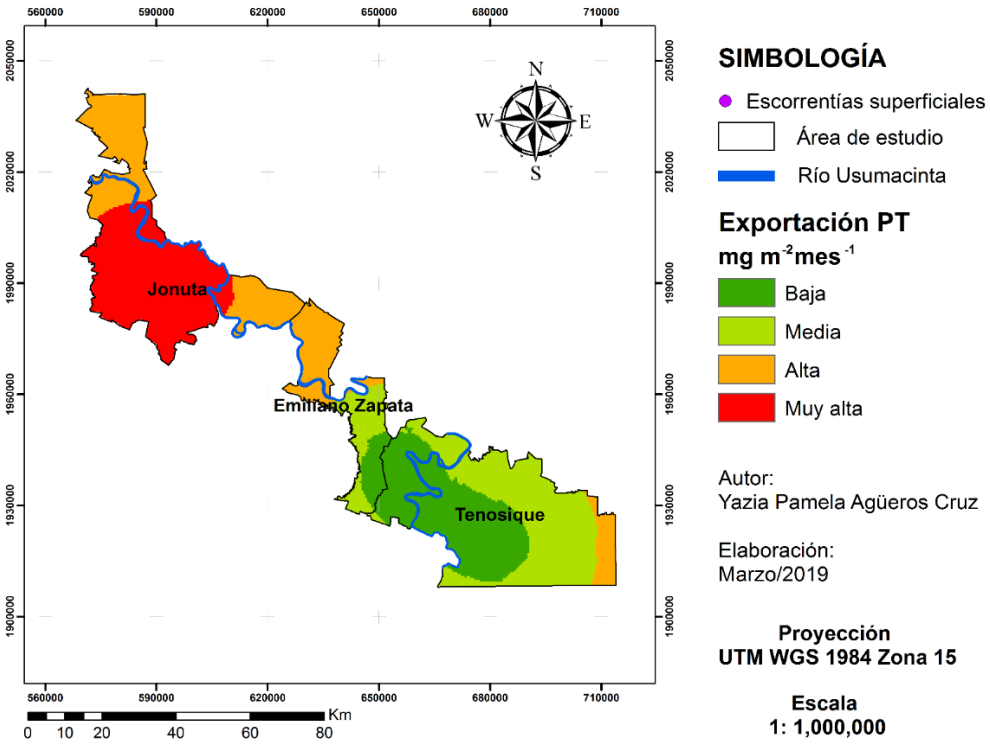


Figura 8. Mapa temático de la distribución espacial de la exportación de fósforo total (PT) en escorrentías superficiales en el área de estudio.

7.3 Índice de eutrofización del agua superficial

El agua superficial en el área de estudio presenta un estado mesotrófico en la campaña de muestreo realizada en mayo (2018) con valores del I_E de 3.01 en Tenosique, 3.10 en E. Zapata y 3.13 (Figura 9), mes en el cual se registraron las primeras precipitaciones.

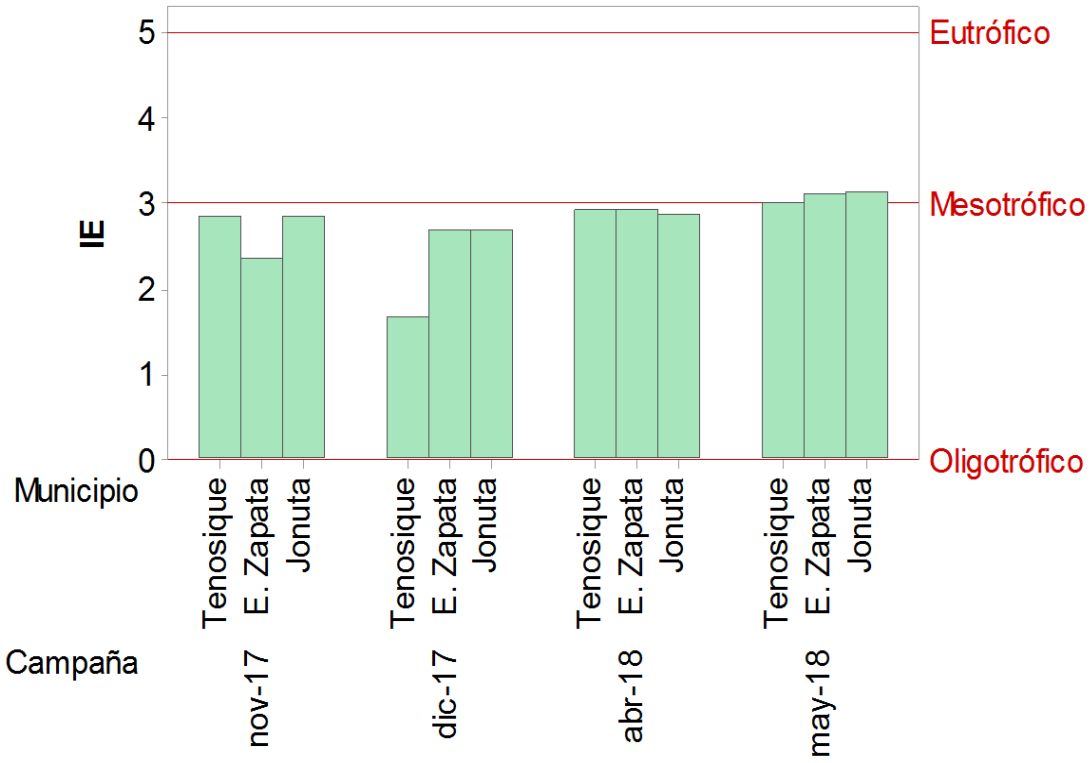


Figura 9. Variabilidad de los valores del Índice de Eutrofización (IE) para fósforo.

7.4 Zonas de riesgo ambiental por Exp-PT

A partir del análisis de multicriterio entre el uso de suelo, la pendiente, proximidad al río Usumacinta y la exportación de fósforo total se identificaron las zonas de riesgo ambiental (Figura 10). El municipio de Jonuta presenta mayor probabilidad de riesgo ambiental “Muy alto”. Emiliano Zapata se clasifica como una zona de riesgo “Alto” y “Medio”. El municipio de Tenosique se clasifica con un riesgo ambiental “Bajo”.

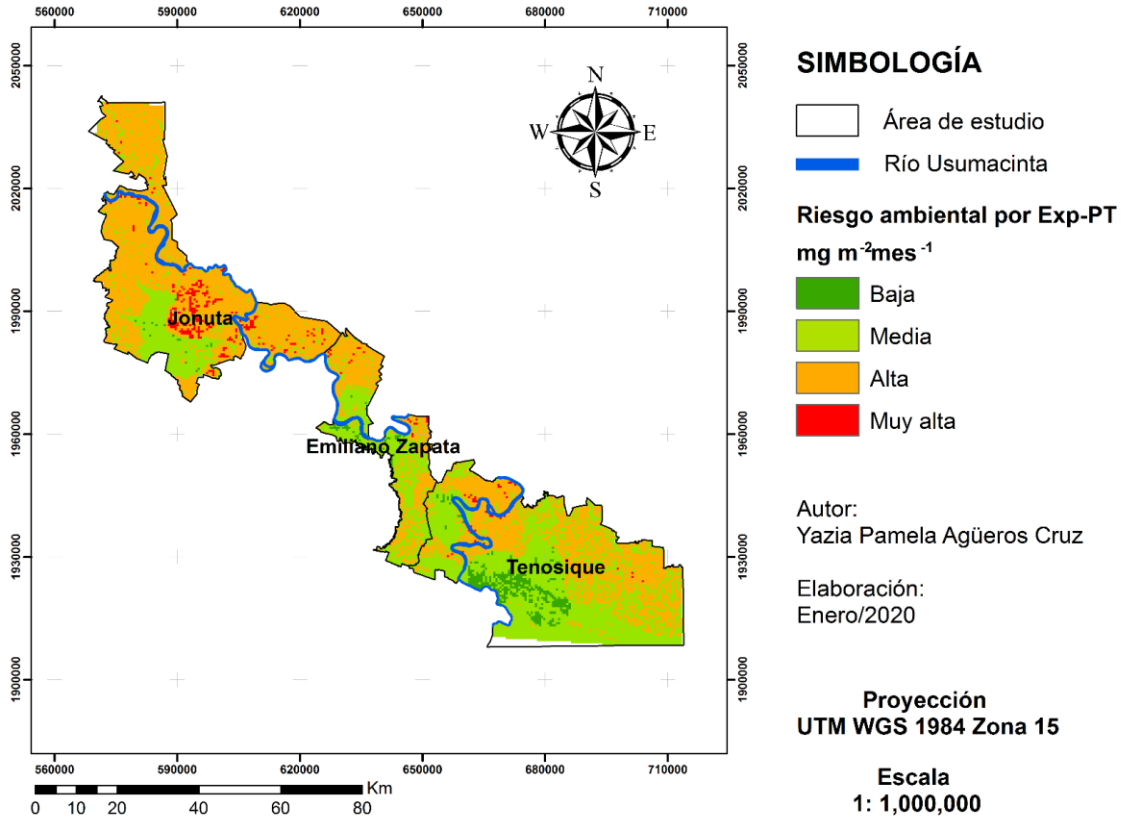


Figura 10. Identificación de zonas de riesgo ambiental por exportación de fósforo total (PT) en escorrentías agropecuarias.

8. DISCUSIÓN

8.1 Concentración de fósforo total en las escorrentías de las zonas agropecuarias

En la cuenca baja predominan dos temporadas climáticas; estiaje (marzo-abril) y lluvias durante casi todo el año. De acuerdo a la carta climática de INEGI (2008), Tenosique presenta la concentración mínima de 0.39 mg L^{-1}, por lo que las concentraciones de este compuesto pueden estar influenciadas por otros factores, como el relieve en la cuenca baja, que permite el transporte de estos compuestos por lixiviación dentro del perfil del suelo hacia aguas subterráneas (Moron, 1992).

A pesar de que Tenosique se localiza en una zona con alturas máximas de hasta 640 m.s.n.m., característica que favorece la escorrentía superficial y la erosión hídrica, la concentración máxima de PT se localiza en Emiliano Zapata, donde la altura máxima es de 260 m.s.n.m., seguido por Jonuta, que es la zona de menor altitud con máximas de 20 m.s.n.m. (INEGI, 2018). Las concentraciones máximas en estos municipios podrían deberse a los diversos usos de suelo en la región. El pastizal cultivado es el uso de suelo dominante en la cuenca baja, sobre todo en los márgenes del río Usumacinta (INEGI, 2017), característica que favorece la exportación del P hacia el agua superficial.

La dinámica y disponibilidad de este compuesto se ve afectada por las diversas características físicas, químicas y estructurales del suelo. Al agrupar las concentraciones de PT en diversos tipos de suelo, el arenosol presenta la concentración media máxima de 2.25 mg L^{-1}, a pesar de ser un suelo arenoso con gran capacidad de infiltración (INEGI, 2004), evidenciando una posible alteración en la composición del suelo debido a adiciones de fósforo en forma de fertilizantes. El regosol presenta una concentración media de 1.90 mg L^{-1}, de acuerdo a sus características físicas, químicas y estructurales del suelo, tiene baja capacidad de infiltración, erosión hídrica alta y puede facilitar la exportación de P (INEGI, 2004). La concentración media mínima se localiza en el suelo litosol con 0.07 mg L^{-1}, que

presenta gran capacidad de infiltración al ser un suelo rocoso y con susceptibilidad a la erosión hídrica (INEGI, 2004).

8.2 Exportación de fósforo total de las escorrentías hacia aguas superficiales

La exportación de fósforo aumenta conforme desciende la pendiente del cauce principal de la cuenca. Se aprecian diferencias entre las zonas con mayor Exp-PT. Emiliano Zapata presenta exportación “Alta” y “Media” a pesar de tener menor caudal. En Tenosique existe caudal inferior, lo cual permite inferir que existen múltiples factores que inciden en la Exp-PT a nivel de cuenca. La mayor concentración media de Exp-PT se produjo en Jonuta, que pone en manifiesto un riesgo de erosión mayor. Ocurre un desplazamiento de las partículas de arcilla y limo que ocupan los poros del suelo provocando su oclusión (Paz y Vidal, 2004).

El pastizal cultivado es el agroecosistema con mayor superficie en el área de estudio representado por 186,410.8 ha (INEGI, 2017). En el cuadro 16 se representa la pérdida de fósforo total por exportación por escorrentía superficial.

La exportación mensual de PT puede ser un factor que propicie el aumento de la concentración de este nutriente en aguas superficiales de la cuenca baja del Río Usumacinta. Las concentraciones de PT son consideradas un riesgo ambiental al rebasar los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) para la protección de la vida acuática en ríos y arroyos.

Cuadro 15. Variabilidad de la exportación de fósforo total en pastizal cultivado por municipio.

Municipio	**ha**	**Exp PT**	
		mg mes^{-1}	**Kg mes^{-1}**
Tenosique	145,441.41	11,119,956,314	11,119.96
Emiliano Zapata	73,545.54	1,012,159,295	1,012.16
Jonuta	88,304.87	20,441,954,066	20,441.95

8.3 Índice de eutrofización en agua superficial

El agua superficial se encuentra en estado mesotrófico al presentar valores del estado de eutrofia mayores a 3, en mayo de 2018. Al estimar el índice de eutrofización a partir de la exportación de fósforo total se observó que al presentarse una exportación de 400 mg m^{-2} mes^{-1} se alcanza un valor máximo del IE de cinco (Cuadro 17). Lo que indica que el agua superficial se encuentra en estado eutrófico (Moreno *et al.*, 2010). Esto trae como consecuencia una proliferación vegetal excesiva, debido a que las microalgas consumen el oxígeno del agua para respiración y durante el proceso de descomposición (López *et al.*, 2015). Este proceso consume grandes cantidades de oxígeno y provoca que las capas superficiales del cuerpo de agua se saturen, se presente un bloqueo de luz solar hacia capas inferiores y aumente la turbidez; se reduce el nivel de oxígeno y ocurre una degradación ambiental debido a la mortandad excesiva de organismos acuáticos (López *et al.*, 2015).

Cuadro 16. Índice de eutrofización a partir de la exportación de fósforo total.

Exp PT **mg m^{-2} mes^{-1}**	**I_E**
100	3.43
150	3.8
200	4.17
250	4.54
300	4.92
350	5.29
400	5.66
450	6.03
500	6.40

8.4 Zonas de riesgo ambiental por Exp-PT

La zona con riesgo ambiental “Muy alto” se encuentra localizada en el municipio de Jonuta. A pesar de ser un área con pendiente baja con una cota máxima de 20 m.s.n.m. (INEGI, 2018). Lo que indica que las concentraciones altas de estos

compuestos exportados por escorrentía superficial son el resultado de diversas actividades agropecuarias llevadas a cabo en este municipio como la ganadería de ovinos, bovinos, caprinos y porcinos, la explotación de aves y; actividades agrícolas como el cultivo de pastizal, maíz de grano, sorgo, frijol, arroz y calabaza (INEGI, 2015).

Emiliano Zapata se clasifica como una zona de “Riesgo alto” y “Riesgo medio” por tener áreas extensas dedicadas al cultivo de pastizal aprovechado en actividades ganaderas (INEGI, 2015).

Jonuta y Emiliano Zapata presentan características físicas, químicas y estructurales convierten a esta región en zonas vulnerables a la erosión hídrica, permitiendo mayores exportaciones de PT. Al fertilizar en zonas agrícolas, el Po no disminuye, pero aumenta el Pi y disminuye la actividad biológica, convirtiéndolo en P menos asimilable para las plantas, por lo que se fija en el suelo. En pastizal cultivado aumenta la materia orgánica, se convierte en fósforo asimilable y si hay un exceso, se pierde por escorrentía hasta descargarse en el río (Moron, 1992).

Finalmente, el municipio de Tenosique se clasifica con un “Riesgo bajo” ya que las concentraciones de exportación de PT registradas fueron menores a 0.53 mg m^{-2} $año^{-1}$ a pesar de ser el área con mayor pendiente con una cota máxima de 640 m.s.n.m. (INEGI, 2018).

Se observa que el riesgo ambiental aumenta conforme desciende la pendiente del cauce principal de la cuenca; esta situación, es consecuencia de la exportación excesiva de nutrientes por el cambio de cobertura vegetal nativa que está sucediendo cuenca arriba. Además, de la inadecuada disposición de los desechos sólidos y líquidos provenientes de los asentamientos humanos y de la actividad industrial (Morales y Chávez, 2010). Lo anterior, provoca que el PT sea transportado por la corriente y ponga en riesgo las zonas que se encuentran en la cuenca baja, dando como resultado el aumento de la concentración de este nutriente que provoca efectos adversos en el ecosistema como la eutrofización.

9. CONCLUSIONES

Las concentraciones de PT en las escorrentías agropecuarias rebasan los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89) para la protección de la vida acuática en ríos y arroyos.

La exportación mensual de fósforo puede ser un factor que propicie el aumento de la concentración de este nutriente en el agua superficial de la cuenca baja del río Usumacinta; y que esto se convierta en un riesgo ambiental al rebasar los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89 para concentraciones de fósforo en ríos y arroyos.

Los municipios de Jonuta y Emiliano Zapata se encuentran dentro de la categoría de riesgo ambiental “Alto”, por lo que, de acuerdo con Sherplay *et al.* (2001), se deben tomar medidas de conservación de suelos y establecer un plan de manejo para minimizar la exportación de PT por escorrentías superficiales hacia aguas superficiales. De no ser así, la zona presentará una potencial pérdida de fósforo, generando impactos negativos sobre aguas superficiales.

El uso de la geoestadística como herramienta para detectar las zonas de exportación de PT alta y muy alta, evidencia un riesgo ambiental. Es una herramienta útil en la estructuración de planes de manejo territorial y toma de decisiones ambientales. Asociar el nivel de exportación de fósforo a otras variables, como la pendiente del terreno, distancia a aguas superficiales, tipo de suelo y uso de suelo; coadyuva a una evaluación completa utilizando métodos para el análisis de riesgos ambientales.

10. ALTERNATIVAS DE CONTROL

Los efectos de una fertilización fosfatada en sus diferentes formas dependen de la fuente de los nutrientes y la dosis del fertilizante aplicado. La implementación de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPAs) propuestas por la FAO (2004); consisten en la aplicación del conocimiento disponible para la utilización sostenible de los recursos naturales básicos para la producción de productos agrícolas alimentarios y no alimentarios inocuos y saludables. Dentro de las recomendaciones de las BPAs se incluye un plan de fertilización por cultivo para lograr un óptimo aprovechamiento de los nutrientes en el suelo; considerando el tipo del mismo y los residuos mineralizados. De esta forma, se puede seleccionar la fuente, dosis (según las necesidades del cultivo), momento y tecnología de aplicación más adecuada de los fertilizantes. A partir de un análisis del suelo, clima y manejo se obtiene conocimiento de las necesidades nutricionales del cultivo (FAO, 2004).

En zonas cercanas a cuerpos de agua (río, arroyo, laguna) se pueden destinar zonas buffer o protectoras, esta práctica consiste en dejar franjas de terreno sin cultivar (entre 10 y 150 m) que deberán mantener vegetación natural (árboles y pastizales) sin fertilizar. Estas franjas funcionan como trampas de sedimentos en periodos de escurrimientos y erosión hídrica, controlando la exportación de fósforo (INTA, 2010). La agroforestería permite que los cultivos y el ganado se críen conjuntamente con los árboles dentro de las parcelas agrícolas o en sus límites; esto aumenta la absorción de los nutrientes por las plantas y la retención por medio de las raíces; lo que disminuye la exportación de nutrientes. Existen diversos diseños de cultivos agroforestales, como el cultivo en hileras. Los sistemas pueden variar entre monocultivo y cultivos mixtos (INTA, 2010).

Cuando los suelos son pobres en materia orgánica, la retención de agua y nutrientes es limitada. Aplicar técnicas de incorporación de residuos de los cultivos como la paja de cereales o residuos de otros cultivos como girasol u horticultura, o biomasa que surge de la tala y la poda de cultivos permanentes aumenta el contenido de

materia orgánica, reduciendo la lixiviación y la escorrentía de nutrientes mediante una mayor absorción por parte de las plantas y retención por parte de las raíces (Lukat y Sarteel, 2012).

El proyecto Red SICTA (2012) en conjunto con Cooperación Suiza en América central propone la construcción de acequias o zanjas a nivel (canales que se construyen a nivel, en dirección transversal a la pendiente, para retener, conservar y ayudar a infiltrar el agua de lluvia que cae sobre las laderas). La aplicación del fertirriego por goteo subsuperficial obliga a la raíz a crecer más profundo, lo que le da más soporte a la parte aérea y permitiría aplicar menor cantidad de P y otros nutrimentos directamente en la zona activa de raíces, con la consiguiente mayor eficiencia de recuperación nutrimental (Aguilar-Acuña *et al.*, 2006).

La rotación de cultivos se caracteriza por un sistema secuencial sobre tierra cultivada, prácticas administrativas y programación de rotación que constituyen de uno o dos cultivos principales, seguido de una o más legumbres u otros cultivos secundarios como los energéticos. Como resultado, genera a largo plazo mejores condiciones agroecológicas, cambios en las propiedades edáficas e incrementa la materia orgánica en el suelo, aumentando el rendimiento de los cultivos (Gutiérrez, *et al.*, 2015).

Al aplicar las buenas prácticas de manejo agrícola, los productores están preparados para exportar a mercados exigentes, mejorando las oportunidades y los precios, ya que se obtiene un valor agregado ambiental para los productos agropecuarios, a partir de poner en evidencia la adopción de métodos de producción que dan satisfacción a las preocupaciones de los consumidores por los temas ambientales. Existe una diversidad de enfoques de sistemas de producción, por ejemplo, las normas de la serie ISO 14001, que constituyen un sistema de gestión ambiental reconocido internacionalmente (FAO, 2004).

Una alternativa a las pérdidas de P y N del estiércol ganadero es la separación de los purines en humedales captadores de nutrientes para pequeños y medianos productores; donde se logran separar: una fracción líquida rica en nitrógeno y una fracción sólida rica en fósforo. La construcción de humedales ayuda a captar los nutrientes que están en el agua de drenaje o en la escorrentía antes de que lleguen a las masas de agua (Lukat y Sarteel, 2012). Se ha adaptado el contenido de fósforo en las dietas, de acuerdo a las necesidades de los animales durante las diferentes etapas de vida (alimentación por fases) y se ha añadido la enzima fitasa a la alimentación del ganado monogástrico, con la cual los animales procesan el fósforo con más eficiencia contribuyendo a reducir el contenido de este compuesto en los piensos (COM, 2013).

Existen tecnologías que permiten recuperar el fósforo de las plantas de tratamiento de aguas residuales y aplicarlos directamente a los campos después de un tratamiento adecuado a los cultivos. El potencial total de recuperación es muy alto, aproximadamente trescientas mil toneladas de fósforo al año en la Unión Europea (COM, 2013).

LITERATURA CITADA

Aguilar-Acuña, J., Martinez, J., Volke, V., Etchevers, J., Mata, H. y Hernandez, M. (2006). Distribución del fósforo en suelo, raíces y materia seca de tubérculos de papa cultivada con fertirriego. *Terra Latinoamericana.* 24(2), 269-276.

Ávila, H., Tudares, C., Sánquiz, M., Araujo, M., Morales, N., Rojas, J., & Pirela, D. (2007). Nitrógeno y fósforo en aguas superficiales de la parte baja del río Catatumbo. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, *30*(ESPECIAL), 29–35.

Barioglio, C. (2006). Diccionario de las Ciencias Agropecuarias. Encuentro Grupo Editor. 1ª ed. Argentina. 473 p.

Cárdenas, P. (2007). *Cambios en la exportación y retención de nitrógeno y fósforo causado por la conversión de bosque nativo a plantaciones forestales en microcuencas de la cordillera de la costa en el sur de chile.* Facultad de ciencias. Universidad Austral de Chile. 75 p.

Carpenter, S., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Contaminación no puntual de aguas superficiales con fósforo y nitrógeno. *Tópicos En Ecología*, *3*, 20.

Cerón Rincón, L. E., & Ancízar Aristizábal Gutiérrez, F. (2012). Nitrogen and phosphorus cycles dynamics in Soils. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *14*(1), 285–295.

Chalar, G. (2006). Dinámica de la eutrofización a diferentes escalas temporales: Embalse Salt Grande (Argentina-Uruguay). *InterAmerican Network of Academies of Sciences*, 87–101.

COM (2013), Comunicación consultiva sobre el uso sostenible del fósforo. Comisión Europea. Bruselas.

Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R. & Ríos, E. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.* México D.F., Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.

FAO (2004). Las Buenas Prácticas Agrícolas. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Disponible en: http://www.rlc.fao.org/es/agricultura/bpa/docfao/110.doc

FAO (2004). Las Buenas Prácticas Agrícolas. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Disponible en: http://www.rlc.fao.org/es/agricultura/bpa/docfao/110.doc

Fernández, M. (2011). Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas. In *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola* (pp. 25–31).

Fixen, P. (2003). Dinámica del fósforo en el suelo y en el cultivo en relación al manejo de los fertilizantes fosfatados, 11.

Flores, H., Figueroa, U., De La Mora, C., Núñez, G. y Valdivia, L. (2014). Evaluación y calibración del índice de fósforo en los Altos de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3)

Gutiérrez, E., Gutiérrez, M. y Ortiz, C. (2015). Manejo integrado de nutrientes en sistemas agrícolas intensivos: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 6(1), 201-215.

Iida, C. L., & Shock, C. C. (2009). *El dilema del fósforo*. *Técnicas para la agricultura sostenible*. Oregón.

INEGI (2004). Guía para la interpretación de cartografía: edafología. INEGI, México. 27 pp.

INEGI (2017). Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie VI. INEGI, México. 210 pp.

INEGI (2018). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica digital, por condensado estatal: ESCALA 1:250,000: serie V. México.

INEGI (2019). Relieve continental. 16 de enero de 2020. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2010). Guía de buenas prácticas para el manejo de nutrientes (P y N) en la pampa ondulada. Argentina.

Ize, I., Zuk, M. y Rojas, L. (2010). *Introducción al análisis de riesgos ambientales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2da edición. Instituto Nacional de Ecología. México. 220 p.

Jayme Torres, G. (2014). *Movilización de nitrógeno y fósforo en la cuenca hidrológica del río Verde*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Lisboa, M. (2016). *Estudio ambiental de nutrientes Pai – Cerro Pelado*.

López Cortés, D. J., Bustilloos Guzmán, J. J., Hernández Sandoval, F. E., Chávez López, S., Band Schmidt, C. J., & Núñez Vázquez, E. J. (2015). Florecimientos algales nocivos: prevención, control y mitigación. *Recursos Naturales y Sociedad*, 4, 35–49

López Cortés, D. J., Bustillos Guzmán, J. J., Hernández Sandoval, F. E., Chávez López, S., Band Schmidt, C. J., & Núñez Vázquez, E. J. (2015). Florecimientos algales nocivos: prevención, control y mitigación. *Recursos Naturales y Sociedad*, *4*, 35–49.

López, C. (2008). *Efectos agronómicos y ambientales de la fertilización en el cultivo de patata en A Limia (Ourense).* Universidad de Santiago de Compostela.

Lukat, E. y Sarteel, M. (2012). Buenas prácticas para reducir la pérdida de nutrientes en la región de Murcia (España). Comisión Europea.

Lukat, E. y Sarteel, M. (2012). Buenas prácticas para reducir la pérdida de nutrientes en la región de Murcia (España). Comisión Europea.

March, I. & Castro, M. (2010). La Cuenca del Río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. En H. Cotler Ávalos, Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y Priorización. México: Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V.

Martinez-Fernandez, J., Fitz, C., Esteve-Selma, M.-A., Guaita, N., & Martínez-López, J. (2013). Modelización del efecto de los cambios de uso sobre los flujos de nutrientes en cuencas agrícolas costeras: el caso del Mar Menor (Sudeste de España). *Revista Ecosistemas*, *22*(3), 84–94.

Monserrate, F., Pachón, H., Hyman, G. y Vesga, A. (2009). Metodología para seleccionar zonas de intervención con cultivos biofortificados. Rev. Panam Salud Pública. 26(5): 419-428.

Oyarzun, C. E., Campos, H., & Huber, A. (1997). Exportación de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en el sur de Chile (Lago Rupanco, X Región). *Revista Chilena de Historia Natural*, *70*, 507–519.

Palacios Manzano, D. E. (2017). *Evaluación del ingreso y exportación de nutrientes en la cuenca de páramo andino del río Quinua*s. Universidad de Cuenca Ecuador.

Paz, Antonio y Vidal, E. (2004). Erosión y escorrentía. *XIX Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo*, (June 2004), 11.

Ramalho, R. S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales.* 2da edición. Editorial REVERTÉ. España. 697 p.

Ramos, R., Sepulveda, R. & Villalobos, F. (2003*). Agua en el ambiente: muestreo y análisis.* Plaza & Valdés, S.A de C.V., Mexico, D.F. 210 p.

Rivas, Z., Sánchez, J., Troncone, F., Márquez, R., De Medina, H. L., Colina, M., & Gutiérrez, E. (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de maracaibo, Venezuela. *Interciencia*, *34*(5), 308–314.

Saavedra, A., Lopez, D. & Castellanos, L. (2015). *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona. 25 años de actividades y experiencias.* México, Natura y Ecosistemas Mexicanos*.*

Sánchez-Hernández, R., Mendoza-Palacios, J. D. D., De la Cruz Reyez, J. C., Mendoza Martínez, J. E., & Rodimiro, R.-R. (2013). Mapa de erosión potencial en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG. *29*(2), 153–161.

Sharpley, A., McDowell, R. & Kleinman, P. (2001). Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. *Plant and Soil, 237*, 287-307.

SICTA (2012). Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central.

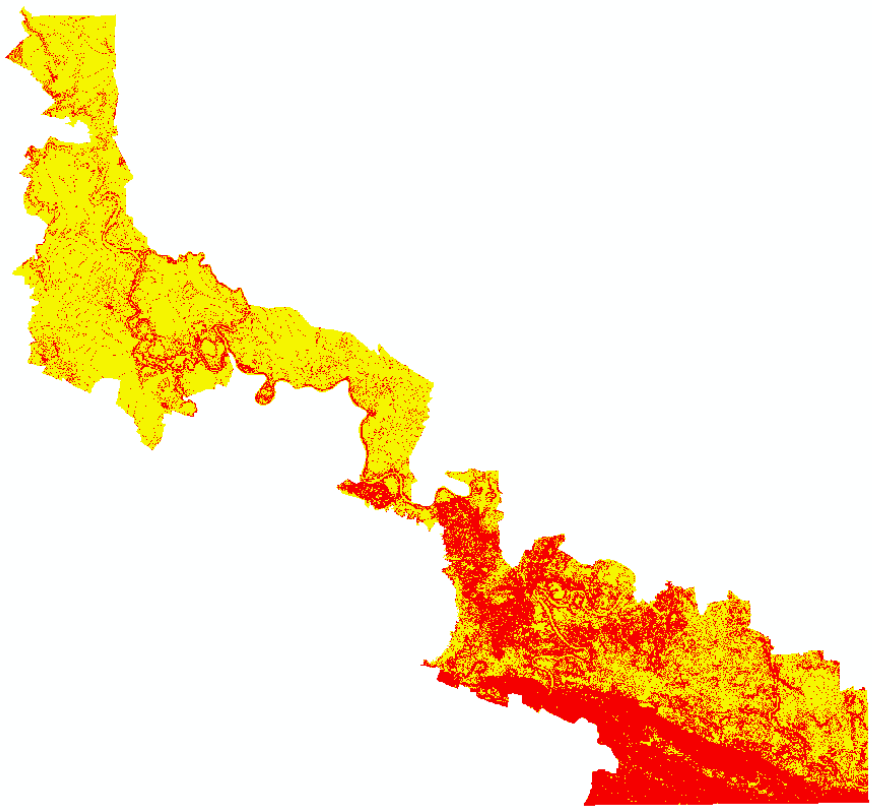
Vicente, I., & Cruz-Pizarro, L. (2003). Estudio de la carga externa e interna de fósforo y aplicación de modelos empíricos de eutrofización en las aguas de la Albufera de Adra. *Limnetica*, *23*, 169–185.

Villanueva Beltrán, J. T. (2011). *Evaluación de la carga externa de fósforo y nitrógeno en la presa valle de bravo y propuesta de solución*. Universidad Nacional Autónoma de México.

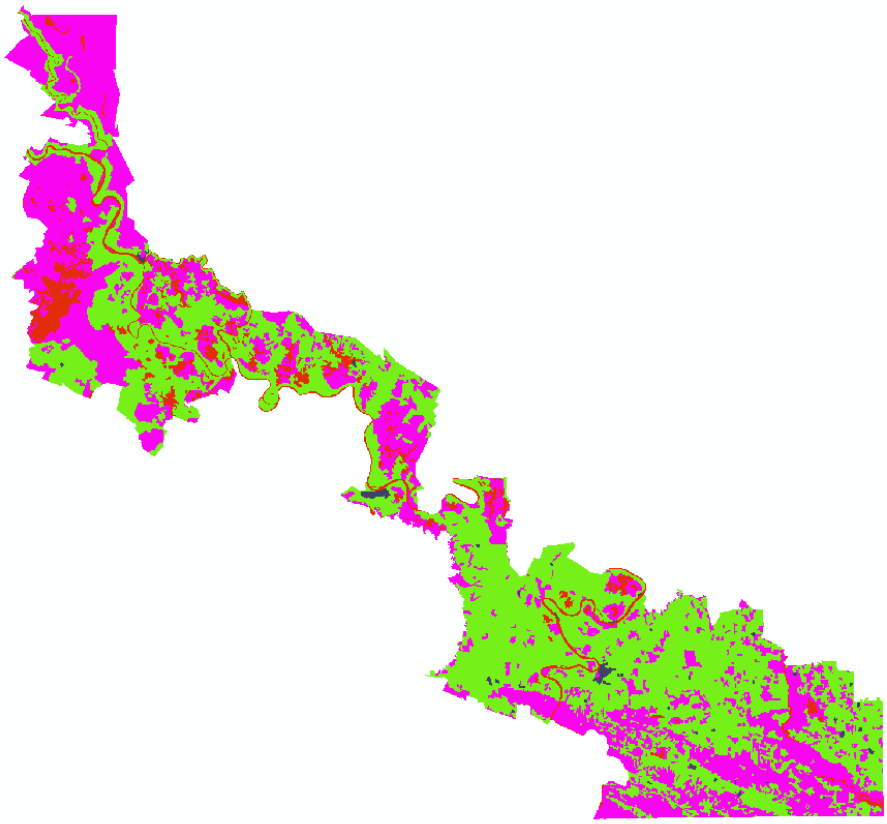
ANEXOS

Anexo 1. Río Usumacinta en municipio de Jonuta, Tab.

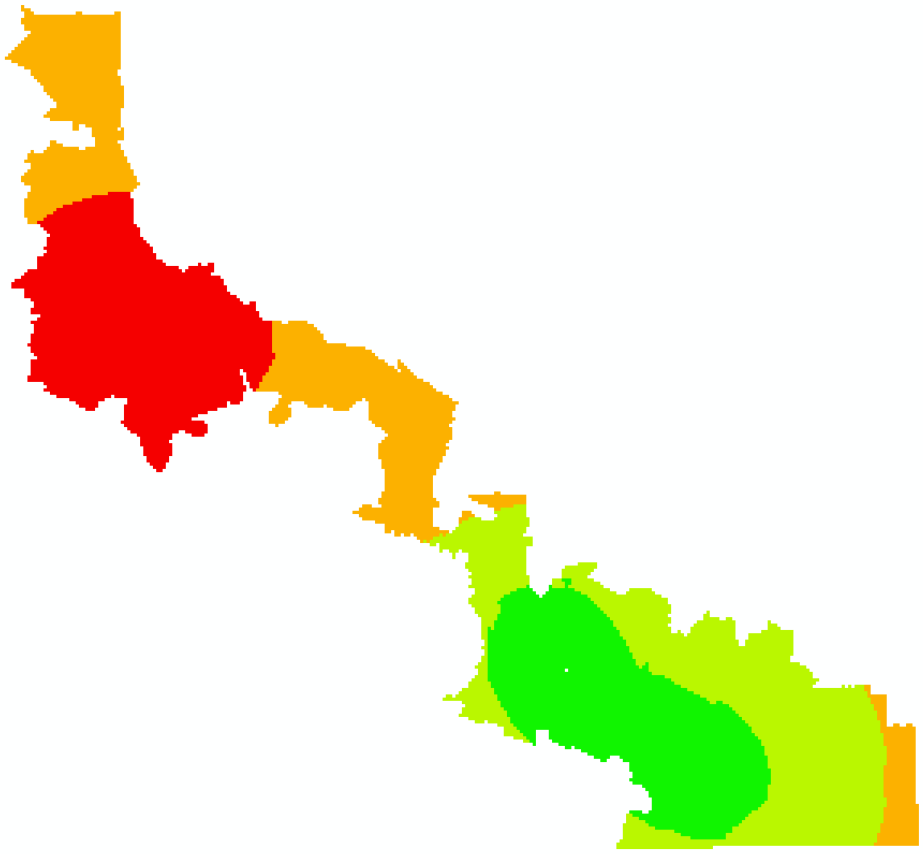
Anexo 2. Instalación de dispositivo Storm Water Sampler.



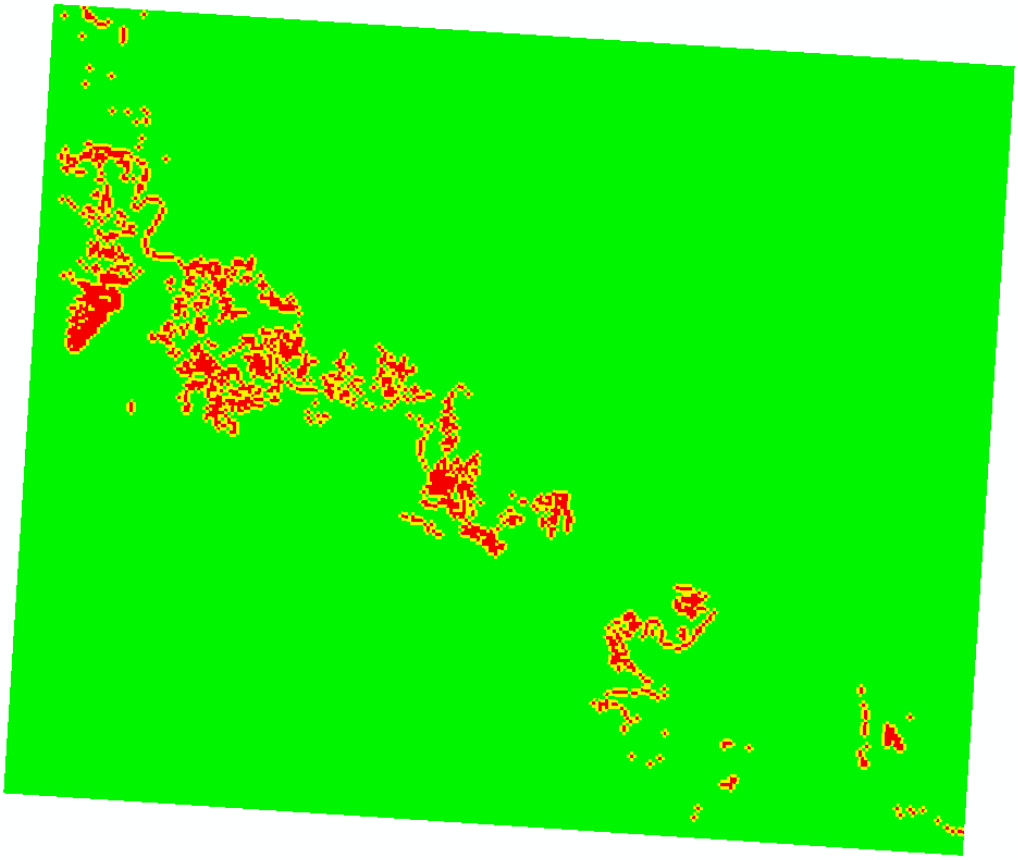
Anexo 3. Ráster de la pendiente en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab.



Anexo 4. Ráster de Uso de suelo y Vegetación de la cuenca baja del río Usumacinta, Tab.



Anexo 5. Ráster de la Exportación de fósforo total PT en la cuenca baja del río Usumacinta, Tab.



Anexo 6. Ráster de proximidad al río Usumacinta, Tab.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

Anexo 7. NMX-AA-029-SCFI-2001

ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-029-1981)

WATERS ANALISIS - DETERMINATION OF TOTAL PHOSPHORUS IN NATURAL, WASTEWATERS AND WASTEWATERS TREATED - TEST METHOD

0 INTRODUCCIÓN

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órganofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece dos métodos de análisis para la determinación de fósforo total en aguas residuales, naturales y residuales tratadas.

2 PRINCIPIO DEL MÉTODO

2.1 Método cloruro estanoso

Este método se basa en la reacción del fósforo contenido en la muestra como ortofosfato con el ácido molíbdico para formar el ácido 12-molibdofosfórico según la reacción:

$$H_3PO_4 + 12\ (NH_4)_2MoO_4 + 21\ H^+ \leftrightarrow (NH_4)_3PO_4 \bullet 12\ MoO_3 + 21\ NH_4^+ + 12\ H_2O$$

El ácido 12-molibdofosfórico es reducido por el cloruro de estaño a azul de molibdeno, compuesto de composición desconocida que contiene una mezcla de Mo (VI) y Mo (V), que absorbe a 690 nm. La intensidad del color azul formado depende de la concentración de fosfatos adicionados al heteropoliácido. El método es aplicable cuando el contenido de fósforo en las muestras se encuentra entre las concentraciones de 0,01 mg P/L a 6,0 mg P/L.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

Todo el fósforo contenido en la muestra debe estar como ión ortofosfato $(PO_4)^{3-}$, ya que el método espectrofotométrico es esencialmente específico para este ión ortofosfato $(PO_4)^{3-}$. La materia orgánica de la muestra es destruida por medio de una digestión con persulfato de amonio y ácido sulfúrico, rompiendo las ligaduras orgánicas del fósforo (C-P y/o C-O-P), e hidrolizando los polifosfatos a ortofosfatos.

2.2 Método ácido vanadomolibdofosfórico

En una disolución diluida de ortofosfatos, el molibdato de amonio reacciona en condiciones ácidas con el vanadato para formar un heteropoliácido, ácido vanadomolibdofosfórico. En la presencia de vanadio, se forma ácido vanadomolibdofosfórico de color amarillo. La longitud de onda a la cual la intensidad del color es medida depende de la detección requerida. La intensidad del color amarillo es directamente proporcional a la concentración de fosfato.

3 DEFINICIONES

Para los propósitos de esta norma se establecen las siguientes definiciones:

3.1 Aguas naturales

Se define como agua natural el agua cruda, subterránea, de lluvia, de tormenta, residual y superficial.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

3.2 Aguas residuales

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas.

3.3 Análisis de blanco analítico

Es el someter una alícuota de agua reactivo a todo el proceso de análisis por el cual pasa una muestra real. Los laboratorios deben realizar los análisis de blancos para corregir la señal de fondo del sistema de medición. El análisis de blancos se realiza en forma periódica o con cada lote de muestras según lo requiera el método.

3.4 Bitácora

Cuaderno de laboratorio debidamente foliado e identificado, en el cual los analistas anotan todos los datos de los procedimientos que siguen en el análisis de una muestra, así como todas las informaciones pertinentes y relevantes a su trabajo en el laboratorio. Es a partir de dichas bitácoras que los inspectores pueden reconstruir el proceso de análisis de una muestra tiempo después de que se lleva a cabo.

3.5 Blanco

Agua reactivo o matriz equivalente a la que no se le aplica ninguna parte del procedimiento analítico y sirve para evaluar la señal de fondo.

3.6 Blanco analítico o de reactivos

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

Agua reactivo o matriz equivalente que no contiene, por adición deliberada, la presencia de ningún analito o sustancia por determinar, pero que contiene los mismos disolventes, reactivos y se somete al mismo procedimiento analítico que la muestra problema.

3.7 Calibración

Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento o sistema de medición, o los valores representados por una medida materializada y los valores correspondientes de la magnitud, realizados por los patrones, efectuando una corrección del instrumento de medición para llevarlo a las condiciones iniciales de funcionamiento.

3.8 Descarga

Resultado de la acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público de la nación.

3.9 Desviación estándar experimental

Para una serie de n mediciones del mismo mensurando, es la magnitud *s* que caracteriza la dispersión de los resultados, dado por la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

En donde: x_i es el resultado de la i-ésima medición y es la media aritmética de los n resultados considerados.

3.10 Disolución estándar

Disolución de concentración conocida preparada a partir de un patrón primario.

3.11 Disolución madre

Corresponde a la disolución de máxima concentración en un análisis. Es a partir de esta disolución que se preparan las disoluciones de trabajo.

3.12 Exactitud

Proximidad de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando.

3.13 Límite de cuantificación del método (LCM)

Es la menor concentración de un analito o sustancia en una muestra que puede ser cuantificada con precisión y exactitud aceptables bajo las condiciones en que se lleva a cabo el método.

3.14 Límite de detección del método (LDM)

Es la mínima concentración de un analito o sustancia en una muestra, la cual puede ser detectada pero no necesariamente cuantificada bajo las condiciones en que se lleva a cabo el método.

3.15 Material de referencia

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

Material o substancia en el cual uno o más valores de sus propiedades son suficientemente homogéneas y bien definidas, para ser utilizadas para la calibración de aparatos, la evaluación de un método de medición, o para asignar valores a los materiales.

3.16 Material de referencia certificado

Material de referencia, acompañado de un certificado, en el cual uno o más valores de las propiedades están certificados por un procedimiento que establece la trazabilidad a una realización exacta de la unidad en la cual se expresan los valores de la propiedad, y en el que cada valor certificado se acompaña de una incertidumbre con un nivel declarado de confianza.

3.17 Medición

Conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud.

3.18 Mensurando

Magnitud particular sujeta a medición.

3.19 Muestra compuesta

La que resulta de mezclar un número de muestras simples. Para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una de las muestras simples debe ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

3.20 Muestra simple

La que se tome en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente él o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento de muestreo.

3.21 Parámetro

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad del agua.

3.22 Patrón (de medición)

Material de referencia, instrumento de medición, medida materializada o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud para utilizarse como referencia.

3.23 Patrón de referencia

Patrón, en general de la más alta calidad metrológica disponible en un lugar dado, o en una organización determinada del cual se derivan las mediciones realizadas en dicho lugar.

3.24 Patrón de trabajo

Patrón que es usado rutinariamente para calibrar o controlar las medidas materializadas, instrumentos de medición o los materiales de referencia.

3.25 Patrón nacional (de medición)

Patrón reconocido por una decisión nacional en un país, que sirve de base para asignar valores a otros patrones de la magnitud concerniente.

3.26 Patrón primario

Patrón que es designado o reconocido ampliamente como un patrón que tiene las más altas cualidades metrológicas y cuyo valor es aceptado sin referencia a otros patrones de la misma magnitud.

3.27 Patrón secundario

Patrón cuyo valor es establecido por comparación con un patrón primario de la misma magnitud.

3.28 Precisión

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

Es el grado de concordancia entre resultados analíticos individuales cuando el procedimiento analítico se aplica repetidamente a diferentes alícuotas o porciones de una muestra homogénea. Usualmente se expresa en términos del intervalo de confianza o incertidumbre:

$$x = \bar{x} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

donde:

$\bar{x}$ es la media calculada a partir de un mínimo de tres mediciones independientes;

$t_{\alpha/2}$ es el valor de la *t* de Student para un nivel de significancia del 95 %;

s es la desviación estándar de la muestra;

n es el número de réplicas, y

x es el resultado que incluye el intervalo de confianza.

3.29 Trazabilidad

Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón por la cual pueda ser relacionado a referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

3.30 Verificación de la calibración

Una verificación periódica de que no han cambiado las condiciones del instrumento en una forma significativa.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

4 REACTIVOS Y PATRONES

Todos los productos químicos usados en este método deben ser grado reactivo analítico, a menos que se indique otro grado.

Agua: Debe entenderse agua que cumpla con las siguientes características:

a) Resistividad, megohm-cm a 25ºC: 0,2 min.;
b) Conductividad, μS/cm a 25ºC: 5,0 máx., y
c) pH: 5,0 a 8,0.

4.1 Generales

4.1.1 Fosfato monobásico de potasio anhidro (KH_2PO_4)

4.1.2 Disolución madre de fosfato. Pesar aproximadamente y con precisión 219,5 mg de fosato monobásico de potasio anhidro previamente secado a 105ºC durante dos horas, aforar con agua a 1 L; 1,0 mL = 50,0 μg de P como PO_4^{3-}.

4.1.3 Fenolftaleína

4.1.4 Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

4.1.5 Persulfato de amonio [$(NH_4)_2S_2O_8$] o persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$)

4.1.6 Hidróxido de sodio (NaOH)

4.1.7 Disolución de ácido fuerte. Cuidadosamente adicionar 300 mL de ácido sulfúrico concentrado (ver inciso 4.1.4) a aproximadamente 600 mL de agua. Dejar enfriar y agregar 4 mL de ácido nítrico concentrado y aforar a 1 L con agua.

4.2 Método cloruro estanoso

4.2.1 Ácido nítrico concentrado(HNO_3)

4.2.2 Glicerol ($C_3H_8O_3$)

4.2.3 Cloruro estanoso dihidratado ($SnCl_2 \bullet 2H_2O$)

4.2.4 Heptamolibdato de amonio tetrahidratado [$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \bullet 4H_2O$]

4.2.5 Disolución de ácido fuerte: Cuidadosamente adicionar 300 mL de ácido sulfúrico concentrado (ver inciso 4.1.4) a aproximadamente 600 mL de agua. Dejar enfriar y agregar 4 mL de ácido nítrico concentrado y aforar a 1L con agua.

4.2.6 Disolución de cloruro estanoso: Pesar aproximadamente y con precisión 2,5 g de cloruro estanoso dihidratado (ver inciso 4.2.3) y disolver en 100 mL de glicerol. Calentar en baño de agua y agitar con una varilla de vidrio. El reactivo

es estable y no requiere de la adición de conservadores o almacenamiento especial.

4.2.7 Disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado: Disolver 25 g de heptamolibdato de amonio tetrahidratado (ver inciso 4.2.4) en 75 mL de agua. Con mucho cuidado agregar 280 mL de ácido sulfúrico (ver inciso 4.1.4) a 400 mL de agua, enfriar y adicionar al heptamolibdato de amonio tetrahidratado y diluir a 1 L.

4.3 Método vanadomolibdofosfórico:

4.3.1 Carbón activado libre de fosfatos

4.3.2 Ácido clorhídrico concentrado (HCl)

4.3.3 Metavanadato de amonio (NH_4VO_3)

4.3.4 Hidróxido de sodio (NaOH)

4.3.5 Ácido clorhídrico (1:1). Agregar cuidadosamente 100 mL de ácido clorhídrico concentrado (ver inciso 4.3.2) a 100 mL de agua, lentamente. La concentración del ácido no es crítica para la determinación, pero se recomienda una concentración final en la muestra de 0,5 N.

4.3.6 Disolución A. Pesar aproximadamente y con precisión 25,0 g de heptamolibdato de amonio (ver inciso 4.2.4), y diluir en 300 mL de agua.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

4.3.7 Disolución B. Pesar aproximadamente y con precisión 1,25 g de metavanadato de amonio (ver inciso 4.3.3) y diluir en 300 mL de agua destilada, calentar hasta ebullición. Enfriar y añadir 330 mL de ácido clorhídrico concentrado (ver inciso 4.3.2). Dejar enfriar a temperatura ambiente.

4.3.8 Disolución reactivo vanado-molibdato: Adicionar la disolución A (ver inciso 4.3.6) a la disolución B (ver inciso 4.3.7), mezclar y aforar a 1 L.

4.3.9 Disolución de hidróxido de sodio (1N). Pesar aproximadamente y con precisión 40 g de hidróxido de sodio (ver inciso 4.3.4) y diluir con 500 mL de agua, agitar y dejar enfriar, agregar más agua y en cada ocasión agitar y dejar enfriar hasta que el volumen final sea de 1 L.

5 EQUIPO Y MATERIALES

Sólo se mencionan los equipos y materiales que son de relevancia para este método.

5.1 Equipo

5.1.1 Balanza analítica con precisión de 0,1 mg.

5.1.2 Placa de calentamiento: Una superficie de 30 cm X 50 cm es adecuada.

5.1.3 Autoclave: Puede utilizarse un autoclave capaz de alcanzar de 98 kPa a 137 kPa en lugar de la placa de calentamiento.

5.1.4 Espectrofotómetro: Para utilizarse de 190 nm a 900 nm y equipado con celda de 1 cm de paso óptico de luz.

5.2 Materiales

Todo el material volumétrico utilizado en este procedimiento debe ser clase A con certificado o en su caso debe estar calibrado.

5.2.1 Embudo de filtración y papel filtro cualitativo Whatman 42 o equivalente.

6 RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

6.1 Tomar un mínimo de 500 mL de muestra en envases de plástico. Pueden utilizarse muestras compuestas o simples.

6.2 Si la muestra solamente es analizada para determinar la forma de fósforo disuelto, filtrar la muestra inmediatamente después de la colecta a través de un papel filtro de poro fino.

6.3 Conservar en refrigeración a 4°C.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

6.4 El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 28 días.

7 CONTROL DE CALIDAD

7.1 Cada laboratorio que utilice este método debe operar un programa de control de calidad (CC) formal.

7.2 El laboratorio debe mantener los siguientes registros:

- Los nombres y títulos de los analistas que ejecutan los análisis y el encargado de control de calidad que verifica los análisis, y
- Las bitácoras manuscritas del analista y del equipo en los que se contengan los siguientes datos:

a) Identificación de la muestra;

b) Fecha del análisis;

c) Procedimiento cronológico utilizado;

d) Cantidad de muestra utilizada;

e) Número de muestras de control de calidad analizadas;

f) Trazabilidad de las calibraciones de los instrumentos de medición;

g) Evidencia de la aceptación o rechazo de los resultados, y

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

h) Además el laboratorio debe mantener la información original reportada por los equipos en disquetes o en otros respaldos de información.

De tal forma que permita a un evaluador externo reconstruir cada determinación mediante el seguimiento de la información desde la recepción de la muestra hasta el resultado final.

7.3 Cada vez que se adquiera nuevo material volumétrico debe de realizarse la verificación de la calibración de éste tomando una muestra representativa del lote adquirido.

8 CALIBRACIÓN

Se debe contar con un registro de verificación de la calibración de los equipos y materiales siguientes:

8.1 Material volumétrico

8.2 Balanza analítica con precisión de 0,1 mg

8.3 Espectrofotómetro. Para utilizarse de 190 nm a 900 nm y equipado con celda de 1 cm de paso óptico de luz.

8.4 Método cloruro estanoso

Curva de calibración para un intervalo de trabajo de 0,3 mg/L a 2,0 mg/L. Preparar las

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

disoluciones estándar con un mínimo de 4 puntos en un intervalo entre 0,3 mg P/L a 2,0 mg P/L en matraces volumétricos de 100 mL y desarrollar el color como se indica en el capítulo 9 Procedimiento.

8.5 Método vanadomolibdofosfórico

Curva de calibración para un intervalo de trabajo entre 1,0 mg/L a 20,0 mg/L: Preparar las disoluciones estándar un mínimo de 4 puntos en el intervalo de 1,0 mg/L a 20,0 mg/L en matraces volumétricos de 100 mL y desarrollar el color como se indica en el capítulo 9 Procedimiento.

9 PROCEDIMIENTO

9.1 Digestión de la muestra

Preparación de la muestra por medio de la digestión con persulfato:

9.1.1 Usar 50 mL o la porción adecuada de la muestra bien mezclada. Adicionar una gota de fenolftaleína (ver inciso 4.1.3). Si aparece un color rojo, adicionar gota a gota ácido sulfúrico concentrado (ver inciso 4.1.4) hasta que desaparezca el color. Posteriormente adicionar 1 mL de disolución de ácido fuerte (ver inciso 4.1.7) y 0,4 g de persulfato de amonio o 0,5 g persulfato de potasio (ver inciso 4.1.5).

9.1.2 Calentar hasta que rompa la ebullición y mantenerla sobre la placa de calentamiento, por 30 min o 40 min o hasta que el volumen final alcanzado sea de 10 mL. Los compuestos organofosforados pueden requerir de 1,5 h a 2 h para su digestión completa. Enfriar, diluir a 30 mL con agua, adicionar una gota de fenolftaleína (ver inciso 4.1.3), y neutralizar hasta desvanecer a un color rosa

pálido con la disolución de hidróxido de sodio (ver inciso 4.3.9). Alternativamente, calentar por 30 min en un autoclave u olla de presión de 98 kPa a 137 kPa. Enfriar, añadir una gota de fenolftaleína y neutralizar hasta desvanecer a un color rosa pálido con la disolución de hidróxido de sodio (ver inciso 4.3.9). Aforar a 100 mL con agua destilada. En algunas muestras puede formarse un precipitado en esta fase, pero no se debe filtrar. Mezclar bien para cualquier subdivisión de la muestra. El precipitado (posiblemente de fosfato de calcio) se redisuelve bajo condiciones ácidas de la prueba colorimétrica para determinar fósforo.

9.2 Método cloruro estanoso

9.2.1 Ajustar el pH de la muestra. A 100 mL de muestra que contenga no más de 200 μg P y libre de color y turbidez adicionar 1 gota de fenolftaleína (ver inciso 4.1.3). Si la disolución tiene un color rosado, adicionar unas cuantas gotas de disolución de ácido fuerte (ver inciso 4.1.7) para neutralizar.

9.2.2 Desarrollo del color en la muestra. Adicionar, agitando fuertemente después de cada adición, 4,0 mL de disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado (ver inciso 4.2.7) y 0,5 mL (10 gotas) de disolución de cloruro estanoso (ver inciso 4.2.6). La intensidad del color depende de la temperatura ambiente de la disolución final, incrementándose ésta alrededor de 1 % por cada grado centigrado más de temperatura ambiente. Por lo que es importante realizar las mediciones a la misma temperatura.

9.2.3 Medición de color. El tiempo en el cual se realiza la medición es importante para tener un buen resultado, la medición debe de efectuarse después de 10 min de haber desarrollado el color, pero antes de 12 min, utilizar el mismo intervalo de tiempo para todas las mediciones, medir la intensidad de color espectrofotométricamente a 690 nm y comparar contra la curva de calibración, utilizar como blanco agua.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

NOTA.- Es necesario tener un blanco de agua y un blanco de reactivos. Debido a que el color se desarrolla primero de manera progresiva y posteriormente se desvanece, mantener siempre condiciones iguales de tiempos de desarrollo de color y medición para muestras y estándares. Preparar al menos un estándar por cada lote de muestras o una cada día que se realiza la prueba. La curva de calibración es lineal en un intervalo de concentraciones de 0,3 mg/L a 2,0 mg/L.

9.3 Método ácido vanadomolibdofosfórico

9.3.1 Ajustar el pH de la muestra. Si la muestra tiene un pH mayor a 10, adicionar una gota de fenolftaleína (ver inciso 4.1.3) a 50,0 mL de la muestra y después eliminar el color rosa con una disolución de ácido clorhídrico (1:1) (ver inciso 4.3.5), antes de diluir a 100 mL.

9.3.2 Remoción del color de las muestras. Remover el exceso de color en las muestras por medio de la adición de 200 mg de carbón activado (ver inciso 4.3.1) a una muestra de 50 mL en un matraz Erlenmeyer y agitar por 5 min, posteriormente filtrar para remover el carbón activado. Comprobar los fosfatos de cada lote de carbón activado.

9.3.3 Desarrollo del color en la muestra. Tomar una alícuota que contenga de 0,05 mg a 1,0 mg de fósforo, en un matraz volumétrico de 50 mL. Añadir 10 mL de la disolución reactivo vanado-molibdato (ver inciso 4.3.8) y diluir hasta la marca con agua. Preparar un blanco usando una cantidad de agua equivalente a la alícuota de la muestra. Después de 10 min o más, medir la absorbancia de una muestra contra un blanco a una longitud de onda de 400 nm a 490 nm, dependiendo de la sensibilidad deseada. Los intervalos de concentración para diferentes longitudes de onda son:

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

TABLA 1.- Longitud de onda

Intervalo de P mg/L	Longitud de onda nm
1,0 - 5,0	400
2,0 –10	420
4,0 –20	470

El color es estable por días y su intensidad no se ve afectada por las variaciones de la temperatura ambiente.

10 CÁLCULOS

10.1 Calcular la concentración de la muestra por medio de la ecuación obtenida de la curva de calibración y que es representada por la siguiente ecuación:

$$Y = mX + b$$

donde:

m es la pendiente;
b es la ordenada al origen;

Y es la absorbancia, y
X es la concentración (mg P/L).

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

10.2 En caso de haber dilución de la muestra a lo largo del desarrollo del método (digestión y alícuota de muestra), utilizar la siguiente ecuación:

mg P/L = concentración x Factor de dilución

10.3 Reportar los resultados en mg P/L con dos décimas, con la precisión correspondiente.

11 INTERFERENCIAS

Arseniato, fluoruro, torio, bismuto, sulfuro, tiosulfato, tiocianato o excesos de molibdato interfieren. El hierro en su forma ferrosa produce un color azul, pero no afecta a los resultados, si su concentración es menor a 100 mg/L. La interferencia de sulfuro puede eliminarse por oxidación con agua de bromo. Los siguientes iones no interfieren en concentraciones superiores a 1 g/L: Al^{3+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Ba^{2+}, Sr^{2+}, Li^{+}, Na^{+}, K^{+}, NH_4^{+}, Cd^{2+}, Mn^{2+}, Pb^{2+}, Hg_2^{2+}, Sn^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, Ag^{+}, U^{4+}, Zr^{4+}, AsO_3^{-}, Br^{-}, CO_3^{2-}, ClO_4^{-}, CN^{-}, IO_3^{-}, SiO_4^{4-}, NO_3^{-}, NO_2^{-}, SO_4^{2-}, SO_3^{2-}, pirofosfato, molibdato, tetraborato, selenato, benzoato, citrato, oxalato, lactato, tartrato, formiato y salicilato.

12 SEGURIDAD

12.1 No ha sido determinada la carcinogenicidad de todos los reactivos con precisión. Por lo que cada sustancia química debe tratarse como peligro

potencial a la salud. La exposición a estas sustancias debe reducirse al menor nivel posible.

12.2 Este método puede no mencionar todas las precauciones de seguridad asociadas con su uso. El laboratorio es responsable de mantener un ambiente de trabajo seguro y un archivo de las normas de seguridad respecto a la exposición y manejo seguro de las sustancias químicas especificadas en este método. Debe tenerse un archivo de referencia de las hojas de información de seguridad el cual debe estar disponible a todo el personal involucrado en estos análisis.

13 MANEJO DE RESIDUOS

Es la responsabilidad del laboratorio cumplir con todos los reglamentos federales, estatales y locales referente al manejo de residuos, particularmente las reglas de identificación, almacenamiento y disposición de residuos peligrosos.

13.1 Cada laboratorio debe contemplar dentro de su Programa de Control de Calidad (CC) el destino final de los residuos generados durante la determinación.

13.2 Los desechos ácidos se deben neutralizar para su posterior desecho.

13.3 Las muestras líquidas con altos contenidos de fósforo, se deben envasar en recipientes herméticos y almacenar temporalmente tomando todas las precauciones necesarias y después enviarlas al confinamiento de residuos peligrosos.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

13.4 Todas las muestras que cumplan con la norma de descarga a alcantarillado pueden ser descargadas en el mismo sistema.

14 BIBLIOGRAFÍA

NOM-001-ECOL-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.

NOM-008-SCFI-1993 Sistema General de Unidades de Medida, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de octubre de 1993.

NMX-AA-003-1980 Aguas residuales - Muestreo. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.

NMX-AA-014-1980 Cuerpos receptores - Muestreo. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de septiembre de 1980.

NMX-AA-089/1-1986 Protección al ambiente - Calidad del agua - Vocabulario - Parte 1. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de julio de 1986.

PROY-NMX-AA-115-SCFI-2001 Análisis de agua - Criterios generales para el control de la calidad de resultados analíticos. Aviso de

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

	consulta pública publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de noviembre de 1999.
PROY-NMX-AA-116-SCFI-2001	Análisis de agua - Guía de solicitud para la presentación de métodos alternos. Aviso de consulta pública publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de noviembre de 1999.

Método 4500-P D, “Stannous Chloride Method”, American Public Health Association, “Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater”, American Public Health Association, United States of America, Washington, DC 20005, 19th Edition 1995, pp. 4-106 - 4-112.

Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, publicados en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989.

15 CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES

Esta norma mexicana no es equivalente a ninguna norma internacional por no existir referencia alguna al momento de su elaboración.

MÉXICO D.F., A

EL DIRECTOR GENERAL DE NORMAS.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

MIGUEL AGUILAR ROMO

JADS/AFO/DLR/MRG.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

NMX-AA-029-SCFI-2001

ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-029-1981)

WATERS ANALISIS - DETERMINATION OF TOTAL PHOSPHORUS IN NATURAL, WASTEWATERS AND WASTEWATERS TREATED - TEST METHOD

P R E F A C I O

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

En la elaboración de la presente norma mexicana participaron las siguientes empresas e instituciones:

- CASA ROCAS, S.A. DE C.V.

- CENTRO DE SERVICIOS QUÍMICOS DE AGUASCALIENTES

- CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

- COMISIÓN ESTATAL DE AGUA Y SANEAMIENTO

- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD

- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

- CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

- FISHER SCIENTIFIC MEXICANA, S.A. DE C.V.

- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL

  Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica;
  Dirección General de Normatividad y Apoyo Técnico.

- INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA

- INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

  Escuela Nacional de Ciencias Biológicas.

- INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES
  Campus Monterrey.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

- LABORATORIO DE ECOLOGÍA INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.

- LABORATORIO DE PEMEX PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS

- LABORATORIO DE QUÍMICA DEL MEDIO E INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.

- LABORATORIO IDECA, S.A. DE C.V.

- LABORATORIO QUÍMICO INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.

- LABORATORIOS ABC QUÍMICA, INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS, S.A. DE C.V.

- MERCK- MÉXICO, S.A. DE C.V.

- NOVAMANN, S.A. DE C.V.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

Laboratorio Control Químico.

- PERKIN ELMER DE MÉXICO, S.A. DE C.V.

- PETROQUÍMICA CANGREJERA, S.A. DE C.V.

- PETROQUÍMICA MORELOS, S.A. DE C.V.

- PETROQUÍMICA PAJARITOS, S.A. DE C.V.

- PROTECCIÓN AMBIENTAL Y ECOLOGÍA, S.A. DE C.V.

- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

  Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

- SECRETARÍA DE SALUD

- SERVICIOS AMBIENTALES MULTIPLES E INGENIERÍA, S.A. DE C.V.

- SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA AMBIENTAL, S.A. DE C.V.

- SISTEMA INTERMUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO

- UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

- UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
  Unidad Azcapotzalco.

- UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
  Facultad de Química;
  Instituto de Geofísica;
  Instituto de Ingeniería.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

- VARIAN, S.A. DE C.V.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

Número del capítulo		Página
0	Introducción	1
1	Objetivo y campo de aplicación	1
2	Principio del método	2
3	Definiciones	2
4	Reactivos y patrones	7
5	Equipo y materiales	9
6	Recolección, preservación y almacenamiento de muestras	10
7	Control de calidad	10

SECRETARÍA DE ECONOMÍA

DGN

8	Calibración	11
9	Procedimiento	11
10	Cálculos	14
11	Interferencias	14
12	Seguridad	14
13	Manejo de residuos	15
14	Bibliografía	15
15	Concordancia con normas internacionales	16