



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**EXPORTACIÓN DE NITRÓGENO DE ESCORRENTÍAS
AGROPECUARIAS HACIA AGUAS SUPERFICIALES
EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA,
TABASCO**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

PRESENTA:

ING. YAJAIRA CRUZ ALCUDIA

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. ADAN CABAL PRIETO

ASESOR DE TESIS:

DRA. CINTHYA A. SOSA VILLALOBOS

SEPTIEMBRE, 2019

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Boca del Río, Ver., **05/septiembre/ 2019**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**C. YAJAIRA CRUZ ALCUDIA
PASANTE DE LA 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:

**"EXPORTACIÓN DE NITRÓGENO DE ESCORRENTÍAS AGROPECUARIAS HACIAS AGUAS
SUPERFICIALES 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.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
Por nuestros alumnos respondiendo*

**M. C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

c.c.p. Coordinación de la Maestría
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba C.P. 94290
Boca del Río, Veracruz. Tel. (229) 690-5010 e-mail: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro **A-616-120118**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 14:00 horas del día 25 del mes de agosto de 2019 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:

"EXPORTACIÓN DE NITRÓGENO DE ESCORRENTÍAS AGROPECUARIAS HACIA AGUAS SUPERFICIALES EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA, TABASCO"

Que presenta el (la) alumno(a):

ING. YAJAIRA CRUZ ALCUDIA

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


Dr. Adán Cabal Prieto
Codirector


Dra. Cinthya Alejandra Sosa Villalobos
Asesor


Dra. Fabiola Lango Reynoso
Asesor



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba C.P.94290
Boca del Río, Veracruz. Tel. (229) 690-5010 e-mail: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx



Resumen

La cuenca baja del río Usumacinta es un cuerpo receptor de la exportación de nutrientes. Recibe de manera directa e indirecta altas concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos, provenientes de las actividades agropecuarias como fuente difusa de contaminación. El objetivo de esta investigación fue valorar la exportación de nitrógeno de las escorrentías agrícolas hacia aguas superficiales, en la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco. Los resultados obtenidos muestran exportaciones de nitrógeno total desde 0.0043, 0.0104, hasta 0.0112 kg N ha⁻¹ mes⁻¹ en Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta, respectivamente. De acuerdo con los resultados y la superficie de suelo dedicada a las actividades agropecuarias en cada municipio; las escorrentías agrícolas en Jonuta transportan 112.06 Kg mes⁻¹ de N-NO₃⁻ hacia aguas superficiales. Esto supera el resultado obtenido en los municipios de Emiliano Zapata (17.38 kg mes⁻¹) y Tenosique (100.13 kg mes⁻¹). Se observa que en el municipio de Jonuta se exporta una mayor concentración de nitrógeno; además de la influencia del uso de suelo agrícola (de temporal) y pecuario (pastizales cultivados), en los valores de exportación. Factores como el tipo de suelo y la precipitación favorecen el transporte de estos compuestos de la escorrentía hacia aguas superficiales. Las concentraciones obtenidas de NT en el río Usumacinta están representadas por 1.36, 1.053 y 1.01 mgL⁻¹ de NT; valores inferiores al estándar internacional de calidad ambiental para la conservación del ambiente acuático (1.6 mg L⁻¹). Las concentraciones obtenidas de N-NO₃⁻ (0.50, 0.63 y 0.54 mg L⁻¹) fueron menores al criterio (10 mg L⁻¹) de calidad del agua en México (CE-CCA-001/89). La distribución de estos compuestos permite obtener evidencia del riesgo potencial de contaminación por compuestos nitrogenados en suelo de uso agropecuario, y una estimación del riesgo por la exportación de estos hacia aguas superficiales.

Palabras clave: calidad del agua, nutrientes, actividades agropecuarias, fuentes difusas de contaminación.

Abstract

The lower Usumacinta river basin is a body that receives nutrients. It receives directly and indirectly high concentrations of organic and inorganic compounds, coming from agricultural activities as a diffuse source of pollution. The objective of this research was to assess the export of nitrogen from agricultural runoff to surface waters, in the lower Usumacinta river basin, Tabasco. The results obtained show total nitrogen exports from 0.0043, 0.0104, to 0.0112 kg N ha⁻¹ mes⁻¹ in Tenosique, Emiliano Zapata and Jonuta, respectively. According to the results and the land area dedicated to agricultural activities in each municipality; agricultural runoff in Jonuta transports 112.06 Kg month⁻¹ of N-NO₃⁻ to surface waters. This exceeds the result obtained in the municipalities of Emiliano Zapata (17.38 kg month⁻¹) and Tenosique (100.13 kg month⁻¹). It is observed that in the municipality of Jonuta a greater concentration of nitrogen is exported; In addition to the influence of the use of agricultural (temporary) and livestock (cultivated grassland) land, on export values. Factors such as soil type and precipitation favor the transport of these runoff compounds to surface waters. The concentrations obtained from NT in the Usumacinta River are represented by 1.36, 1.053 and 1.01 mgL⁻¹ of NT; values below the international environmental quality standard for the conservation of the aquatic environment (1.6 mg L⁻¹). The concentrations obtained from N-NO₃⁻ (0.50, 0.63 and 0.54 mg L⁻¹) were lower than the criterion (10 mg L⁻¹) of water quality in Mexico (CE-CCA-001/89). The distribution of these compounds allows to obtain evidence of the potential risk of contamination by nitrogen compounds in agricultural land, and an estimate of the risk of exporting them to surface waters.

Keywords: quality water, nutritious, agricultural activities, non-point sources.

Dedicatorias

Mis padres

Agradezco a los seres más importantes de mi vida por su apoyo a lo largo de estos casi 18 años de estudio, por impulsarme y comprender que continuar con los estudios no es evitar la vida laboral. Un gran agradecimiento a mi madre por la educación en casa, por fomentar que siempre se puede lograr algo más, por su paciencia a mi ausencia en casa y su confianza de realizar desde mis estudios universitarios hasta la maestría en una ciudad alejada de casa.

Hermanos y sobrino

Agradezco a mis dos hermanos y hermana por su apoyo moral y muestras de afecto, a mi sobrino que es la persona que cambió mi vida desde su llegada, quien me motiva a tener una mejor calidad de vida para poder brindarle mi apoyo.

Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico de Boca del Rio por ofertar un postgrado que me permitió alcanzar una meta más en mi vida; por su cuerpo académico que ofrece oportunidades de aprendizaje.

A mi directora de Tesis la Dra. Itzel Galaviz Villa, por su gran paciencia en el transcurso de los dos años de la maestría, por permitirme formar parte de un proyecto y ayudarme a adquirir habilidades profesionales y por fomentar el conocimiento sugiriendo estancias de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo para la realización de este proyecto de tesis.

Al proyecto “Efecto de las fuentes difusas de contaminación en la calidad del agua del río Usumacinta, Tabasco”; y a las personas que colaboraron en él, gracias al esfuerzo conjunto se obtuvo la información necesaria para el desarrollo de mi proyecto de investigación.

Contenido

1.	Introducción	10
2.	Marco teórico	13
2.1	Cuenca hidrográfica.	13
2.1.1	Manejo de una cuenca hidrográfica.	14
2.1.2	Ciclo hidrológico.....	14
2.2	Cuenca del Río Usumacinta.....	16
2.2.1	Edafología.....	18
2.2.2	Uso de suelo.....	19
2.3	Cuenca Baja del Río Usumacinta.	21
2.3.1	Tenosique, Tabasco.....	22
2.3.2	Emiliano Zapata, Tabasco	25
2.3.3	Jonuta	29
2.4	Contaminación del agua.....	33
2.4.1	Contaminación Puntual	34
2.4.2	Contaminación Difusa	34
2.5	Contaminación por nitrógeno	38
2.5.1	Ciclo del nitrógeno	40
2.5.2	Exportación de nitrógeno.....	43
3.	Justificación	43
4.	Hipótesis	45
5.	Objetivos.....	45
5.1	Generales.....	45
5.2	Específicos.....	45
6.	Materiales y metodos.....	46
6.1	Área de estudio.....	46
6.1.1	Condiciones climáticas.....	47
6.1.2	Edafología.....	47
6.1.3	Uso de suelo	48
6.2	Muestreo	49
6.2.1	Sitios de muestreo	49
6.2.2	Periodicidad y procesamiento de muestras.	49
6.3	Análisis de laboratorio.....	51
6.4	Exportación de nitrógeno total.....	53
6.5	Análisis estadístico.....	54
7.	Resultados y Discusión.....	56
7.1	Concentración de nitrógeno total en agua superficiales.....	57
7.2	Concentración de nitrógeno total (NT) en escorrentías.....	56
7.3	Concentración de N-NO ₃ ⁻ en agua superficiales.	57
7.4	Concentración de N-NO ₃ ⁻ en escorrentías.....	58
7.5	Exportación de nitrógeno total.....	61
7.6	Exportación de nitrógeno de nitratos (N-NO ₃ ⁻).....	62
7.7	Relación entre la exportación de NT y N-NO ₃ ⁻ en aguas superficiales.	67
8.	Conclusiones	69

9. Alternativas de control.....	70
10. Literatura citada	73

Índice de figuras

Figura 1. Cuenca hidrográfica.....	14
Figura 2. Ciclo hidrológico.....	15
Figura 3. Cuenca del río Usumacinta.....	17
Figura 4. Cuenca Baja del Río Usumacinta, Tabasco.....	21
Figura 5. Municipio de Tenosique, Tabasco.	22
Figura 6. Tipo de suelo Tenosique, Tabasco.	23
Figura 7. Uso de suelo Tenosique, Tabasco.....	24
Figura 8. Municipio de Emiliano Zapata, Tabasco.	26
Figura 9. Tipo de suelo.	27
Figura 10. Uso de suelo Emiliano Zapata, Tabasco.....	29
Figura 11. Municipio de Jonuta, Tabasco.	30
Figura 12. Tipo de suelo Jonuta, Tabasco.	31
Figura 13. Uso de suelo Jonuta, Tabasco.....	33
Figura 14. Ciclo de contaminación del agua.	35
Figura 15. Escorrentía en el ciclo hidrológico	37
Figura 16. Impactos del nitrógeno.....	40
Figura 17. Ciclo Biogeoquímico del nitrógeno.....	42
Figura 18. Ciclo del nitrógeno y el hombre.....	42
Figura 19. Delimitación del área de estudio.	46
Figura 20. Tipo de suelo en área de estudio.....	47
Figura 21. Uso de suelo del área de estudio.....	48
Figura 22. Ubicación de sitios de muestreo en el área de estudio.	51
Figura 23. Concentración de NT en escorrentías.....	56
Figura 24. Concentraciones de NT en agua superficial.	58
Figura 25. Concentraciones de N-NO ₃ ⁻ en escorrentías.	59
Figura 26. Concentración de N-NO ₃ ⁻ en agua superficial.....	60
Figura 27. Exportación de NT en la cuenca baja del Río Usumacinta, Tabasco...	64
Figura 28. Exportación de N-NO ₃ ⁻ en la cuenca baja del Río Usumacinta, Tab....	65
Figura 29. Balance hídrico en el área de estudio.	66

Índice de cuadros

Cuadro 1. Tipos de suelo y sus características.....	18
Cuadro 3. Tipos de cultivo en Tenosique, Tabasco	25
Cuadro 4. Producción de ganado y ave en Tenosique, Tabasco.....	25
Cuadro 5. Tipos de cultivos en Emiliano Zapata, Tabasco.	28
Cuadro 6. Volumen de producción de ganado y ave en Emiliano Zapata, Tab	28
Cuadro 7. Tipos de cultivos en el estado de Tabasco.....	32
Cuadro 8. Volumen de producción de ganado y ave.	32
Cuadro 9. Dinámica de la escorrentía.....	38
Cuadro 10. Sitios de muestreo de agua superficial.....	49
Cuadro 11. Sitios de muestreo de escorrentías.	50
Cuadro 12. Métodos de análisis de nitrógeno.....	52
Cuadro 13. Exportación de NT de acuerdo con la superficie de cada municipio destinada al uso de suelo pecuario y agrícola.	61
Cuadro 14. Exportación de N-NO ₃ ⁻ de acuerdo con la superficie de cada municipio destinada al uso de suelo pecuario y agrícola.	63

1. Introducción

La cuenca del Río Usumacinta cuenta con una superficie territorial de 724,547 hectáreas y un caudal de aproximadamente $1,700 \text{ m}^3\text{S}^{-1}$ (Benassini, 1972); el 58% de superficie de la cuenca es perteneciente a Guatemala y el resto pertenece a Belice y México (March y Castro, 2010). La parte alta de la cuenca del Usumacinta se origina en las montañas de Chamá y los Cuchumatanes donde drena el río Chixoy del altiplano guatemalteco (Hamann y Ankersen, 1996), continua su recorrido en la parte media de la cuenca en Belice hasta drenar a la parte baja de la cuenca en territorio mexicano donde se une con los ríos La Pasión, Salinas y Lacantún para formar el Río Usumacinta (García y Kauffer, 2011). El río Usumacinta es el cauce principal de la cuenca baja del Usumacinta, este riega los municipios de Tenosique, Balcan, Emiliano Zapata, Jonuta y Centla pertenecientes al estado de Tabasco y, por último, desemboca en el Golfo de México (García y Kauffer, 2011).

La cuenca baja del Río Usumacinta ha sido punto clave para los asentamientos humanos y desarrollo de actividades agropecuarias, ya que su relieve permite la adaptación de los terrenos para cultivos, cría de animales y vivienda (Cotler y Pineda, 2008); este uso de suelo tiene un origen en Tabasco desde los años 1800 que con el paso del tiempo ha devastado selva a través de la tala inmoderada (Cotler y Pineda, 2008).

Actualmente en la cuenca baja se producen más de 8000 cabezas de bovinos, porcinos, ovinos, ave y guajolote. Además, cultivos cíclicos y perenes como maíz de grano, frijol, sorgo de grano, calabaza (semilla), chile verde, caña, palma, entre otros; los cuales sobrepasan 9000 hectáreas de superficie sembrada (INEGI, 2016). Es evidente que las actividades agropecuarias impactan los recursos naturales de la cuenca baja del río Usumacinta; inclusive son consideradas, el mayor generador de contaminación difusa y una fuerte problemática ambiental a nivel mundial (Camargo y Alonso, 2007). La problemática que desencadena el sector agropecuario se origina desde la demanda de agua, la cual se estima es de 66.5% en México (CONAGUA, 2017). La cantidad de agua para riego agrícola y la

fertilización nitrogenada repercuten en el incremento de nitrógeno en el suelo y agua (Aguilar, 2008).

El incremento de nitrógeno en el suelo genera una mala asimilación por parte de la planta por lo que exporta hacia la superficie mayores cantidades de este compuesto (Yanez *et al.*, 2017). Esto desencadena otros efectos negativos al incorporarse a un cuerpo de agua, como; la proliferación acelerada de algas, eutrofización, deficiencia de oxígeno, anoxia y pérdida de biota (Ledesma *et al.*, 2013).

La exportación de nutrientes en las cuencas hidrográficas con alta actividad en la agricultura y la ganadería se presenta por escorrentía superficial, principalmente en temporada de lluvias; sin embargo, en la parte baja de las cuencas se puede presentar escurrimiento de terreno con encharcamientos en mayor parte del año. Esta, es una de las principales características de la cuenca baja del río Usumacinta. Los altos volúmenes de agua arrastran al río nutrientes que no pudieron ser asimilados las plantas incrementan las concentraciones de los nutrientes en aguas superficiales (Álvarez y Angeler, 2007).

Los nutrientes que han tenido un impacto significativo en la exportación de compuestos que impactan la calidad de aguas superficiales son el nitrógeno total (NT) y el nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-); ya que son un macronutriente altamente soluble en agua y de gran utilidad para la producción agrícola (Pacheco *et al.*, 2005).

El nitrógeno total (NT), el cual corresponde a la suma de nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal (Pacheco *et al.*, 2002); proviene de diversas fuentes naturales y en las actividades agropecuarias su fuente principal son los plaguicidas y fertilizantes; es soluble en agua e inofensivo para organismos acuáticos, pero de rápida descomposición a nitrógeno amoniacal. Este último es tóxico para los peces al exceder el límite máximo permisible de 0.06 mg L^{-1} , de acuerdo con los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-001, 1989).

El nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) tiene su origen antropogénico es proveniente de los fertilizantes nitrogenados los cuales pueden ser nítricos, amónicos y amidas

(Pacheco *et al.*, 2005). El N-NO_3^- tiende a lixiviar y contaminar las aguas subterráneas y transportarse a través de la escorrentía hacia aguas superficiales. Es uno de los principales causantes del proceso de eutrofización y su incremento en el río Usumacinta puede llegar a categorizarlo como un río oligotrófico o eutrófico (Flores *et al.*, 2009). El estudio de la exportación de nitrógeno en la cuenca baja del río Usumacinta, puede implementarse como una medida de evaluación del impacto del uso de suelo y las prácticas agrícolas. A su vez, coadyuvar en el establecimiento de recomendaciones para la implementación de programas de remediación y control de las fuentes difusas de contaminación de aguas superficiales (Oyarzún y Huber, 2003).

2. Marco teórico

2.1 Cuenca hidrográfica.

Una cuenca hidrográfica es un territorio delimitado por partes muy altas donde se concentran todos los escurrimientos que se acumulan y fluyen hasta desembocar en un punto común llamado punto de salida de la cuenca (Figura 1). En otras palabras, es un dren superficial que concentra el agua de las partes altas, en el río principal que posteriormente se integra al mar, lago u otro río más grande. Las cuencas hidrográficas tienen un orden jerárquico, primero se subdividen en subcuencas y al interior de cada subcuenca estas a su vez en microcuencas; estas se componen de recursos naturales como el suelo, agua y vegetación que permite que habite el hombre, y desarrolle sus actividades productivas (Cotler *et al.*, 2013).

De acuerdo con Chávez (2003) las cuencas hidrográficas “constituyen un ámbito geográfico, económico, político y cultural idóneo para diagnosticar el daño infligido a los diferentes ecosistemas que la componen”.

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar de acuerdo al tamaño geográfico, ecosistema, relieve entre otros; sin embargo, la clasificación de las cuencas comúnmente identificada aquella que se definen por la dirección de evacuación de agua (drenaje) y se conocen como cuenca endorreicas y exorreicas (Ordoñez, 2017); las cuales se caracterizan por desembocar en un lago o en el mar, respectivamente (Cotler *et al.*, 2013).

Cada tipo de cuenca hidrográfica presenta tres zonas en su interior las cuales se denominan: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja. Cada una de estas zonas presenta una dinámica distinta en cuanto al escurrimiento, transporte de sedimentos, materia orgánica y asentamientos humanos (Figura 1) (Cotler *et al.*, 2013).

La cuenca alta es la parte donde nacen los primeros escurrimientos entre las montañas como son los arroyos que escurren hasta las zonas más bajas o subcuenca. La cuenca media recibe el escurrimiento de la parte alta y presenta una

gran erosión, transporte de sedimentos y materia orgánica. Por último, la cuenca baja que se caracteriza por ser la zona con más asentamientos humanos y desarrollo de agricultura, recibe los impactos acumulados a lo largo de toda la cuenca y es el lugar donde el cauce principal desemboca en un el mar o un lago (Cotler *et al.*, 2013).



Figura 1. Cuenca hidrográfica (modificado de Cotler *et al.*, 2013).

2.1.1 Manejo de una cuenca hidrográfica.

Las cuencas hidrográficas son de gran importancia a causa de las diferentes demandas de uso del recurso (Llambí *et al.*, 2010); por ejemplo, el uso doméstico, agrícola e industrial dependen de los caudales producidos y regulados en las cuencas hidrográficas (FAO, 2007); además permiten entender espacialmente el ciclo hidrológico (Cotler *et al.*, 2013).

2.1.2 Ciclo hidrológico.

El agua en el planeta se encuentra en la atmosfera en la superficie terrestre y en el suelo. El proceso durante el cual el agua se mueve por los ecosistemas y en los que se encuentra en diferentes estados de la materia (sólido, líquido y gas) (Camilloni, 2006); es denominado ciclo hidrológico o ciclo del agua; el ciclo del agua; el cual incluye la evaporación, transpiración, condensación, precipitación e infiltración del agua (Figura 2) (Davis y Masten, 2005).

Cada una de las partes del ciclo hidrológico se describen a continuación:



Figura 2. Ciclo hidrológico (modificado de Chow, 1988).

Evaporación: Es el proceso mediante el cual el agua de los océanos y de la tierra se convierte en vapor de agua, es decir; consiste en la conversión del agua de estado líquido a vapor y de esta forma el agua llega a la atmósfera (Davis y Masten, 2005).

Transpiración: En esta parte del ciclo el agua llega a la atmósfera desde el suelo proceso debido a la acción realizada por las plantas; esto sucede debido a que las plantas emiten agua por medio de sus estomas esto ocurre principalmente durante la fotosíntesis ya que es cuando las estomas de las hojas están abiertas para la transferencia de dióxido de carbono y oxígeno (Davis y Masten, 2005).

Uno de los términos que no mencionan en el ciclo hidrológico es la evapotranspiración; sin embargo, este término se utiliza para identificar el movimiento del agua con respecto a las dos partes del proceso ya mencionados; el agua al infiltrarse queda retenida en las zonas de saturación del suelo, una parte se evapora y el resto pasa a la zona no saturada; por lo tanto, en la zona saturada el agua continúa con el proceso de evaporación y en la zona no saturada continúa con

el proceso de transpiración; por ello se utiliza el término “evapotranspiración” que incluye ambos términos (Davis y Masten, 2005).

Condensación: El agua que llega a la atmosfera en forma de vapor, por perdida de temperatura pasa de estado gaseoso a líquido nuevamente, durante el desarrollo de este proceso se puede apreciar la formación en forma de nubes que al llegar al punto de saturación se produce la precipitación (Davis y Masten, 2005).

Precipitación e infiltración: Este primero se refiere a cuando el agua, por gravedad, cae de nuevo hacia la superficie terrestre; la precipitación puede presentarse de diversas formas, entre ellas; lluvia, nieve, pedrisco y granizo. La infiltración se produce cuando el agua logra atravesar el suelo y ocupa algunos de los espacios vacíos entre las partículas del suelo (Davis y Masten, 2005).

2.2 Cuenca del Río Usumacinta.

La cuenca del Usumacinta está localizada aproximadamente entre los paralelos $14^{\circ} 50'$ y $18^{\circ} 45'$ de latitud Norte y los meridianos $89^{\circ} 20'$ y $92^{\circ} 40'$ de longitud al Oeste de Greenwich (IMTA, 2017); cuenta con una superficie territorial de más de 7 millones de hectáreas, además cuenta con un caudal de aproximadamente $1,700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Benassini, 1972).

La cuenca del Usumacinta está compartida entre tres países; Guatemala a quien le corresponde aproximadamente el 58% de superficie de la cuenca seguido de Belice y México (March y Castro, 2010); por lo tanto, en dirección del flujo hacia la desembocadura la cuenca alta del Usumacinta le pertenece a Guatemala, la cuenca media a Belice y la cuenca baja a territorio mexicano (Figura 3).

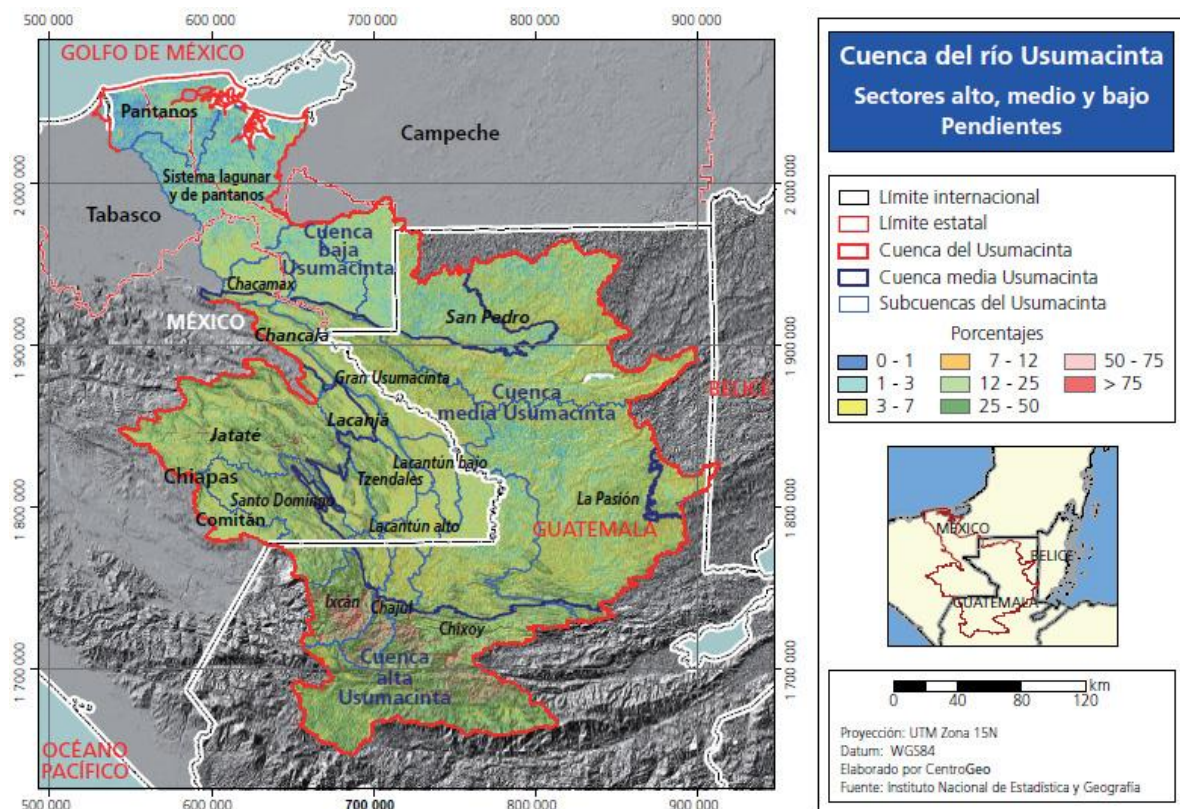


Figura 3. Cuenca del río Usumacinta (INEGI, 2010).

La cuenca del Río Usumacinta tiene un gran antecedente histórico, el río y sus afluentes fueron rutas comerciales importantes para la antigua civilización maya (Piña Chan, 1982; Sharer, 1998; Grube, 2000).

El periodo postcolonial es considerado como el inicio de la degradación de la cuenca del Río Usumacinta; como producto de la explotación de en los años 70's y 80's se reporta una gran devastación de selva debido a la ampliación de terrenos destinados a actividades agrícolas y ganaderas (Soares y García, 2018).

La ampliación o adaptación de terrenos para actividades agropecuarias es uno de las problemáticas ambientales que continúan hasta nuestros días; estudios reportan que el estado de la cuenca del Usumacinta en territorio mexicano presenta una economía poco desarrollada, población con elevada marginación y un proceso continuo de degradación ambiental (COLPOS, 2017).

2.2.1 Edafología.

Los tipos de suelo de las zonas bajas de la cuenca del Usumacinta son muy variados presentan propiedades físicas distintas que pueden influir en la dinámica y transformación de compuestos (Cuadro 1) (Ceron *et al.*, 2012). Como dato previo a la descripción de los suelos, es necesario comprender el concepto el cual se ha ido modificado y logra una amplitud conforme a los enfoques de los diversos campos de aplicación (Worthen, 1949).

Por ejemplo; desde el punto de vista del agricultor, el suelo siempre ha sido el sitio para sembrar sus semillas y producir sus cosechas (Worthen, 1949); sin embargo, diferentes organizaciones presentan conceptos con enfoques distintos de acuerdo al estudio o desarrollo de la investigación.

Cuadro 1. Tipos de suelo y sus características.

Tipo	Descripción	Característica
Litosol	Suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo.	Particularmente comunes en las zonas montañosas y en planicies calizas superficiales, como las de la Península de Yucatán.
Vertisol	Suelos de climas semiáridos a subhúmedos y de tipo mediterráneo, con marcada estacionalidad de sequía y lluvias. La vegetación natural que se desarrolla en ellos incluye sabanas, pastizales y matorrales.	Se pueden encontrar en los lechos lacustres, en las riberas de los ríos o en sitios con inundaciones periódicas. Se caracterizan por su alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y se contraen con la sequía.
Fluvisol	Suelos formados a partir de materiales aluviales recientes y que, por tanto, muestran unas propiedades muy relacionadas con aquellos como estratificación.	Presencia de sucesivas capas sedimentarias que muestran granulometría muy variable en función de la energía que llevará el agua.
Gleysol	Suelos formados en condiciones de inundación producidas por el aumento de las aguas subterráneas. En los trópicos y subtropicos se cultivan para arroz	Generalmente cubiertos con vegetación natural de pantano o son usados como extensos pastizales. Cuando son drenados artificialmente pueden ser cultivados y arados.
Andosol	Suelos condicionados por una textura fina, aunque su contenido en arcilla no suele pasar de 20 a 25 %, escasas en arenas y tanto más cuanto mayor es la evolución.	Aptos para la agricultura dependiente de las condiciones del relieve. su ubicación se circunscribe generalmente a las regiones con volcanismo activo.
Regosol	Suelos con escasa vocación agrícola, aunque su uso depende de su profundidad, pedregosidad y fertilidad, por lo que sus rendimientos son variables.	se encuentran en la Sierra Madre Occidental y del Sur y en la Península de Baja California
Ferralsol	Suelos cuyo término que ha sido creada por taxónomos, para agrupar los suelos que se encuentran comúnmente en latitudes bajas.	Se encuentran principalmente en climas tropicales y cubren extensas áreas en terrenos planos, generalmente bien drenados.
Xerosol	Suelos poco fértiles, muy condicionados por la roca madre y por lo tanto salinos, muy	Desarrollado en clima seco. sí existe riego se obtienen buenos rendimientos agrícolas.

	pobres en materia orgánica, cubiertos por una rala vegetación esteparia, y muy erosionables.	
Yermosol	Suelo semejante a los xerosoles, difieren en el contenido de materia orgánica.	Con una capa mayor a 15 cm de espesor y enriquecimiento secundario de sulfato de calcio mayor de 15%.
Luvisol	Suelos que se encuentran sobre una gran variedad de materiales no consolidados, tales como las terrazas aluviales o los depósitos glaciales, eólicos y aluviales.	Son muy comunes en climas templados y fríos o cálidos húmedos con estacionalidad de lluvia y sequía. Son comunes en bosques de coníferas y selvas.
Arenosol	Suelos que tienen una textura franco-arenosa o más gruesa, hasta una profundidad de 100 cm a partir de la superficie, sin otros horizontes diagnósticos más que un horizonte A ócrico.	Escasa o nula evolución y un perfil prácticamente indiferenciado, con muy baja incorporación de materia orgánica, sobre un material arenoso totalmente suelto y sin ninguna cohesión entre sus partículas.
* Terminación (sol), tipo de suelo fértil basando en la clasificación del USDA (United States Department of Agriculture).		
Fuente (FAO, 2009).		

Relacionado con lo anterior, en el campo de la edafología se especifica un concepto sistémico del suelo que engloba las características de complejidad, dinamismo y permeabilidad utilizado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). La definición por parte de este departamento es la siguiente:

“Cuerpo natural formado por una fase sólida (minerales y materia orgánica), una fase líquida y una fase gaseosa que ocupa la superficie de la tierra, organizada en horizontes o capas de materiales distintos a la roca madre, como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía, que tiene capacidad para servir de soporte a las plantas con raíces en un medio natural” (USA,1998).

En países como México una definición más utilizada es la especificada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); la cual ha definido al suelo como como “un cuerpo natural que consiste en capas horizontales compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua” (FAO, 2009).

A partir de estos conceptos para consolidar la descripción del suelo, es necesario tener en cuenta elementos como; características físicas, propiedades, composición, usos, formación, estructura y tipos de suelos (Jaramillo, 2002). Los tipos de suelo surgen a través de variaciones en el clima, vegetación y fauna, además de diversas

formas de relieve (FAO, 2009). Los tipos de suelo que predominan en la cuenca son litosoles, vertisoles, fluvisoles, gleysoles, andosoles, regosoles, etc., el presente trabajo se basa en la clasificación simplificada de los tipos de suelos de acuerdo a FAO-UNESCO (Cuadro 1).

2.2.2 Uso de suelo.

En la cuenca del Río Usumacinta el uso de suelo (actividades agropecuarias) ejerce una presión ambiental debido a que es uno de los factores más importantes que repercuten en el régimen hídrico (Bosch y Hewlett, 1982).

La adaptación de terrenos para el desarrollo de actividades agrícolas y ganadeas conlleva a otras sub actividades como es el uso de compuestos nitrogenados para enriquecer los suelos, el sobrepastoreo, uso de maquinaria, quema de vegetación, uso de plaguicidas que en corto o largo plazo forma parte de la degradación de los suelos y contaminación del Río Usumacinta (Cotler *et al.*, 2007).

El tipo de agricultura que predomina en la cuenca del Usumacinta es la agricultura mecanizada la cual incluye prácticas de manejo del suelo o del cultivo a través de máquinas que se desplazan sobre el suelo, por ejemplo; el laboreo y la labranza, en las que se incluye arado, rastrillado y control de malezas (Jaramillo, 2002).

Por último, existe otro tipo de actividad mecanizada la cual corresponde a la nivelación del terreno lo cual implica el movimiento del suelo lo cual involucra una gran cantidad de máquinas sobre él, lo que puede afectar las condiciones físicas del mismo. Estas se realizan con la finalidad de facilitar el crecimiento de las raíces de las plantas, incorporar materia orgánica y favorecer la entrada y acumulación de agua para las plantas (Jaramillo, 2002).

Existen otras clasificaciones de agricultura; agricultura mecanizada estacional, agricultura con tracción animal continua, agricultura con tracción animal estacional, agricultura manual continua y agricultura manual estacional (INEGI, 2015).

En cuanto a la ganadería en la cuenca se crían ganado bovino, ovino y porcino, así como la cría de aves de corral, así como existe una interacción entre el pastoreo con algunos cultivos cíclicos (Cotler *et al.*, 2007).

2.3 Cuenca Baja del Río Usumacinta.

El cause principal es conocido como el río Usumacinta cuyo flujo se forma de la unión de los ríos La Pasión, Salinas y Lacantún (Hamann y Ankersen 1996). Su recorrido en el estado de Tabasco comienza desde Boca del cerro distribuyéndose en los municipios de Tenosique, Balancán, Emiliano Zapata y Jonuta hasta su unión con la corriente del río Grijalva; en el lugar denominado tres brazos en el municipio de Centla y juntos desembocan en el Golfo de México (Figura 4).

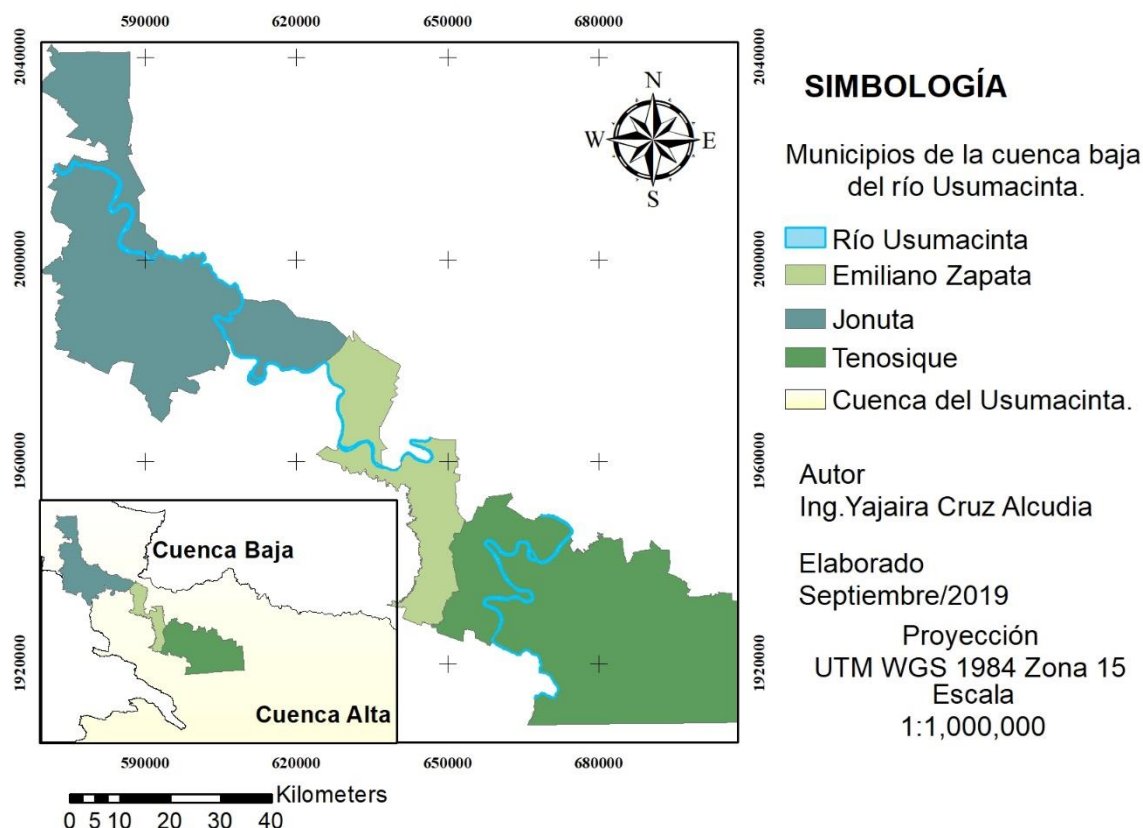


Figura 4. Cuenca Baja del Río Usumacinta, Tabasco.

2.3.1 Tenosique, Tabasco

Está ubicado entre los paralelos 17°14', al sur 17°40' de latitud norte; y los meridianos 90°59' y 91°38' de longitud Oeste (Figura 5); cuenta con una altitud entre 0 y 700 msnm. Colinda al norte con el municipio de Balancán; al este con el municipio de Balancán y la República de Guatemala; al sur con la República de Guatemala y el estado de Chiapas; al oeste con el estado de Chiapas y el municipio de Emiliano Zapata. Ocupa el 7.62% de la superficie del estado y cuenta con 139 localidades (INEGI, 2016).

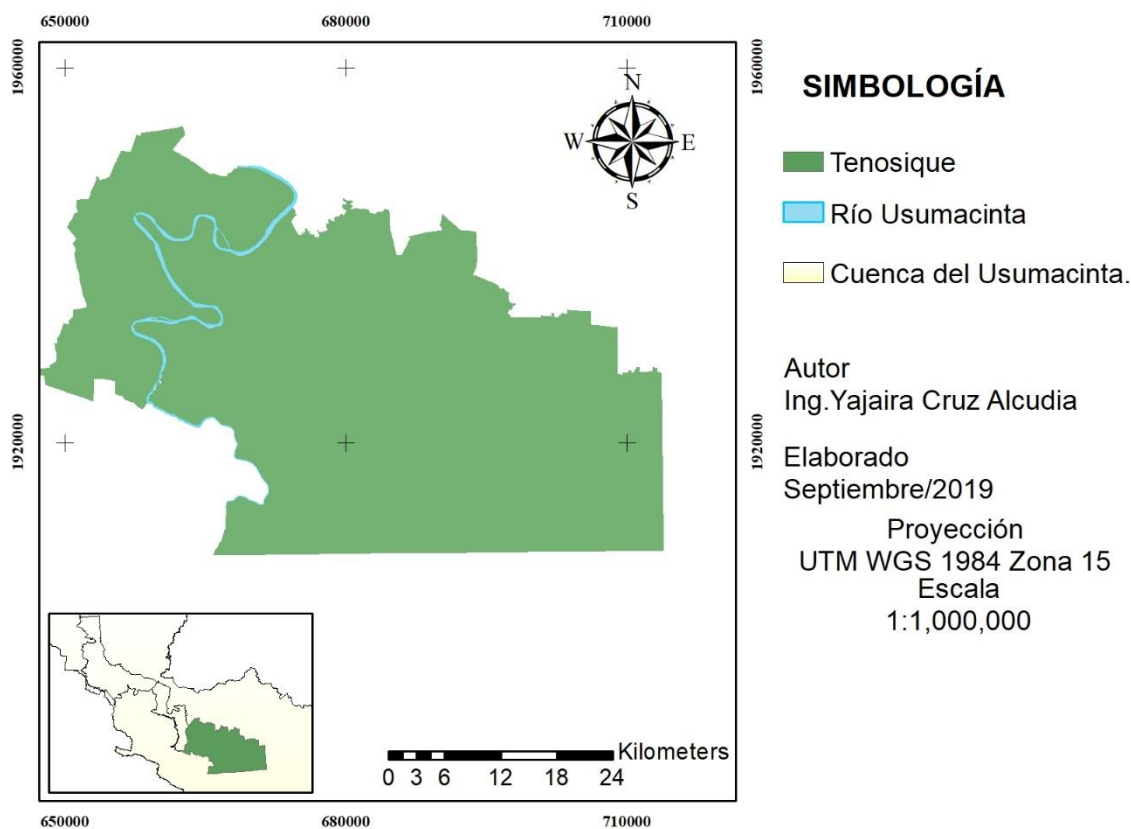


Figura 5. Municipio de Tenosique, Tabasco.

2.3.1.1 Fisiografía

En la provincia llanura Costera del Golfo Sur y la Subprovincia presentan topografías; distribuidas en un 69.40 % de lomerío con llanuras y 11.51% de valle, y un

19 % de sierra; la cual comparte con el Petén guatemalteco y el estado de Chiapas (INEGI, 2016).

2.3.1.2 Clima

Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y cálido húmedo con lluvias todo el año. El rango de precipitación es de 1500 a 2500 mm; con un rango de temperatura de 24 a 28°C (INEGI, 2016).

2.3.1.3 Geología

El suelo se formó durante el periodo Neógeno Cuaternario, Paleógeno y Cretácico, el tipo de roca es sedimentaria que logran su formación por acumulación de sedimentos. En el municipio de Tenosique se encuentran los tipos sedimentaria, caliza, arenisca y lutita (INEGI, 2016).

2.3.1.4 Suelo.

De acuerdo a la carta edafológica, los suelos predominantes son Gleysol, Cambisol, Litosol, Luvisol, Regosol, Rendzina y Vertisol (Figura 6) (INEGI, 2016).

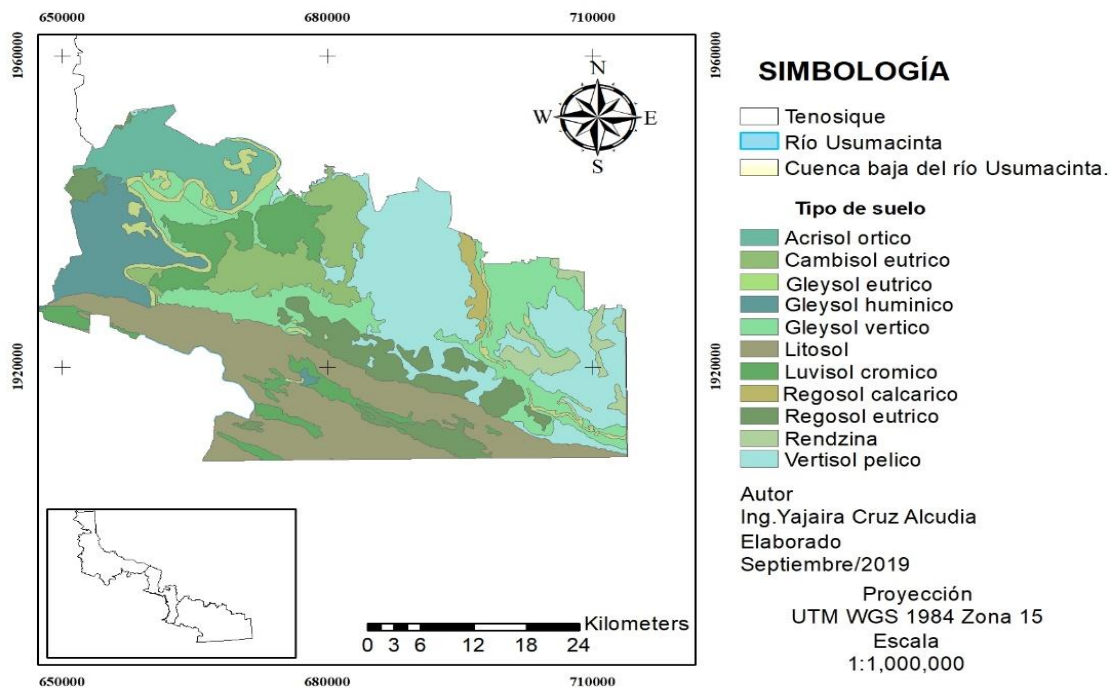


Figura 6. Tipo de suelo Tenosique, Tabasco.

2.3.1.5 Uso de suelo

El uso de los suelos es agricultura y ganadería principalmente; los cultivos que se labran en el municipio se pueden clasificar por temporadas se clasifican por ciclos conocidos como perennes y cíclicos. Los cultivos perennes son conocidos como cultivo de ciclo largo debido a que se extiende a más de doce meses (SEMARNAT, 2010). Los cultivos cíclicos son conocidos como anuales o de ciclo corto, debido a que se siembran y cultivan en los dos ciclos del año agrícola (1° de Octubre al 30 de septiembre) por su parte dan lugar a los cultivos de otoño-invierno y primavera-verano (SEMARNAT, 2010).

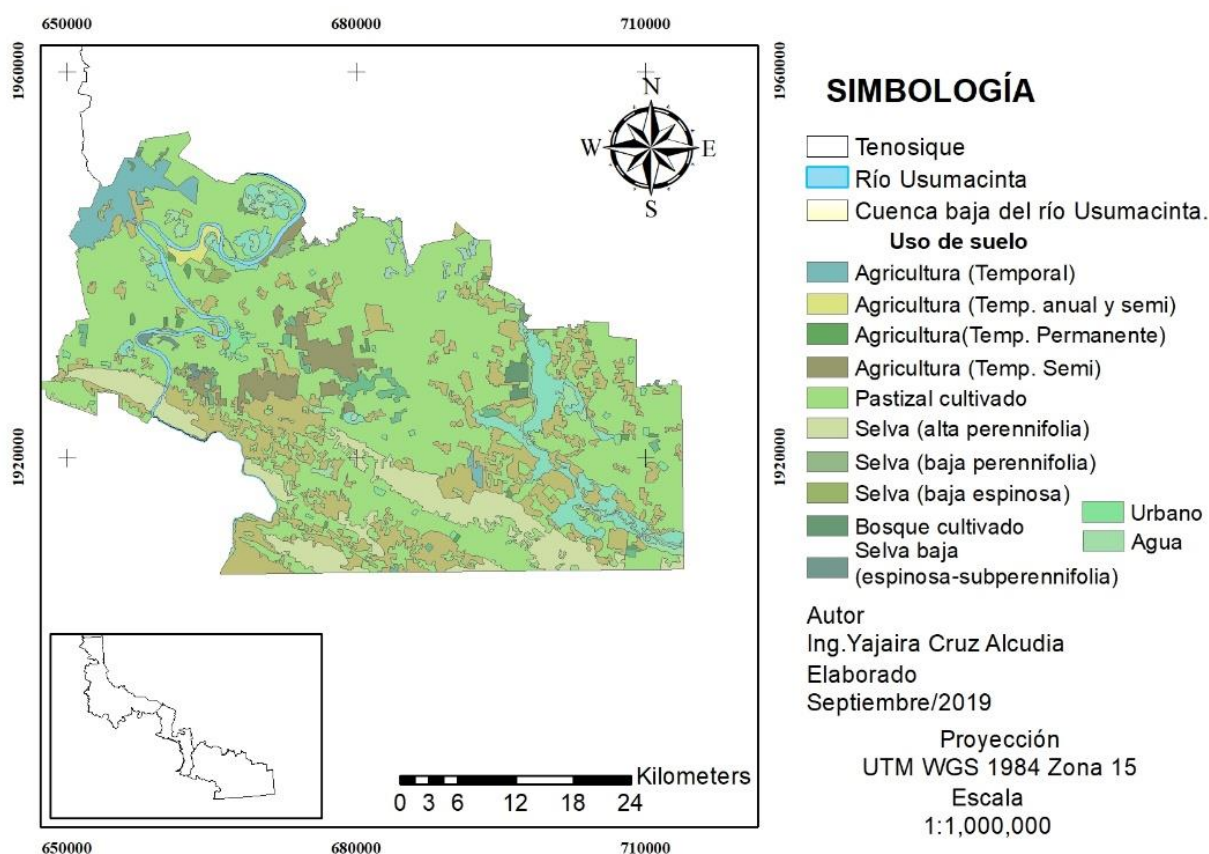


Figura 7. Uso de suelo Tenosique, Tabasco.

Los principales cultivos cíclicos en el municipio de Tenosique son; maíz, frijol, sorgo, calabaza y chile verde y perennes sandía, caña y palma (Cuadro 2). En cuanto a la ganadería predomina la producción de ganado y ave (Cuadro 3).

Cuadro 2. Tipos de cultivo en Tenosique, Tabasco

Tipo de cultivo	Superficie sembrada (Hectáreas)	Superficie cosechada (Hectáreas)
Total		
Cultivos cíclicos		
Maíz grano	8323	6398
Frijol	380	380
Sorgo grano	560	388
Calabaza (Semilla)	845	252
Chile verde	156	156
Cultivos perennes		
Sandía	102	91
Caña	3660	3050
Palma	2560	1696

Fuente Censo agrícola y ganadero (INEGI, 2016).

Cuadro 3. Producción de ganado y ave en Tenosique, Tabasco.

Municipio	Bovino	Porcino	Ovino	Ave	Guajolote
Total	12 617	851	46	594	147
Cabezas	8 957	8 957	1 330	293 968	19 215

Fuente Censo agrícola y ganadero (INEGI, 2016).

De acuerdo a la cartografía de uso de suelo en el municipio de Tenosique predomina el cultivo de pastizales para alimento del ganado. Además, se realiza agricultura de temporal para alternar con los periodos de pastoreo. La vegetación se encuentra selva alta, media y baja perennifolia y Tular (Figura 7).

2.3.2 Emiliano Zapata, Tabasco

Está ubicado entre los paralelos 17°25' y 17°58' de latitud Norte; los meridianos 91°33' y 91°50' de longitud Oeste; a una altitud entre 0 y 300 metros sobre el nivel del mar (Figura 8). Colinda al norte con los municipios de Jonuta, Balancán y el estado de Campeche; al este con los municipios de Balancán y Tenosique; al sur con el municipio de Tenosique y el estado de Chiapas y al oeste con el estado de Chiapas y el municipio de Jonuta, (INEGI, 2016).

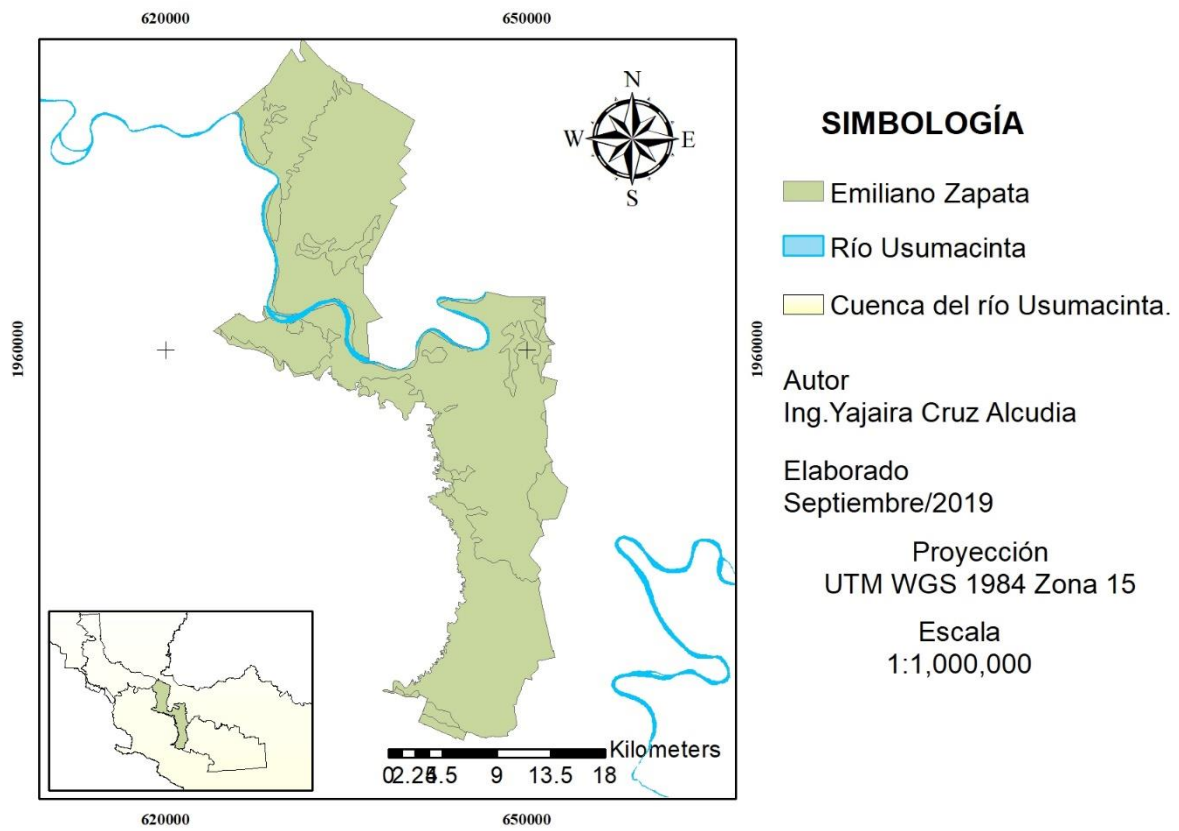


Figura 8. Municipio de Emiliano Zapata, Tabasco.

2.3.2.1 Fisiografía

La provincia es 100% llanura costera del Golfo Sur y de Subprovincia llanuras y pantanos, la topografía de lomerío está representada por 48.32% con llanuras y 51.68% de llanura aluvial costera inundable (INEGI, 2016).

2.3.2.2 Clima

Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y cálido húmedo con lluvias todo el año. El rango de precipitación es de 1500 a 3000 mm y la temperatura fluctúa entre los 26 y 28°C (INEGI, 2016).

2.3.2.3 Geología

El tipo de roca es Sedimentaria Arenisca (33.65%), conglomerado (5.36%), calizalutita (0.78%) y caliza (0.48%) Suelo: Aluvial (44.01%), palustre (5.76%) y lacustre (4.81%) (INEGI, 2016).

2.3.2.4 Tipo de suelo

En el municipio de Emiliano Zapata en el estado de Tabasco los suelos predominantes son Gleysol, Cambisol, Litosol, Luvisol, Regosol, Acrisol, Arenosol, Feozem y Vertisol (Figura 9) (INEGI, 2016).

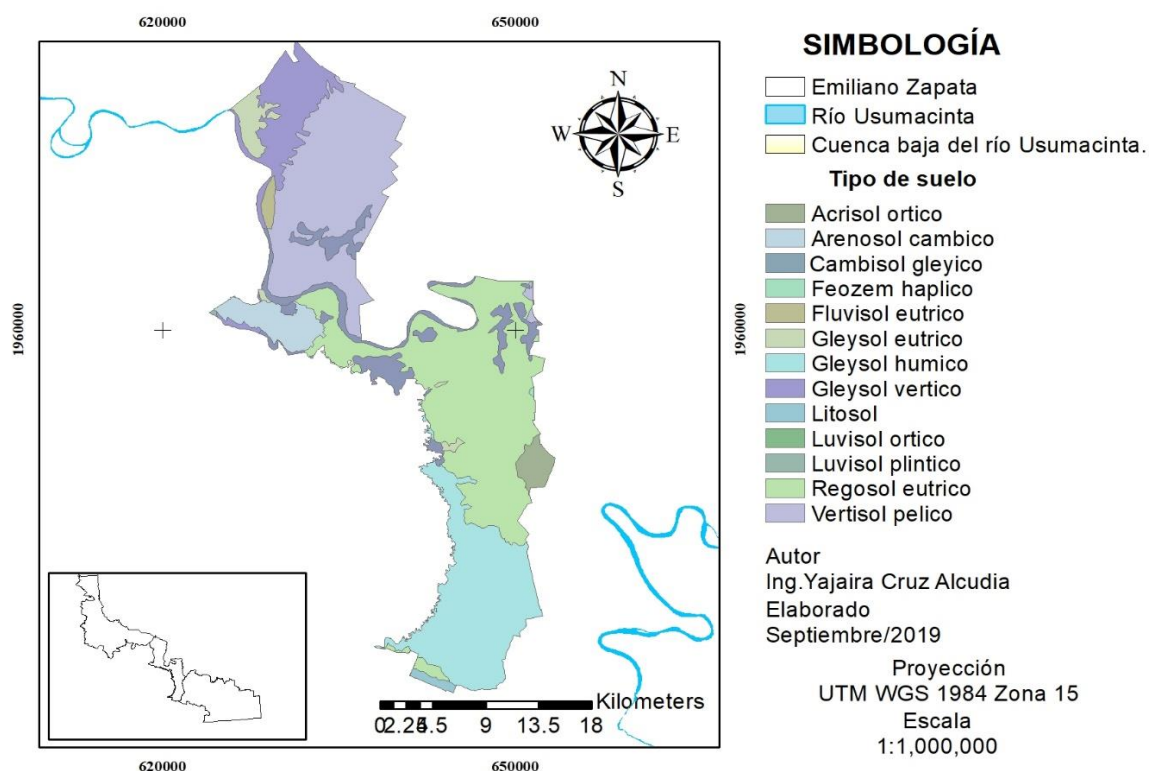


Figura 9. Tipo de suelo.

2.3.2.1 Uso de suelo

Los principales cultivos cíclicos en el municipio de Emiliano Zapata son; maíz, frijol, sorgo, calabaza y chile verde y perennes sandía, caña y palma y limonero (Cuadro 4). En cuanto a la ganadería predomina la producción de ganado y ave (Cuadro 5).

Cuadro 4. Tipos de cultivos en Emiliano Zapata, Tabasco.

Tipo de cultivo	Superficie sembrada (Hectáreas)	Superficie cosechada (Hectáreas)
Total		
Cultivos cíclicos		
Maíz grano	2620	2165
Frijol	80	80
Sorgo grano	1465	469
Calabaza (Semilla)	4	0
Chile verde	20	12
Cultivos perennes		
Sandía	40	36
Caña	0	0
Palma	2174	2174
Limonero	9	6

Fuente Censo agrícola y ganadero (INEGI, 2016).

Cuadro 5. Volumen de producción de ganado y ave en Emiliano Zapata, Tabasco.

Municipio	Bovino	Porcino	Ovino	Ave	Guajolote
Total	3 666	321	22	409	50
Cabezas	9 157	3 385	626	204 263	6 588

Fuente Censo agrícola y ganadero (INEGI, 2016).

De acuerdo a la cartografía de uso de suelo en el municipio de Emiliano Zapata el uso predominante es el cultivo de pastizales para alimento de ganado; se desarrolla la agricultura de riego y se encuentra vegetaciones características de la selva alta, media y baja perennifolia, así como también selva baja espinosa y Tular (Figura 10).

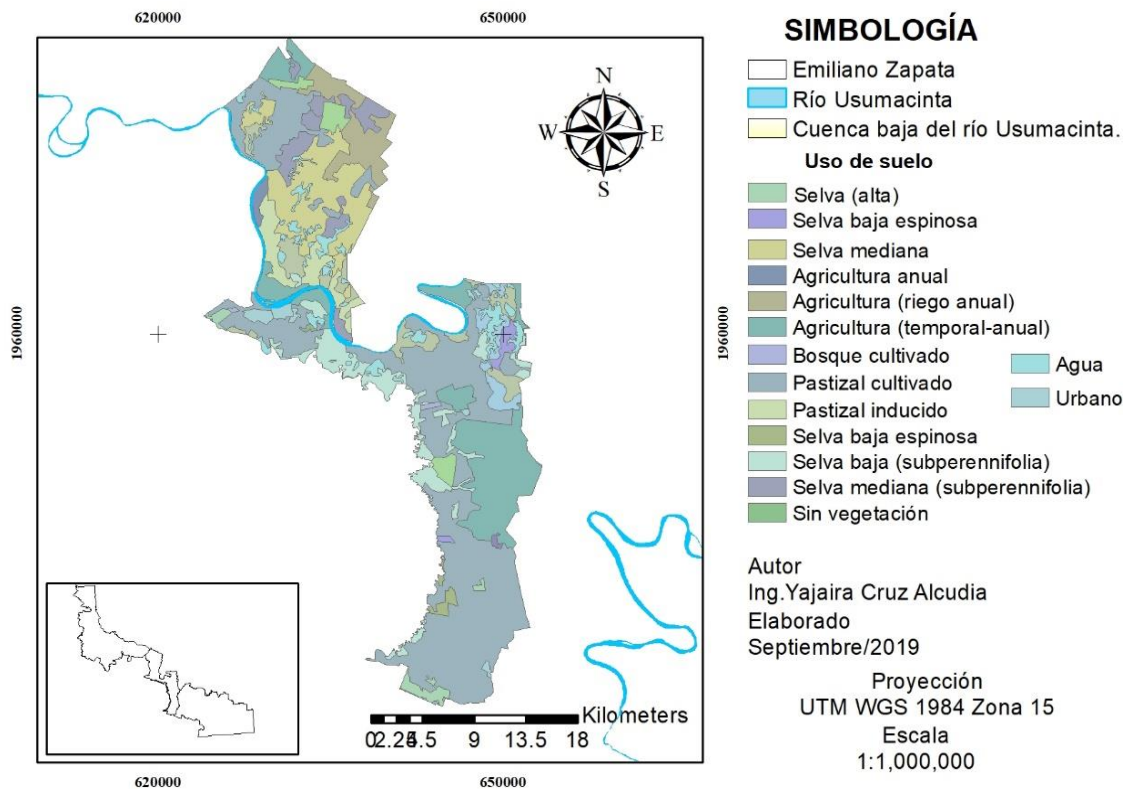


Figura 10. Uso de suelo Emiliano Zapata, Tabasco.

2.3.3 Jonuta

Está ubicado entre los paralelos 17°47' y 18°29' de latitud Norte; los meridianos 91°46' y 92°22' de longitud Oeste (Figura 11); su altitud oscila entre los 0 a 100 msnm. Colinda al norte con el estado de Campeche; al este con los estados de Campeche, Chiapas y el municipio de Emiliano Zapata; al sur con el estado de Chiapas y el municipio de Macuspana; al oeste con los municipios de Macuspana y Centla (INEGI, 2016).

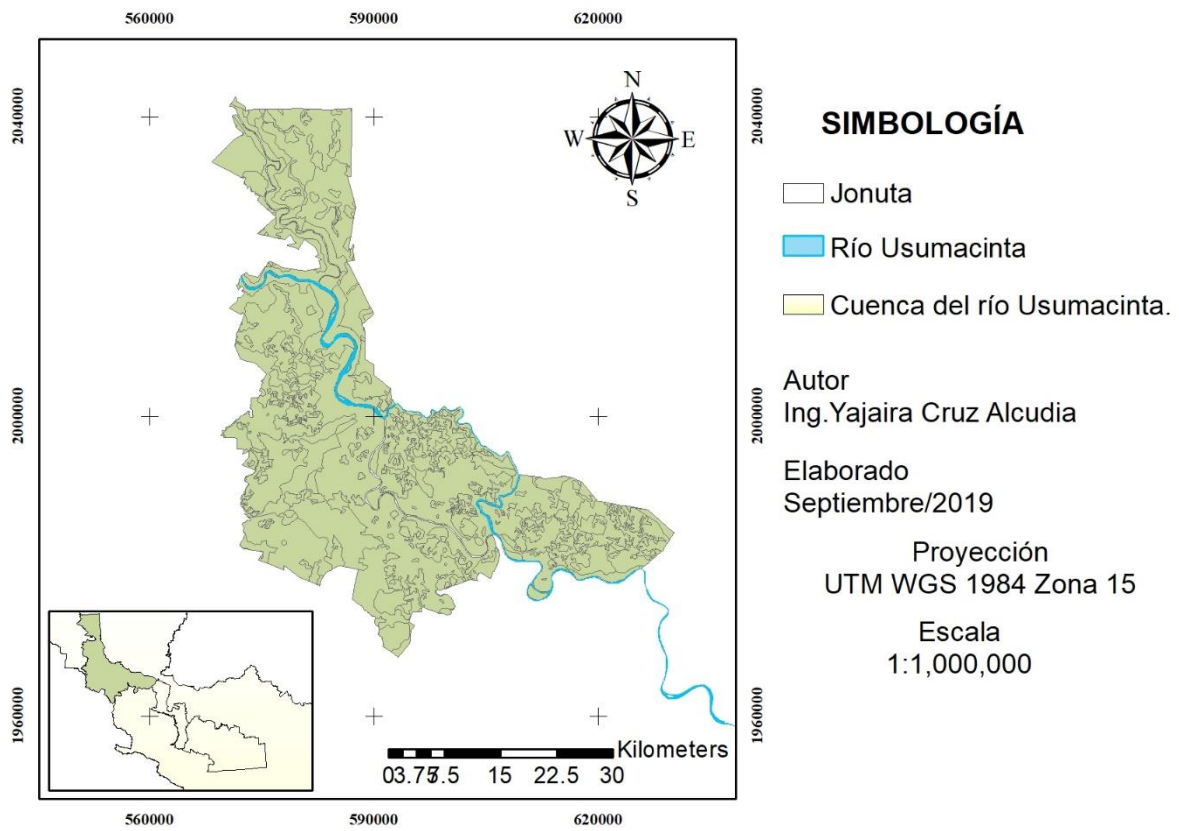


Figura 11. Municipio de Jonuta, Tabasco.

2.3.3.1 Fisiografía

Su fisiografía de provincia es llanura costera del Golfo Sur y de la Subprovincia son llanuras y pantanos Tabasqueños. La topo forma es llanura aluvial costera inundable (98.96%) y lomerío con llanuras (1.04%) (INEGI, 2016).

2.3.3.2 Clima

Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y cálido húmedo con lluvias todo el año, su rango de precipitación es de 1500 – 2500 mm y la temperatura oscila entre los 26 a 28°C (INEGI, 2016).

2.3.3.3 Geología

El tipo de roca es sedimentaria: arenisca (2.81%); suelo: palustre (55.55%), aluvial (29.00%), lacustre (5.76%) (INEGI, 2016).

2.3.3.4 Suelos.

De acuerdo a la carta edafológica, los suelos predominantes en el municipio de Jonuta son Gleysol y Vertisol (Figura 12) (INEGI, 2016).

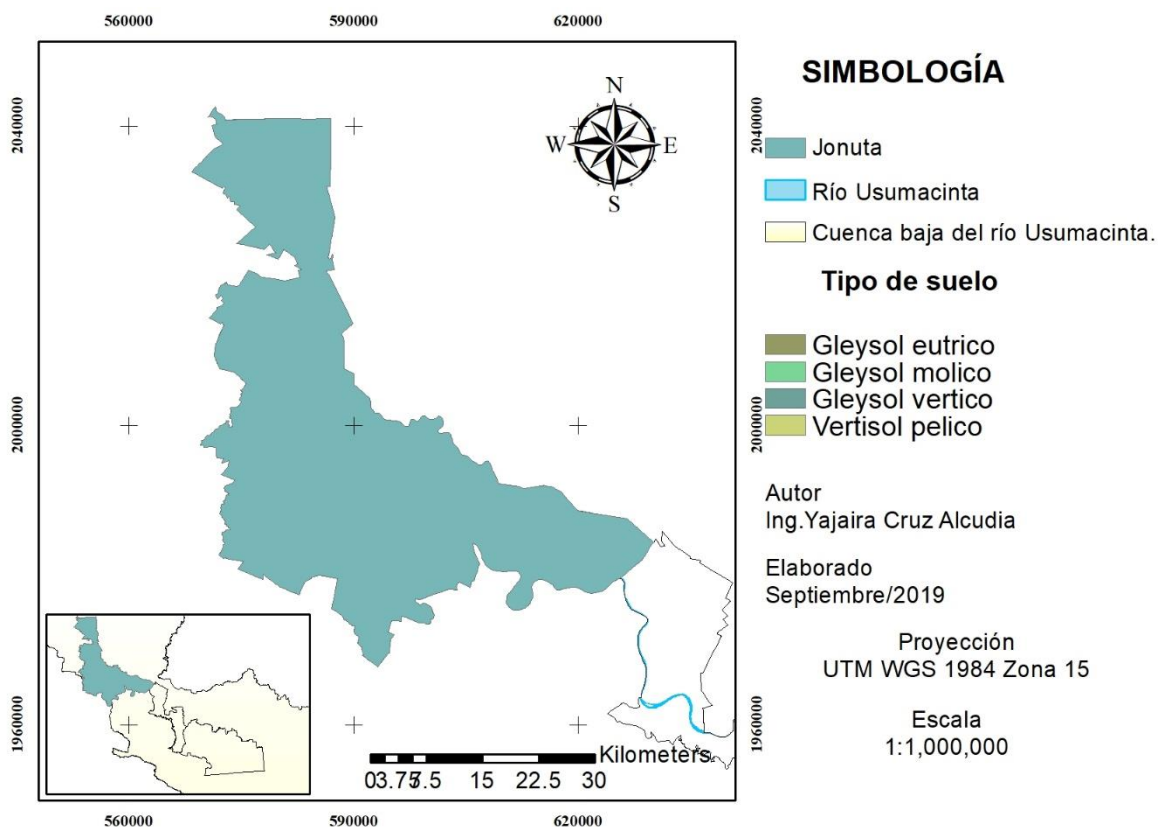


Figura 12. Tipo de suelo Jonuta, Tabasco.

2.3.3.5 Usos de suelo

Los principales cultivos cíclicos en el municipio de Jonuta son; maíz, frijol, sorgo, calabaza y chile verde; perenne, arroz (Cuadro 6). En cuanto a la ganadería predomina la producción de ganado y ave (Cuadro 7).

Cuadro 6. Tipos de cultivos en el estado de Tabasco.

Tipo de cultivo	Superficie sembrada (Hectáreas)	Superficie cosechada (Hectáreas)
Total		
Cultivos cíclicos		
Maíz grano	4800	2880
Frijol	41	41
Sorgo grano	300	280
Calabaza (Semilla)	13	13
Chile verde	252	252
Cultivos perennes		
Arroz	370	370

Fuente Censo agrícola y ganadero (INEGI, 2016).

Cuadro 7. Volumen de producción de ganado y ave.

Municipio	Bovino	Porcino	Ovino	Ave	Guajolote
Total	6 553	665	21	392	118
Cabezas	149 222	16 268	620	9 776	5 016

Fuente Censo agrícola y ganadero (INEGI, 2016).

De acuerdo a la cartografía de uso de suelo, predomina el pastizal cultivado el cual es utilizado para la agricultura temporal; se observan cuerpos de agua, como principal característica de la región (Figura 13) (INEGI, 2016). La vegetación es popal, seguido de selva alta, sabana y manglar (Figura 13).

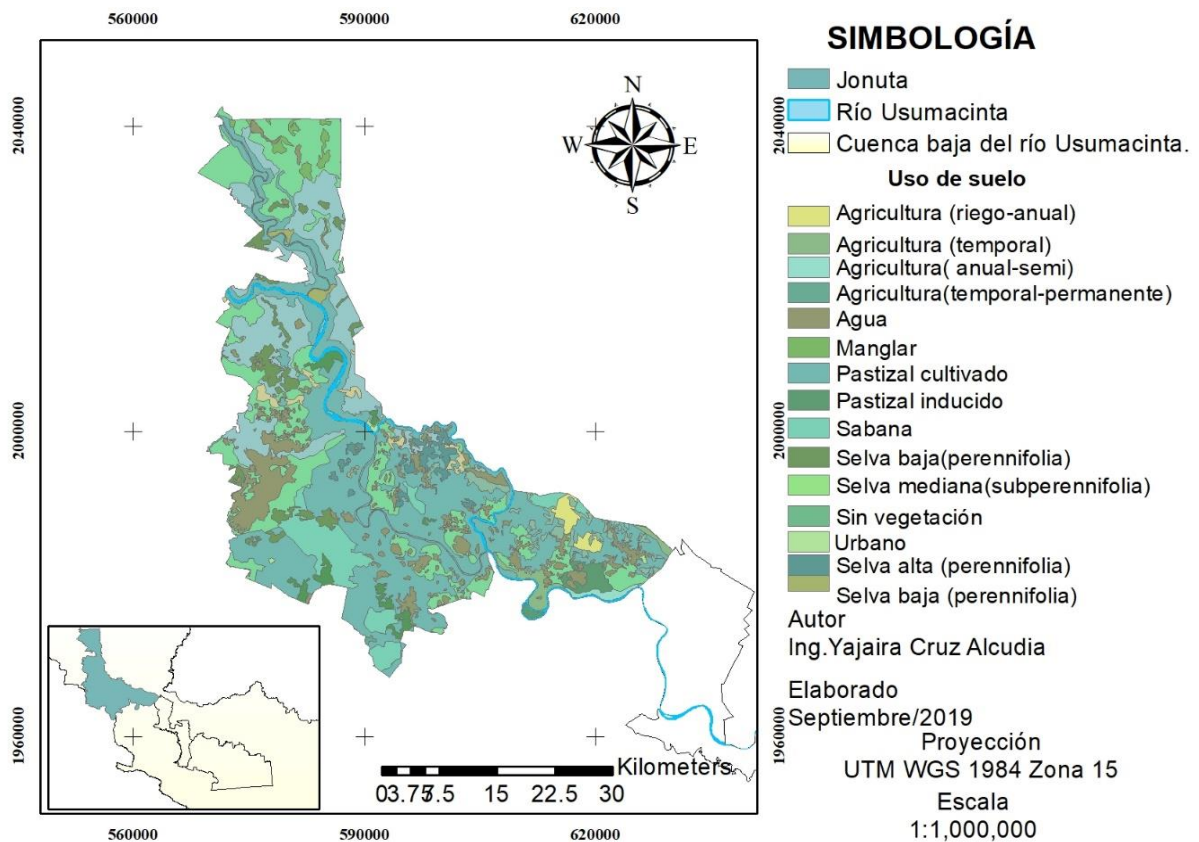


Figura 13 Uso de suelo Jonuta, Tabasco.

2.4 Contaminación del agua

El término contaminación se refiere a la adición de agentes físicos, químicos biológicos que causan modificaciones a los recursos naturales, al ambiente y a la salud (Odum, 1972). Cuando hablamos de contaminación del agua se refiere al deterioro producido por derrames, desechos o depósito de materiales que provocan cambios en las características físicas, químicas y bacteriológicas del ecosistema y que, además, a corto o mediano plazo afectan su calidad y función ecológica (Neiff, 2003).

La contaminación y la calidad de agua son temas que se abordan por igual; los factores que afectan la calidad del agua son considerados contaminantes. Los tres factores más importantes que evalúan la calidad del agua es la demanda química

de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos suspendidos totales (Graue *et al.*,2018).

La contaminación del agua principalmente en ríos y lagunas se debe a la presencia de metales pesados, nitratos, nitritos, fenoles, detergentes, hidrocarburos y materia orgánica. Estos compuestos pueden provenir de diferentes tipos y fuentes de contaminación puntual o difusa. Conocer la fuente de agua permite el monitoreo y control en la calidad de la misma (Figura 14) (Graue *et al.*,2018).

2.4.1 Contaminación Puntual

La contaminación puntual es un tipo de contaminación cuyas fuentes se concentran en un punto específico fácilmente identificable. Estas pueden ser reguladas mediante normatividad específica; las fuentes puntuales son principalmente de origen residual, industrial, alcantarillado, basurero municipal entre otros. Estas además de ser identificados pueden ser caracterizados (Inclán *et al.*, 2000).

2.4.2 Contaminación Difusa

La contaminación difusa es un tipo de contaminación cuya fuente no es atribuida a una fuente puntual; y presenta una asociación con la contaminación del agua y del aire. La contaminación difusa de los recursos hídricos ha tenido gran impacto en los cuerpos de agua. Una de las fuentes difusas son las escorrentías que proviene del sector agrícola, minería, rellenos de desechos peligrosos, derrames, tanques sépticos y disposición atmosférica que finalmente descargan en ríos, lagos y arroyos. El estudio de las fuentes de contaminación difusa puede ser complejo. La falta de información sobre sus efectos puede conducir a consecuencias irreversibles en el ecosistema y la vida acuática (Inclán *et al.*, 2000).

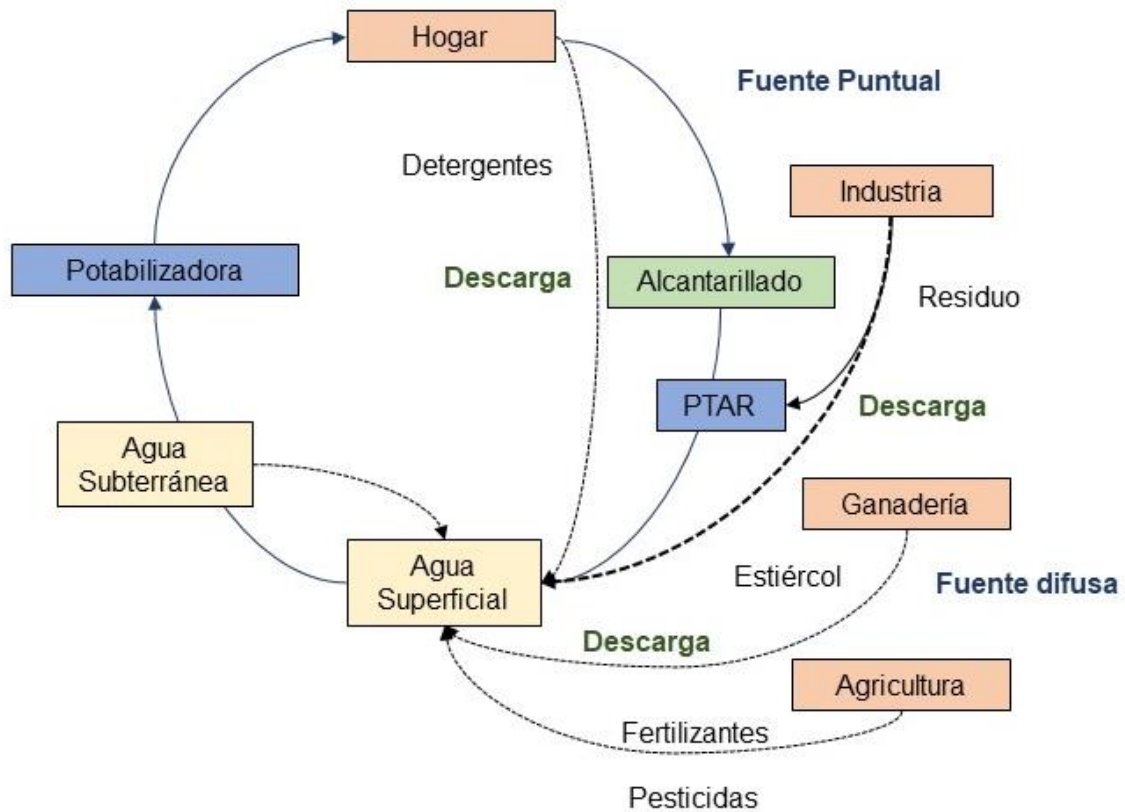


Figura 14 Ciclo de contaminación del agua (modificado de Barcelo y López, 2008).

2.4.2.1 Escorrentías

La escorrentía es un tipo de contaminación difusa es la parte de la precipitación pluvial que circula alimentando las corrientes superficiales, continuas o intermitentes, de una cuenca (Breña y Jacobo, 2006). La escorrentía es causante de la pérdida de nutrientes en áreas de cultivos, es considerada uno de los agentes erosivos dinámicos que contribuyen a la degradación de los suelos (Ellison, 1947). Esta degradación es progresiva e irreversible por el avance de la pérdida del suelo puede continuar con el tiempo y su recuperación puede ser extremadamente largo (Morgan, 1997).

2.4.2.2 Tipos de escorrentías

Existen distintos tipos de escorrentías dependiendo de su procedencia: escorrentía superficial, escorrentía hipodérmica y escorrentía subterránea (Breña y Jacobo, 2006). En el proceso de la escorrentía se deben considerar variables como; intensidad de la precipitación, capacidad de infiltración y la condición hidráulica del suelo (Flores *et al.*, 2003).

Escorrentía Superficial o Directa

Es resultado de la precipitación que no se infiltra y llega a la red de drenaje sobre la superficie del terreno; se junta con otros componentes y constituyen la escorrentía total (Breña y Jacobo, 2006).

Escorrentía hipodérmica

La escorrentía hipodérmica o subsuperficial, resulta de la precipitación que ha infiltrado en las primeras capas del suelo, posteriormente se mueve sub horizontalmente por los horizontes superiores y nuevamente sube en forma de encharcamientos que logran incorporarse a la red de drenaje (Breña y Jacobo, 2006).

Escorrentía Subterránea

La escorrentía subterránea, resulta de la precipitación que se infiltra hasta el nivel freático y llega de manera más lenta en comparación con la escorrentía superficial hasta la red de drenaje de la cuenca (Breña y Jacobo, 2006).

2.4.2.3 Proceso de escorrentía

El agua producto de la precipitación que no se infiltra en el suelo se desplaza el terreno. Posteriormente, si la precipitación es en exceso los suelos presentan una condición de saturación dando lugar a una escorrentía superficial, en ese punto del proceso la escorrentía puede incorporarse a algún tributario del sistema de drenaje de la cuenca (escurrimiento total) (Chow, 1988).

Lo que implica que, el agua que comenzó a infiltrarse en los suelos (escorrentía subsuperficial) logre percolarse a sistemas más profundos alimentando el acuífero. Por último, el escurrimiento puede seguir dos direcciones que a través del agua subterránea se incorpore a un tributario y/o que regrese a la superficie por evotranspiración (Figura 15) (Chow, 1988).

La cantidad de escorrentía depende en su mayoría de la intensidad de la precipitación; la forma como se desplaza depende de la capacidad de infiltración del suelo y contenido de humedad del suelo (Cuadro 8). Conocer la dinámica de la escorrentía permite evaluar con respecto al tiempo el transporte de contaminantes del suelo hacia aguas superficiales (Breña y Jacobo, 2006).



Figura 15. Escorrentía en el ciclo hidrológico (Breña y Jacobo, 2006).

2.5 Contaminación por nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de las especies en ambientes acuáticos (Morales y Chávez, 2010); es un compuesto esencial para el desarrollo de la vida ya que forma parte de moléculas como la proteína y el ADN; se encuentra en mayor parte en la atmosfera en forma gaseosa N_2 y lo más importante el 71% de la composición total del aire es nitrógeno (Sandoval *et al.*, 2017).

Cuadro 8. Dinámica de la escorrentía.

Variables	Dinámica
Sí la Intensidad de precipitación es menor que la capacidad de infiltración y contenido de humedad del suelo.	El escurrimiento sobre la superficie del terreno será reducido debido a que el suelo será capaz de captar la mayor parte del volumen de agua que llega como precipitación.
Sí la Intensidad de precipitación es menor que la capacidad de infiltración, pero el contenido de humedad del suelo es menor o igual que la capacidad de campo.	Debido a que, el suelo se encuentra en una condición cercana a la capacidad de campo, parte de la precipitación se convertirá eventualmente en escurrimiento sobre el terreno
Sí la Intensidad de precipitación es mayor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo es menor que la capacidad de campo.	El suelo presenta una deficiencia de humedad. Por lo tanto, el agua que precipite se utilizará en abastecer de humedad al suelo, escurriendo sólo una porción relativamente pequeña.
Sí Intensidad de precipitación es mayor que la capacidad de infiltración, pero el contenido de humedad del suelo es mayor o igual a la capacidad de campo.	Al encontrarse el suelo o roca en una condición cercana a la saturación, no permitirá una infiltración importante, de modo que la mayor parte se convertirá en escurrimiento sobre el terreno.

Fuente: Breña y Jacobo, 2010.

En ecosistemas acuáticos cuando el nitrógeno se encuentra en abundancia puede ocasionar problemas de eutrofización, este proceso puede desarrollarse de manera natural y a corto o mediano plazo afectar la calidad del agua; las actividades

humanas han acelerado el proceso de eutrofización de los cuerpos de agua aledaños (Morales y Chávez, 2010).

Actualmente se reconoce a la agricultura y ganadería como fuente de contaminación difusa (Ávila *et al.*, 2007); es una actividad que prevalece con una serie de malas prácticas e incrementos en la demanda alimenticia (Salazar *et al.*, 2009). Son consideradas fuentes de contaminación de ecosistemas acuáticos por el aumento significativo de fertilizantes utilizados sobre todo en terrenos con poca superficie. Los fertilizantes más utilizados son nitrógeno inorgánico como la urea y orgánicos como el estiércol; los cuales tienen bajos índices de asimilación por el cultivo y provocan un aumento en la concentración de nitratos en el suelo, amoníaco y óxido nítrico a la atmósfera (Figura 16 y Figura 18) (Garzón y Cárdenas, 2011).

Las generaciones de nitratos en las capas superficiales del suelo son arrastradas por escorrentía a terrenos con problemas de alta erosión hídrica y lixiviación e incrementan las concentraciones de nitrógeno en el cuerpo receptor (Cerón y Aristizábal, 2012).

En la ganadería la alimentación de rumiantes requiere de una gran cantidad de proteínas para la reproducción, crecimiento y lactancia (Salazar, 2006). Pese a que los rumiantes pueden utilizar otras fuentes de nitrógeno por su habilidad especial de sintetizar aminoácidos y de formar proteína desde nitrógeno no proteico (Mejía y Mejía, 2007); los desechos de estos animales son utilizados para nutrir nuevamente la tierra principalmente pastizales. La cantidad de nitrógeno que aportan al suelo es descontrolada puesto que dependen del número de rumiantes, consumo de materia seca, concentración proteica y dieta (Salazar, 2006).

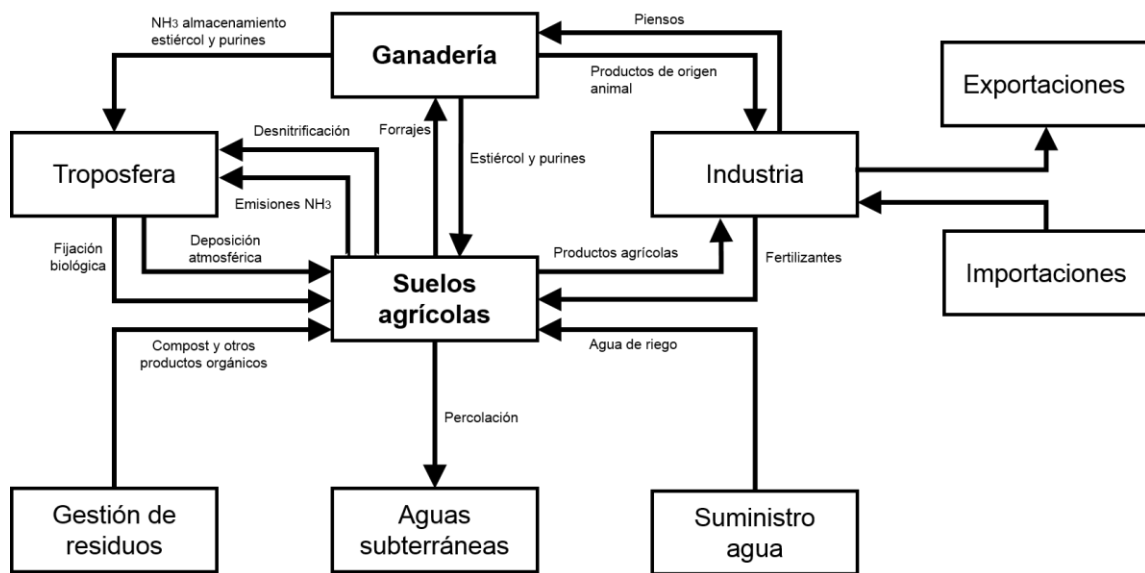


Figura 16 Impactos del nitrógeno.

2.5.1 Ciclo del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno es uno de los más importantes por su interacción con los organismos y el ambiente (Ávila *et al.*, 2002). Las etapas principales del ciclo del nitrógeno son; fijación, asimilación, amonificación, nitrificación y desnitrificación (Figura 17) (Hayatsu *et al.*, 2008).

Fijación

La fijación es el inicio del ciclo del nitrógeno, ya que la fijación del nitrógeno consiste en la transformación del nitrógeno atmosférico (N_2) a nitrógeno amoniacal (NH_3), la cual es una forma asimilable para otros organismos. Las bacterias que intervienen en este proceso emplean la enzima nitrogenasa para romper el enlace de la molécula de N_2 y combinarlo con hidrógeno (Hayatsu *et al.*, 2008).

Asimilación

En la asimilación, las raíces de las plantas absorben el amoníaco (NH_3), e incorporan el nitrógeno a proteínas, ácidos nucleicos y clorofila. Mientras que los animales que consumen compuestos nitrogenados a través de las plantas, liberan este nitrógeno en forma orgánica (Hayatsu *et al.*, 2008).

Amonificación

La amonificación es la conversión a ion amonio del nitrógeno. Esto se da cuando, los desechos de animales o plantas son descompuestas por microorganismos (bacterias y hongos) y mediante su metabolismo liberan el exceso de nitrógeno en forma de amoniaco, reincorporándose al ciclo (Hayatsu *et al.*, 2008).

Nitrificación

Es el proceso por el cual varias especies de bacterias son capaces de oxidar el amoníaco (NH₃). Este tipo de bacterias pertenecen a dos grupos, el primer grupo (nitrosomas) oxida el amoníaco a nitrito de la siguiente manera:

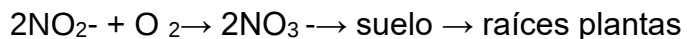
Las bacterias nitrificantes autótrofas oxidan el amoniaco NH₃ hasta hidroxilamina (NH₂OH), mediante la enzima monooxigenasa. Una vez obtenida la hidroxilamina es oxidada a nitrito, por acción de otra enzima llamada hidroxilamina oxidoreductasa (Hayatsu *et al.*, 2008).

Reacción



El segundo grupo de bacterias nitrificantes autótrofas (nitrobacter) oxidan el nitrito a nitrato, a través de la enzima nitrito oxidoreductasa (Pacheco *et al.*, 2002).

Reacción



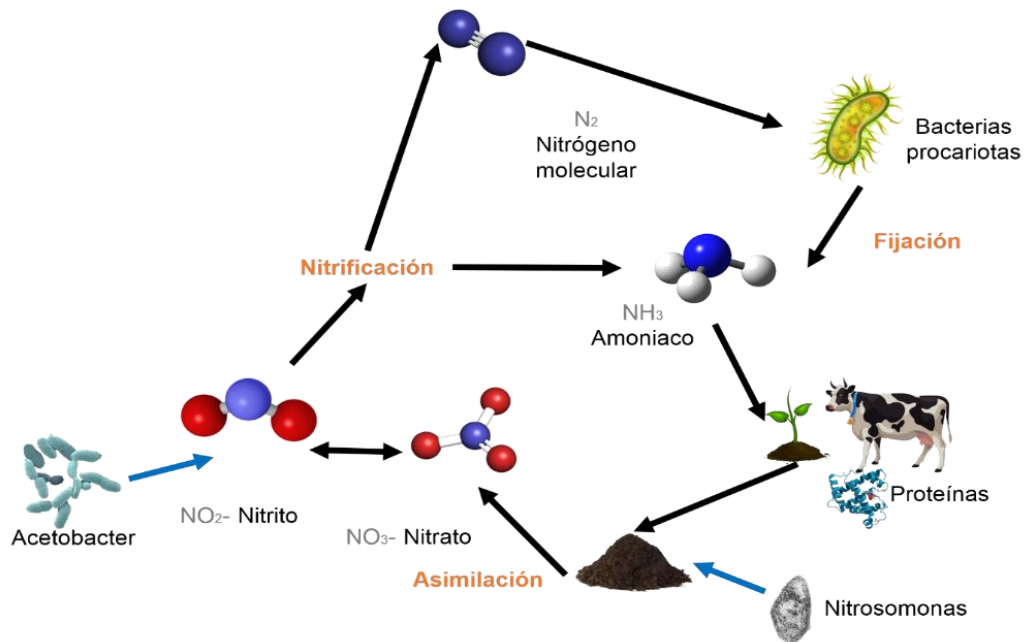


Figura 17. Ciclo Biogeoquímico del nitrógeno (Fuente propia).

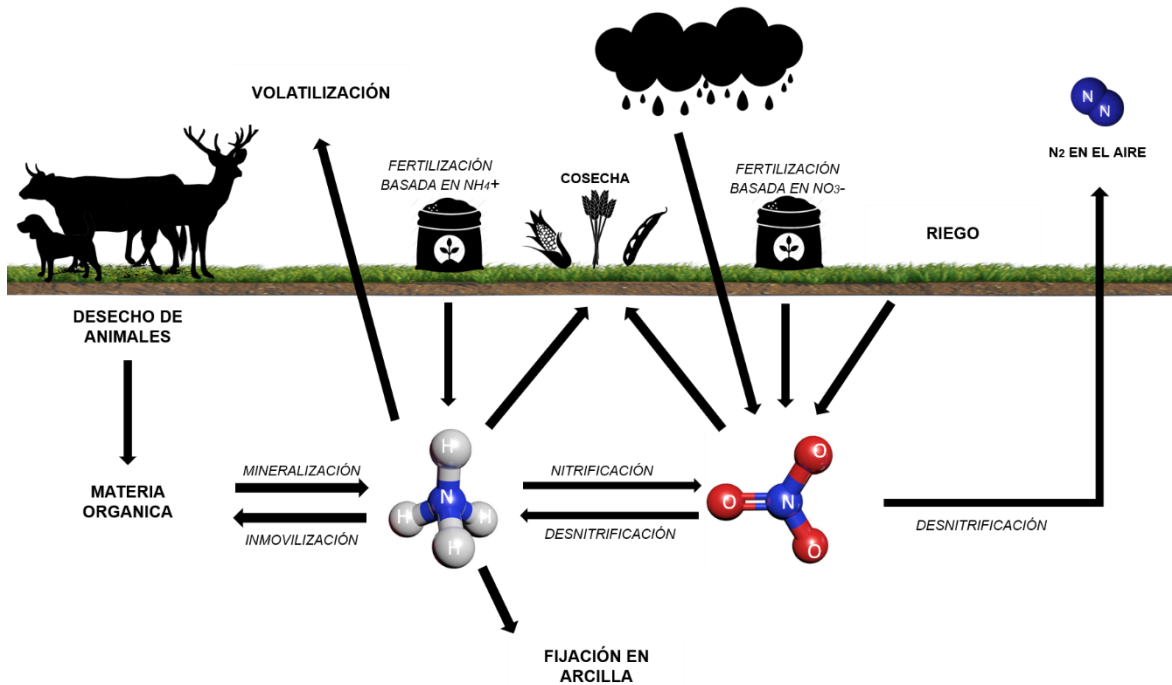


Figura 18. Ciclo del nitrógeno y el hombre (modificado de Pacheco, 2006).

2.5.2 Exportación de nitrógeno.

La exportación de este compuesto se refiere al nitrógeno transferido desde el suelo hacia la superficie a través de la raíz de la planta. Este fenómeno se da por medio del ingreso del nitrógeno proveniente de distintas fuentes naturales o antropogénicas a los suelos; posteriormente la planta asimila lo necesario para su crecimiento, y el resto lo “exporta” hacia la superficie (Hernán *et al.*, 2015). Por lo tanto, la exportación de nitrógeno es una forma de interpretar y detectar las cantidades de este compuesto en determinada superficie.

La exportación de nitrógeno también conocido como coeficiente de exportación, se utiliza en las investigaciones bajo la interpretación de carga de contaminante promedio anual por unidad de área de tierra y se expresa en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; los contaminantes más comunes para los que generalmente se utiliza nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) (Lin, 2004). Hasta el momento, no se cuentan con rangos o niveles de exportación de nitrógeno en la normatividad nacional. La cual puedan ser de utilidad para propósitos de regulación y planificación. Existen datos publicados de exportación de nitrógeno en cuencas con distintos usos de suelo, que sirven de base para la estimación de la exportación de este compuesto (Beaulac y Reckhow 1982).

La investigación de Likens y Bormann (1995), sobre la exportación de nutrientes entre ellos el nitrógeno, muestra los factores que más influencia tienen en la exportación de este compuesto, los cuales fueron: cobertura vegetal, uso de suelo e hidrología. Campbell y colaboradores (2004) asocian la exportación de nutrientes a la alteración de la cuenca por actividades antrópicas y/o climáticas como precipitaciones intensas o tormentas. Chapman (1997) y Salmon (2001) muestran la influencia de la precipitación, saturación del suelo y tiempo de residencia; en la exportación de nitrógeno. Oyarzun y Hubber (2003) asocian el uso de suelo con el incremento de nutrientes en aguas superficiales.

3. Justificación

Las cuencas hidrográficas son un cuerpo receptor de la exportación de nutrientes; éstas reciben de manera directa e indirecta altas concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos, producto de las actividades agropecuarias (Álvarez y Angeler, 2007). Las actividades agropecuarias son consideradas a nivel global las principales fuentes de impacto a los ecosistemas acuáticos (Sánchez, 2016). Esto se debe a que por adición de nutrientes tienen la capacidad de cambiar el estado trófico de un cuerpo de agua a otro de nivel superior (Mazari, 2012). Comúnmente el estado trófico de un cuerpo de agua se basa en el nutriente limitante el cual es el fósforo, sin embargo; de acuerdo con Camargo y Alonso (2007), existe en la actualidad evidencia creciente de que el nitrógeno también puede actuar como nutriente limitante, principalmente en concentraciones elevadas en forma de nitrógeno de nitratos., este favorece el crecimiento de fitoplancton, algas bentónicas y macrófitos; además de ocasionar acidificación de ríos y lagos con baja o reducida alcalinidad e infiltrarse en aguas subterráneas para ocasionar daños a la salud como la metahemoglobinemia en niños (Larios, 2009).

La cuenca baja del río Usumacinta se caracteriza los asentamientos humanos y desarrollo de agrícola y ganadero, recibe los impactos acumulados a lo largo de toda la cuenca hasta su desembocadura en el mar (Cotler *et al.*, 2013). Actualmente se encuentra entre las seis cuencas fronterizas con mayor impacto al ambiente por adaptaciones de tierra para cultivos (García y Kauffer, 2009), y la pendiente de los terrenos favorece que la escorrentía exporte nitrógeno de los suelos hacia aguas superficiales (Collado, 2008), debido a esto se han detectado zonas de hipoxia en la desembocadura del río Usumacinta.

La determinación de la exportación de nitrógeno en áreas con alta actividad agropecuaria permite medir el impacto antropogénico lo que resulta de utilidad para propósitos de planificación ya que, hasta el momento, no se tienen registros en la normatividad vigente de los rangos o niveles de exportación admisible de nitrógeno y sus respectivas consecuencias medioambientales. Por, lo anterior, el presente

proyecto tuvo como el objetivo de evaluar la exportación de nitrógeno disuelto en las escorrentías hacia agua superficiales con distintos tipos y uso de suelo en las zonas agropecuarias de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

4. Hipótesis

El transporte de compuestos nitrogenados provenientes de las fuentes difusas de contaminación, hacia aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta, puede modificar la calidad del agua y generar eutrofización. Esto produce una relación inversamente proporcional entre el nivel de exportación de nitrógeno y la calidad del agua.

5. Objetivos

5.1 Generales

Evaluar la variación de la exportación de nitrógeno de las escorrentías hacia agua superficiales en distintos tipos y usos de suelo en zonas agropecuarias de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

5.2 Específicos

Determinar la concentración de nitrógeno total (NT) y nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) en aguas superficiales y escorrentías en zonas agropecuarias por tipo y uso de suelo en la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

Calcular la exportación de NT y N-NO_3^- en escorrentías de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

Determinar si existe relación entre la exportación de NT y N-NO_3^- y su concentración en aguas superficiales en la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco.

6. Materiales y Métodos

6.1 Área de estudio.

La presente investigación se realizó en la cuenca baja del río Usumacinta localizada en el estado de Tabasco entre los paralelos 14° 50' y 18° 45' de latitud Norte y los meridianos 89° 20' y 92° 40' de longitud al Oeste; La cuenca baja del río Usumacinta cuenta con una superficie total de aproximadamente 7,245.47 km² (March Mifsut y Castro, 2010); Interactúa con las subregiones los Ríos y Pantanos en el estado de Tabasco y pertenece a la región hidrográfica del Río Usumacinta. El área de estudio se distribuye en los municipios de Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta pertenecientes al estado de Tabasco (Figura 19).

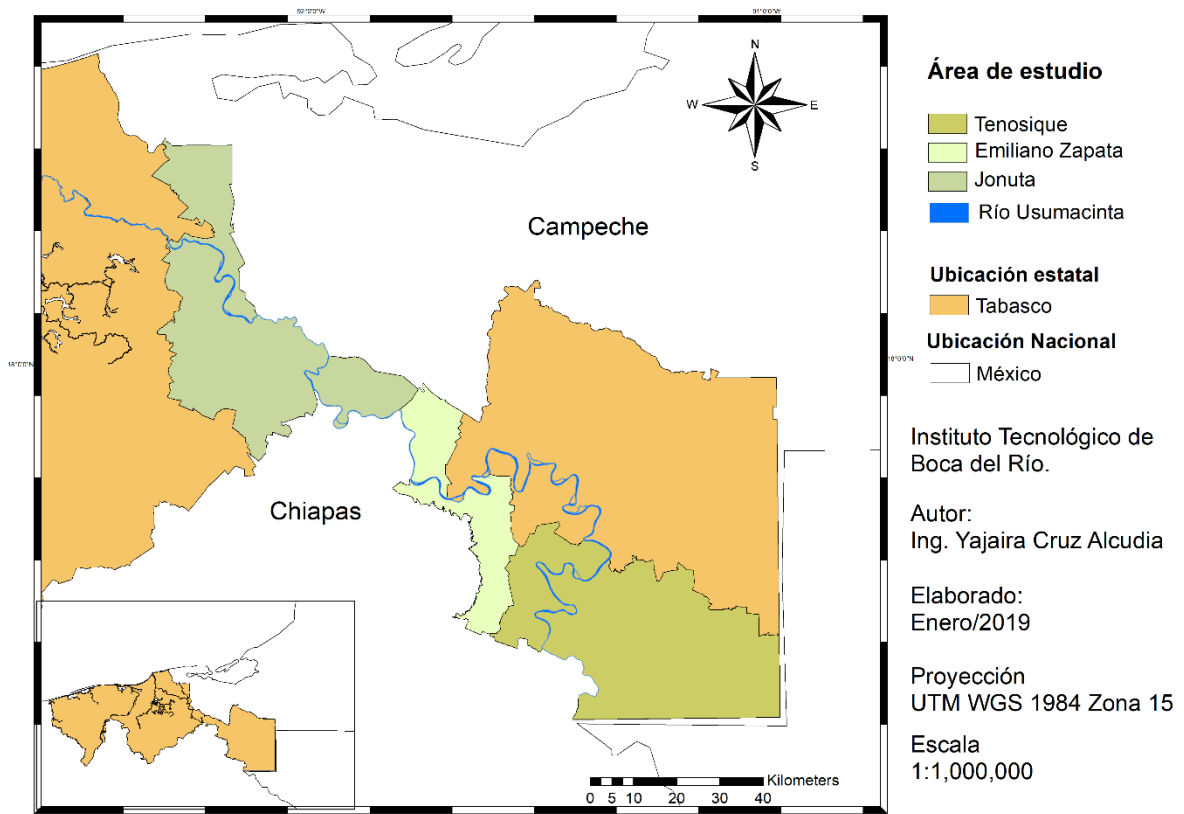


Figura 19. Delimitación del área de estudio.

6.1.1 Condiciones climáticas

El clima en la cuenca baja del río Usumacinta es cálido y húmedo con lluvias todo el año y transición a semicálido en regiones montañosas (Carabias *et al.*, 2015). De acuerdo con los valores reportados del año 2011 al año 2015 reportados por el CICESE, la cuenca baja presenta una temperatura promedio anual de 27 °C, mínima anual de 26 °C y máxima anual de 32 °C; la precipitación anual oscila entre 1421 y 1885 mm (CICESE, 2015).

6.1.2 Edafología

El suelo que presenta la mayor extensión territorial es gleysol (eutrico, húmico, molico y vertico) y vertisol pelico; de acuerdo con la información proporcionada por la carta edafológica 1:600,000 del INEGI (2018) (Figura 20).

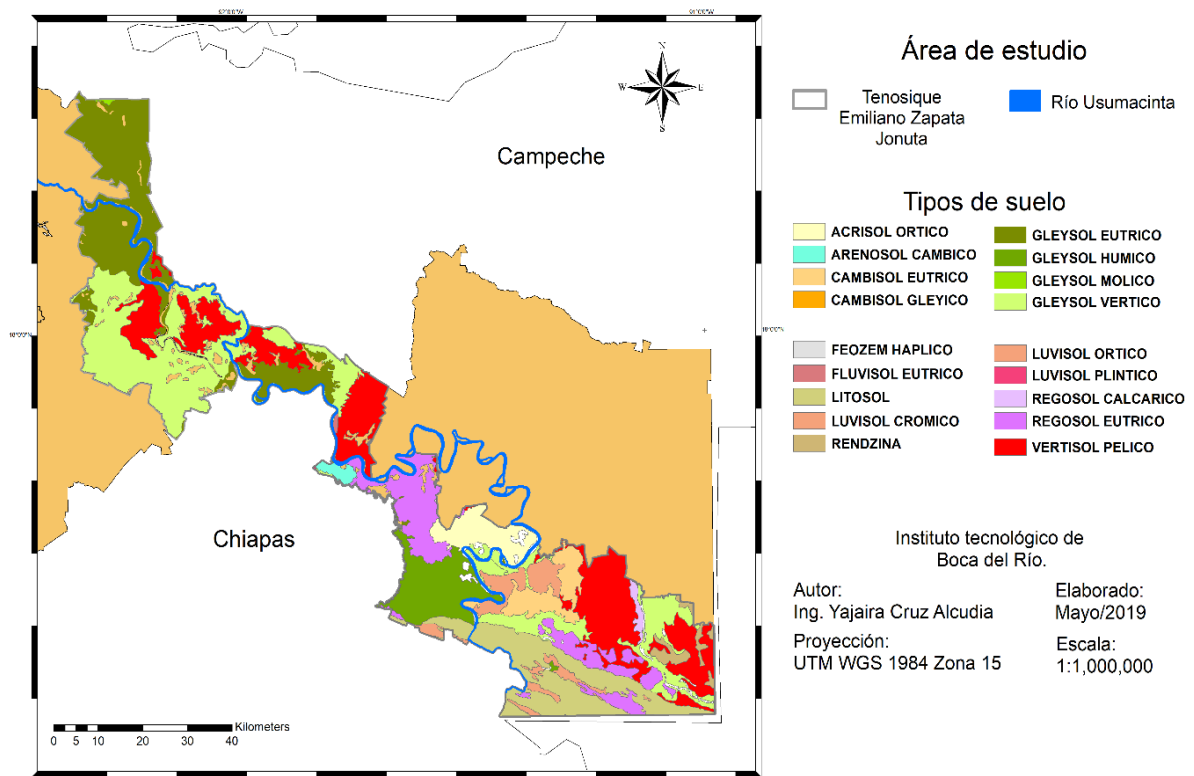


Figura 20. Tipo de suelo en área de estudio.

La estructura del suelo gleysol presenta grietas superiores a 1 cm de ancho en los primeros 50 cm superficiales, contenido de arcilla superior al 35% y alto contenido de nutrientes para las plantas dentro de los 50 cm superficiales, además de una conductividad eléctrica de 4 a 16 mmhos/cm y una condición de inundación casi permanente sólo permite el crecimiento de vegetación acuática como popal-Tular y selvas muy alteradas (mediana subperennifolia y baja caducifolia), y pastizales cultivados e inducidos (INEGI,2016).

6.1.3 Uso de suelo

El uso de suelo que presenta mayor extensión territorial en el área de estudio es la actividad pecuaria. Se registra Pastizal cultivado e inducido y agricultura de semi temporal y temporal (INEGI, 2018) (Figura 21).

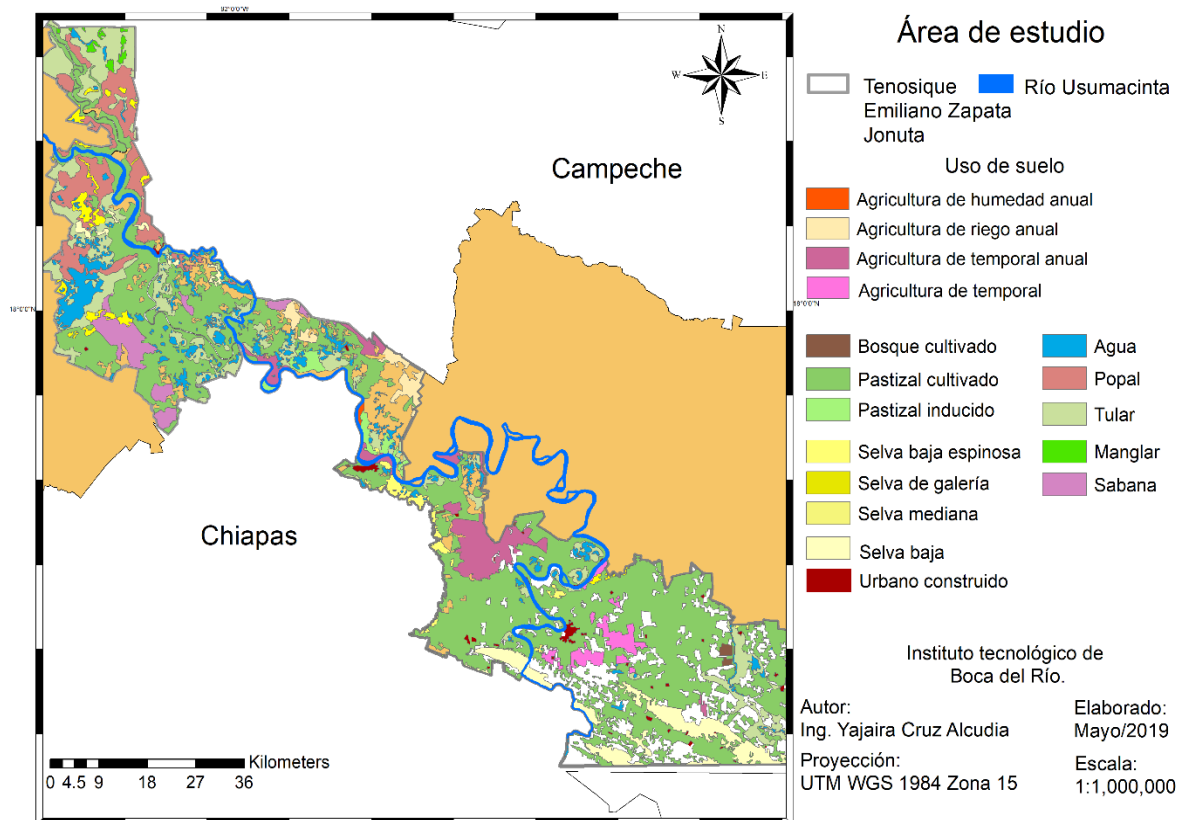


Figura 21. Uso de suelo del área de estudio.

Los pastizales en el área de estudio requieren de fertilización la cual supervisa por voleo, bajo tierra, por aspersión o en surcos, este último es el más común ya que se emplea para los pastos de corte o cultivos destinados al consumo del ganado. La fertilización de los pastos se realiza después de cada corte o pastoreo según las condiciones del suelo con fertilizante compuesto o simple (nitrógeno) (ICA, 1992).

6.2 Muestreo

6.2.1 Sitios de muestreo

Los criterios de selección para la toma de muestra de aguas superficiales fueron vías de acceso e impacto de las actividades antropogénicas; una vez identificados se ubicaron los sitios de Puente Boca del Cerro, Puente Chablé y puente Jonuta (Figura 22) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Sitios de muestreo de agua superficial.

Clave	Ubicación	Coordenadas	
		Latitud (N)	Longitud (O)
R1	Puente Boca del Cerro	17.427387	-91.490958
R2	Puente Chablé	17.856130	-91.784002
R3	Puente Jonuta	18.100300	-92.143470

Los criterios de selección de sitios para la colecta de muestras de escorrentías fueron tipo y uso de suelo, distribuidos en forma representativa en los municipios de Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta, en la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco (Cuadro 10) (Figura 22).

6.2.2 Periodicidad y procesamiento de muestras.

6.2.2.1 Aguas superficiales

Las muestras de agua superficial fueron recolectadas durante un ciclo anual (mayo 2017 - mayo 2018); en doce campañas de muestreo de las que se obtuvieron doce muestras por cada sitio; cada muestra de agua superficial fue recolectada en envases de plástico de 500 ml. El manejo y transporte fue realizado de acuerdo a lo

establecido en el procedimiento CAQAF4-01, por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2017).

Cuadro 10. Sitios de muestreo de escorrentías.

Clave	Ubicación	Coordenadas	
		Latitud (N)	Longitud (W)
ES1	Tenosique	17.42088	-91.32781
ES2		17.34184	-91.29725
ES3		17.43081	-91.39028
ES4		17.42222	-91.41827
ES5		17.46101	-91.42051
ES6		17.44561	-91.46053
ES7		17.48575	-91.4281
ES8		17.55519	-91.46053
ES9		17.58431	-91.55359
ES10		17.58431	-91.55359
ES21	Emiliano Zapata	17.74448	-91.80569
ES23		17.72065	-91.74435
ES24		17.71564	-91.74349
ES25		17.72649	-91.75173
ES26		17.73012	-91.74776
ES27		17.72919	-91.74223
ES28		17.71184	-91.70594
ES30		17.94956	-92.14879
ES32	Jonuta	17.96767	-92.14959
ES39		17.98832	-92.16231
ES40		17.98654	-92.15279

Las muestras de escorrentía superficial fueron recolectadas durante la temporada de lluvias dentro de las campañas del plan de muestreo de las que se obtuvieron veintiún muestras; el procedimiento consistió en colocar tres dispositivos *Storm Water Sampler Mca. Nalgene* por punto de muestreo, cada uno con una botella muestreadora; una vez registradas las primeras lluvias, los dispositivos fueron recolectados. El manejo y transporte de muestras de acuerdo a lo establecido en el

procedimiento CAQAF4-01 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2017).

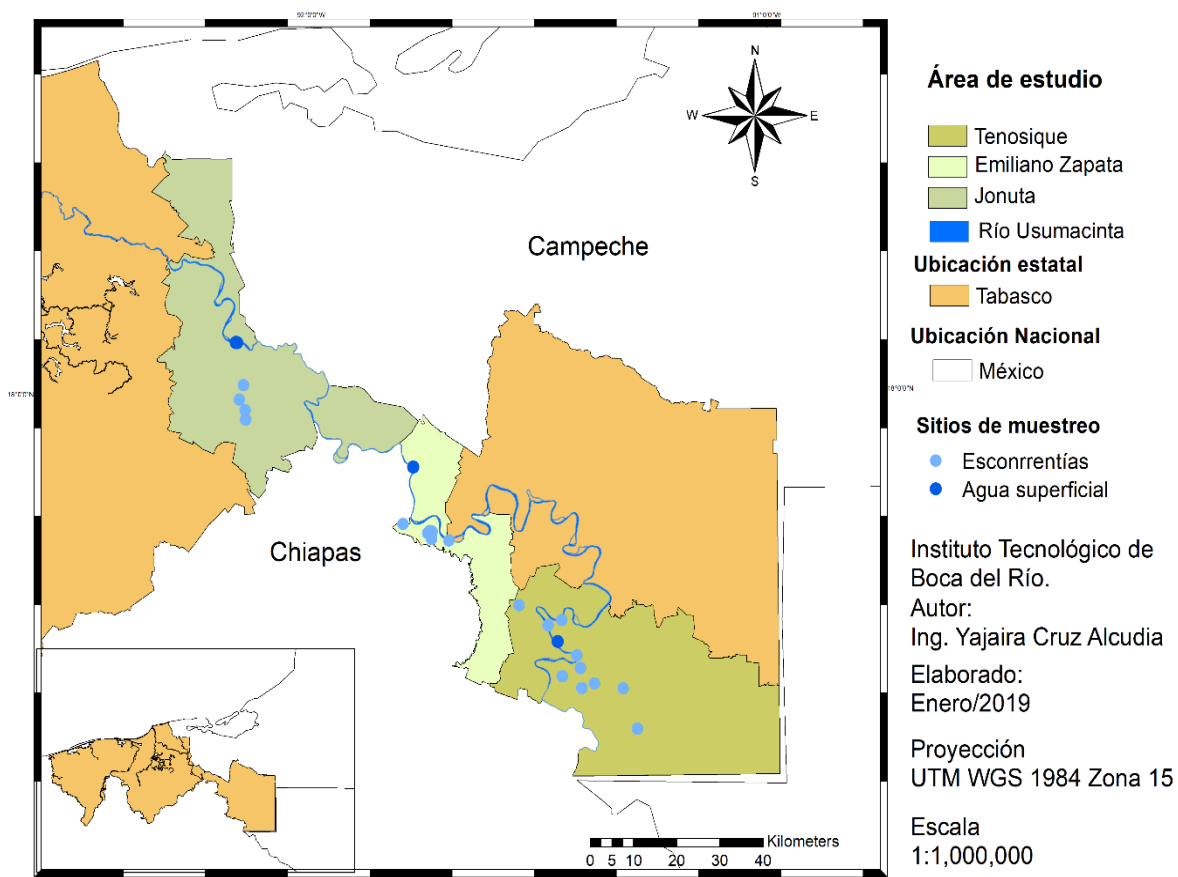


Figura 22. Ubicación de sitios de muestreo en el área de estudio.

6.3 Análisis de laboratorio.

Los parámetros determinados fueron nitrógeno total y nitrógeno de nitratos; bajo los métodos analíticos Kjeldahl y colorimétricos que permiten la simplificación, automatización, confiabilidad y certeza de los resultados (Cuadro 11).

Cuadro 11. Métodos de análisis de nitrógeno.

Muestra	Parámetro	Método de análisis
Agua Superficial	Nitrógeno Total	Kjeldahl (NMX-AA-026-SCFI-2010)
	Nitrógeno de nitratos	Sulfato de brucina (NMX-AA-079-SCFI-2001)
Escorrentías	Nitrógeno Total	Semi colorimétrico automatizado EPA 351.2 – 1993
	Nitrógeno de nitratos	Colorimétrico automatizado EPA 353.2 – 1993

6.3.1 Descripción del método Kjeldahl.

El método kjeldahl consiste en la descomposición de los compuestos nitrogenados mediante ácido sulfúrico concentrado en caliente, transformándose el nitrógeno de la mayoría de los grupos funcionales orgánicos en amonio; cuando la descomposición se ha completado la disolución se enfría, se diluye y se alcaliniza con hidróxido de sodio concentrado; el amoniaco liberado se destila y se adsorbe en una disolución de concentración conocida de ácido bórico. El rango aplicable es de 0.1-100 mg L⁻¹ en muestras de hasta 500 ml.

6.3.2 Descripción del método semi colorimétrico.

El método semi colorimétrico automatizado consiste en convertir los componentes nitrogenados de origen biológico como aminoácidos, proteínas y péptidos en amoníaco; mediante el calentamiento de la muestra en presencia de ácido sulfúrico, (H₂SO₄) durante dos horas y media; posteriormente el residuo se enfría, se diluye y se analiza en busca de amoníaco mediante una curva de calibración trazando la respuesta del instrumento contra la concentración estándar; por último, se realiza el cálculo de la concentración de la muestra comparando la respuesta de la muestra con la curva estándar; el valor final de nitrógeno total resulta de la suma de compuestos de amoníaco libre y nitrógeno orgánico que se convierten en sulfato de amonio. El rango aplicable es de 0.1-20 mg L⁻¹ de nitrógeno total (NT).

6.3.3 Descripción del método colorimétrico automatizado.

El método colorimétrico consiste en pasar una muestra filtrada a través de una columna que contiene cobre-cadmio granulado, posteriormente, se realiza la determinación con sulfanilamida más di clorhidrato de N- (1-naftil) -etilendiamina. El rango aplicable es 0.05-10.0 mg / L de nitrógeno de nitrato (N-NO_3^-).

6.3.4 Descripción del método de sulfato de brucina.

La brucina es un complejo que reacciona con los nitratos bajo condiciones ácidas y temperatura elevada para producir un complejo de color amarillo. Generalmente las muestras deben ser diluidas para obtener una concentración de nitrógeno de nitratos en el intervalo de concentraciones de 0,1 mg L^{-1} a 1,0 mg L^{-1} . La intensidad del color desarrollado es función del tiempo y la temperatura; ambos factores deben ser cuidadosamente controlados; se mide espectrofotométricamente o colorimétricamente.

6.4 Exportación de nitrógeno total y nitrógeno de nitratos.

La exportación de nitrógeno total (NT) y nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) se obtuvo mediante las concentraciones de cada compuesto presente en las muestras de escorrentías y agua superficiales del río Usumacinta en temporada de lluvias. Previamente fue necesario el cálculo del caudal del río (Formula 1) mediante la relación de la velocidad del flujo y el área de sección transversal; datos que fueron obtenidos en campo a través de dos equipos, un transductor de montaje espejo (Airman P66) que permite obtener el área y un correntómetro el cuál proporcionó la velocidad del agua en la sección transversal.

$$(1): Q = A * V$$

Donde:

Q = Caudal o Gasto ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

A = Área de la sección transversal (m^2)

V = Velocidad media del agua en la sección hidráulica ($\text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

6.5 Distribución espacial de NT y N-NO₃⁻.

La distribución espacial de la concentración de NT y N-NO₃⁻ se realizó con los valores de exportación de cada compuesto. Se utilizó el software ArcMap 10.3, y se seleccionaron dos métodos de interpolación, el primero es el método Kriging utilizado para la exportación de NT y el segundo el método Empirical Bayesian Kriging para la exportación de N-NO₃⁻. Los criterios de selección de ambos métodos fueron distribución normal de los datos, estacionarios y sin tendencias.

6.6 Balance hídrico.

El balance hídrico fue obtenido de datos de precipitación de la cuenca y la escorrentía superficial teórica. La base de datos de la precipitación fue del año 2011 al año 2015 (CICESE, 2015) debido a la insuficiencia de datos del periodo exacto del muestreo. El cálculo de la escorrentía superficial teórica fue resultado de la multiplicación de la precipitación y el coeficiente de escorrentía (Formula 2), el cual de estimó previamente a partir de la granulometría del suelo.

$$(2) Es = C * P$$

Donde

C= coeficiente de escorrentía (adimensional)

P= Precipitación (mm)

6.7 Análisis estadístico.

Las concentraciones de nitrógeno total (NT) y nitrógeno de nitratos (N-NO₃⁻) contenidas en la escorrentía y agua superficial del río Usumacinta; fueron interpretadas mediante estadística descriptiva para realizar una comparación con; los rangos y límites máximos permisibles establecidos por las normativas nacionales e internacionales. Los valores del caudal del río Usumacinta obtenidos de las doce campañas de muestreo se clasificaron por temporadas y se procesaron únicamente los correspondientes a la temporada de lluvias.

Los valores de exportación de nitrógeno total (NT) y exportación de nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) se interpretaron principalmente de acuerdo al área de uso de suelo (ha) dedicada a actividades agropecuarias; con la finalidad de conocer la exportación total del contaminante en cada uno de los municipios.

La distribución espacial de estos compuestos en el área de estudio, se interpretó con geoestadística, lo que permitió observar un modelo de tendencia general de los valores de exportación de NT y N-NO_3^- , con la finalidad identificar las zonas de riesgo por la presencia de cada compuesto.

El coeficiente de escorrentía fue interpretado de acuerdo a la estructura del suelo en el área de estudio. Con los valores de precipitación y coeficiente de escorrentía se estimó la escorrentía superficial y se obtuvo el balance hídrico de la cuenca del Río Usumacinta, Tabasco.

La relación entre la exportación de NT y N-NO_3^- y su concentración en aguas superficiales, se obtuvo mediante un análisis de correlación (α : 0.05), para determinar la relación entre variables. El resultado obtenido fue interpretado como medida de proyección de exportación de NT y N-NO_3^- ($\text{kg ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$) hacia aguas superficiales de la cuenca baja del Río Usumacinta (Camargo y Alonso, 2007; EPA, 2006).

7. Resultados y Discusiones

7.1 Concentración de nitrógeno total (NT) en escorrentías.

La concentración de nitrógeno total (NT) en escorrentías está representada por los siguientes valores máximos 5.96, 30.81 y 23.59 mg l⁻¹, en los sitios de Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta, respectivamente (Cuadro 12).

Cuadro 12. Análisis de concentraciones de NT

Sitio	Nitrógeno total (mg l ⁻¹)	
	máxima	Promedio Desviación estándar
Tenosique	5.96	2.36±1.6
Emiliano Zapata	30.81	12.61±9.93
Jonuta	23.59	10.68±8.63

Los valores de NT fueron superiores al limite maximo permisible (1.6 mg L⁻¹) para la conservación del ambiente acuatico (Figura 23), establecidos por los estandares internacionales de calidad ambiental para el agua en Perú; se utilizaron los estandares internacionales debido a que en México no se han establecido limites maximos permisibles para este compuesto.

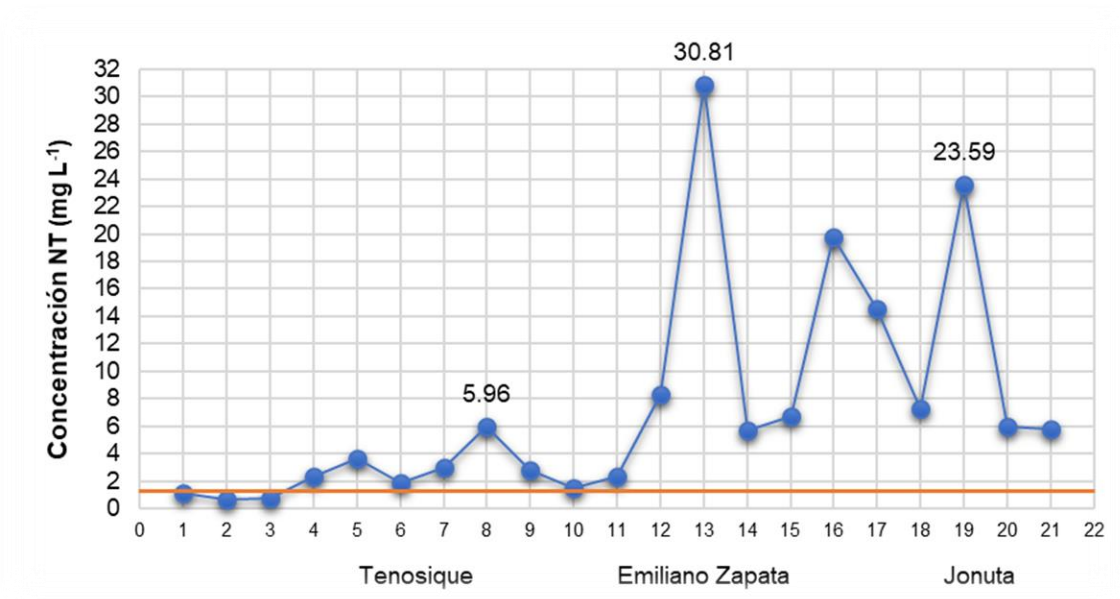


Figura 23. Concentración de NT en escorrentías.

La alta presencia de NT en la escorrentía se debe a que la escorrentía es un agente erosivo dinámico, que genera pérdida de este compuesto y tiene un efecto en la productividad de los suelos y en la contaminación de los recursos hídricos (Baker y Laflen, 1983); cuyo transporte de macronutrientes en el agua hacia recursos hídricos repercute en alterar la calidad del agua de ríos, lagos o lagunas.

7.2 Concentración de nitrógeno total en agua superficiales.

De acuerdo con el análisis realizado, la concentración de nitrógeno total (NT) en aguas superficiales en el Río Usumacinta, Tabasco, está representada por los siguientes valores máximos; 1.36, 1.053 y 1.01 mg l⁻¹, en los sitios de Boca del cerro, Chablé y Puente Jonuta, respectivamente (Cuadro 13).

Cuadro 13. Análisis de concentraciones de NT.

Clave	Sitio	Nitrógeno total (mg l ⁻¹)	
		máxima	Promedio Desviación estándar
R ₁	Puente Boca del cerro	1.36	0.64±0.32
R ₂	Puente Chablé	1.053	0.61±0.27
R ₃	Puente Jonuta	1.01	0.55±0.20

Los valores de NT se encontraron por debajo del límite máximo permisible (1.6 mg L⁻¹) para la conservación del ambiente acuático (Figura 24); establecido por los estándares internacionales de la calidad ambiental para el agua en Perú (CITA). El incremento de este compuesto en el río se puede atribuir a los aportes de compuestos orgánicos e inorgánicos, producto del uso de suelo en las partes bajas de la cuenca. El NT tiene un origen orgánico (Ávila *et al.*, 2007), debido al aporte de grandes cantidades de excretas animales provenientes del sobre pastoreo y producción intensiva de porcinos y ovinos.

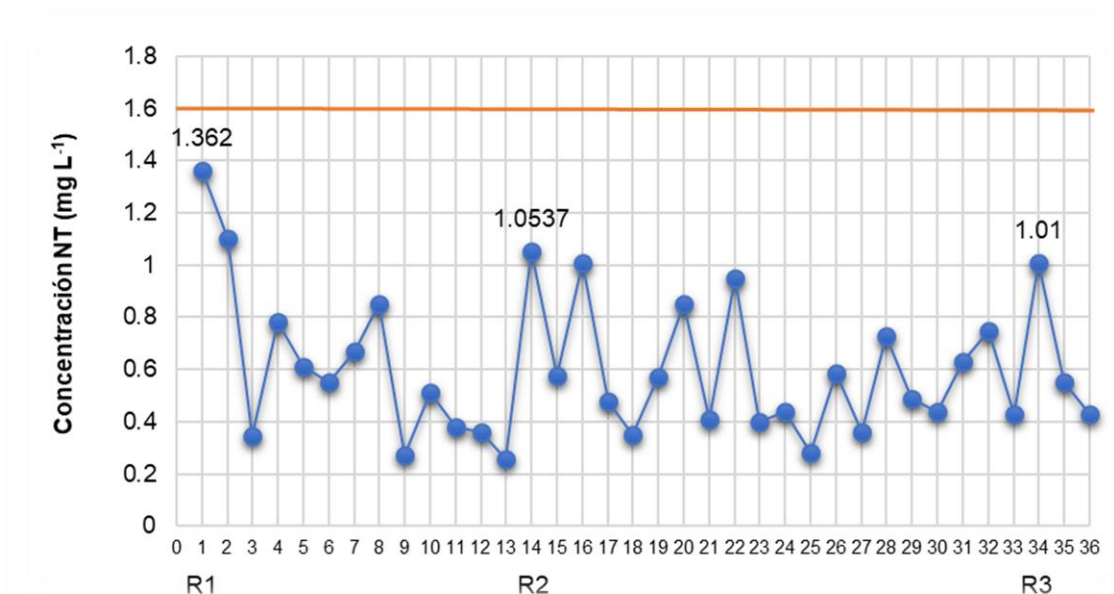


Figura 24. Concentraciones de NT en agua superficial.

7.3 Concentración de N-NO₃⁻ en escorrentías.

Las concentraciones de nitrógeno de nitratos (N-NO₃⁻) en la escorrentía, están representadas por los valores máximos de 1.85, 2.90 y 2.22 mg L⁻¹ en los sitios de Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta, respectivamente (Cuadro 14).

Cuadro 14. Análisis de concentraciones de N-NO₃⁻.

Sitio	Concentración de N-NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	
	máxima	Promedio Desviación estándar
Tenosique	1.85	0.43±0.61
Emiliano Zapata	2.90	0.83±1.08
Jonuta	2.22	1.62±0.91

Las concentraciones fueron inferiores a los criterios numéricos de 5 mg L⁻¹ para la protección de la vida acuática establecidos por los criterios ecológicos de calidad del agua (1989) y por debajo de 10 mg L⁻¹ para evitar los daños a la salud por consumo de acuerdo con los estándares del reglamento internacional primario de agua potable en los Estados Unidos (Figura 25) (EPA, 2019).

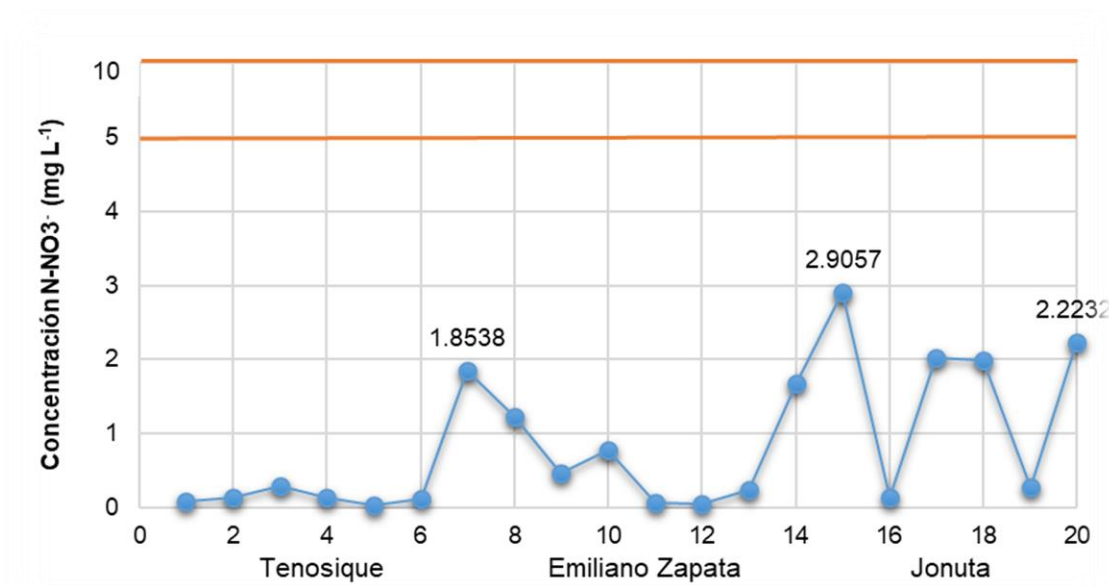


Figura 25. Concentraciones de N-NO₃⁻ en escorrentías.

Los valores obtenidos del análisis de N-NO₃⁻ en la escorrentía, se relacionan con la presencia de fertilizantes inorgánicos, los cuales son utilizados en el área de estudio para el cultivo de pastizales destinados a la ganadería. Este compuesto por su solubilidad puede desplazarse fácilmente por escorrentías superficiales o infiltrarse hasta aguas subterráneas (Pacheco *et al.*, 2006). Las características del suelo, como la textura y actividad bacteriana, facilitan el movimiento de N-NO₃⁻ ya que la porosidad del mismo incrementa la escorrentía a través de la retención de agua en las capas superficiales (Zabala *et al.*, 2014).

7.4 Concentración de N-NO₃⁻ en agua superficiales.

En términos generales, las concentraciones de N-NO₃⁻ se representan por los valores máximos de 0.50, 0.63 y 0.54 mg l⁻¹ en los sitios de Boca del cerro, Puente Chablé y Puente Jonuta, respectivamente (Cuadro 15).

Cuadro 15. Análisis de concentraciones de N-NO_3^- .

Clave	Sitio	Concentración de N-NO_3^- (mg l^{-1})	
		máxima	Promedio Desviación estándar
R ₁	Puente Boca del cerro	0.50	0.31±0.10
R ₂	Puente Chablé	0.63	0.25±0.16
R ₃	Puente Jonuta	0.54	0.24±0.13

Los resultados obtenidos muestran que las concentraciones se encuentran por debajo de los criterios numéricos para la protección de la vida acuática (5 mg L^{-1}) establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del agua (1989); y por debajo del límite de 10 mg L^{-1} para evitar daños a la salud, de acuerdo con los estándares del reglamento internacional primario de agua potable de los Estados Unidos (Figura 26) (EPA, 2019).

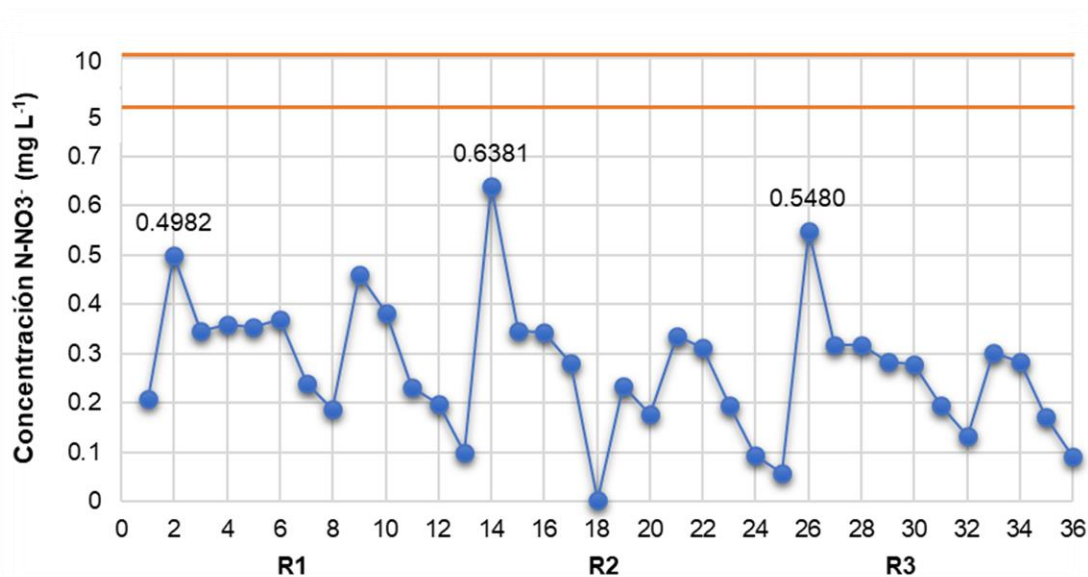


Figura 26. Concentración de N-NO_3^- en agua superficial.

El incremento de este compuesto en el agua superficial puede asociarse a los escurrimientos de compuestos inorgánicos provenientes del manejo agronómico de los cultivos que se establecen al margen del río. El uso excesivo de fertilizantes con

altas cantidades de nitrógeno como la Urea presentan una alta solubilidad en el agua, por lo tanto; el fertilizante no asimilado por el cultivo puede llegar al río por medio de la escorrentía o incluso, por inundación pluvial como fluvial (Henríquez *et al.*, 2006).

7.5 Exportación de nitrógeno total

La exportación de nitrógeno total (NT) en las escorrentías hacia aguas superficiales en el área de estudio, está representada por los siguientes valores; 0.00434, 0.01044 y 0.01128 kg N ha⁻¹ mes⁻¹, en los municipios de Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta, respectivamente.

Se observó que la exportación de NT fue mayor en Jonuta, seguido de Emiliano Zapata y Tenosique. Se analizó en Jonuta el uso del suelo y el tipo de suelo que puede influir en el transporte de este compuesto y se comparó con el resto de los municipios en el área de estudio.

El uso de suelo en Jonuta destinado a actividad pecuaria y agrícola de acuerdo con la carta de uso de suelo y vegetación del INEGI (2019), corresponde a 65,135.92 hectáreas, con uso de pastizal cultivado e inducido, y agricultura de semi temporal y temporal. Esta área tuvo un transporte por escorrentías hacia aguas superficiales de 734.66 kg de NT al mes; cantidad que supera a lo reportado para los municipios de Emiliano Zapata (262.54 kg mes⁻¹) y Tenosique (518.01 kg mes⁻¹), respectivamente (Cuadro 16).

Cuadro 12. Exportación de NT de acuerdo con la superficie de cada municipio destinada al uso de suelo pecuario y agrícola.

Sitio	Uso de suelo (Ha)	Exportación NT (Kg mes ⁻¹)
Tenosique	119,447.94	518.01
Emiliano Zapata	25,156.43	262.54
Jonuta	65,135.92	734.66

En comparación con Tenosique, el municipio de Jonuta presentó menor área de actividad agropecuaria. Se observó que, la exportación de NT a través de la escorrentía no depende del área destinada hacia la actividad pecuaria y agrícola, por lo que puede asociarse a que, el uso excesivo de fertilizantes y el aporte de materia orgánica ocurre en áreas de menor extensión territorial.

En el municipio de Jonuta predomina el tipo de suelo gleysol y vertisol; en comparación con Emiliano Zapata y Tenosique quienes presentan mayor influencia de suelos regosol, litosol y arenosol (INEGI, 2019). La influencia del suelo gleysol y vertisol se debe a su característica física (superficie activa y porosidad), que contribuyen en la retención superficial de nutrientes (Navarro, 2013). De acuerdo con Torrez (2005), el nitrógeno proveniente de los fertilizantes o de la mineralización de los residuos orgánicos, se acumulan en los primeros 10 centímetros en el suelo; el cual posee una textura arcilloso-arenoso y arcilloso-limoso debido a la asociación de ésta con la porosidad. Por tanto, se puede inferir que existe influencia de las características del suelo en la pérdida de este compuesto a través del suelo (FAO, 2009; INEGI, 2004; Torrez *et al.*, 2005).

7.6 Exportación de nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-).

La exportación de nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) de las escorrentías hacia aguas superficiales en el área de estudio, está representada por los siguientes valores; 0.00083, 0.00069 y 0.0017 $\text{kg ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$, en los municipios de Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta, respectivamente.

Se observó, que la exportación N-NO_3^- fue mayor en Jonuta, superior a Tenosique y Emiliano Zapata; al igual que el NT se analizó el comportamiento de N-NO_3^- en las variables uso y tipo de suelo en Jonuta y fue comparado con el resto de los municipios de la cuenca baja del río Usumacinta.

El uso de suelo en Jonuta destinado a actividad pecuaria y agrícola de acuerdo con la carta de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2019), corresponde a 65,135.92 hectáreas, con uso de pastizal cultivado e inducido, y agricultura de semi temporal

y temporal. De acuerdo con los cálculos realizados, en Jonuta, las escorrentías agrícolas transportan 112.06 Kg mes⁻¹ de N-NO₃⁻ hacia aguas superficiales. Lo que supera lo calculado para los municipios de Emiliano Zapata (17.38 kg mes⁻¹) y Tenosique (100.13 kg mes⁻¹) (Cuadro 17).

En comparación con Tenosique, el municipio de Jonuta presentó menor área de actividad agropecuaria. Se observó que, la exportación de N-NO₃⁻ a través de la escorrentía no depende del área destinada a la actividad pecuaria y agrícola, por lo que puede asociarse principalmente al uso excesivo de fertilizantes inorgánicos en áreas con menor extensión territorial. Esto se debe a que los fertilizantes inorgánicos de N-NO₃⁻ son frecuentemente utilizados para el crecimiento de pastizales (Gallegos *et al.*, 1999). Estos son aplicados al suelo por riego o de manera directa; y son altamente solubles en agua. De acuerdo con el Plan municipal de desarrollo rural 2016-2018 del municipio de Jonuta (SEGOB,2016), el cual padece una explotación desmedida de las superficies de cultivo que ha ocasionado problemas en la calidad del agua superficial. La exportación de N-NO₃⁻ por la escorrentía hacia agua superficiales, es relacionada al uso excesivo de fertilizantes inorgánicos (Ávila, 2007).

Cuadro 13. Exportación de N-NO₃⁻ de acuerdo con la superficie de cada municipio destinada al uso de suelo pecuario y agrícola.

Sitio	Uso de suelo (Ha)	Exportación N-NO ₃ ⁻ (Kg ha mes)
Tenosique	119,447.94	100.13
Emiliano Zapata	25,156.43	17.38
Jonuta	65,135.92	112.06

El tipo de suelo gleysol y vertisol por su alto contenido de agua y arcillas presenta una alta porosidad que permite su saturación (FAO,2009). Esto, ejerce una influencia en la exportación N-NO₃⁻ ya que, a diferencia del NT, este compuesto es más soluble y presenta alta movilidad a través del flujo de agua. Sin embargo, este compuesto es menos estable por lo que además de moverse en la superficie del

suelo puede llegar a aguas subterráneas y contaminar el acuífero (Pacheco *et al.*, 2006).

7.7 Distribución espacial de NT y N-NO₃⁻

Mediante la distribución espacial de la exportación de NT en el área de estudio se obtuvo un valor distribuido de este compuesto de 0.0085 kg ha⁻¹ mes⁻¹ (Figura 27). Se observó que a partir de este valor se identifican zonas vulnerables. Así también, los aportes de NT se concentran en dirección a la desembocadura del río Usumacinta, principalmente en Jonuta y en menor concentración en Emiliano Zapata.

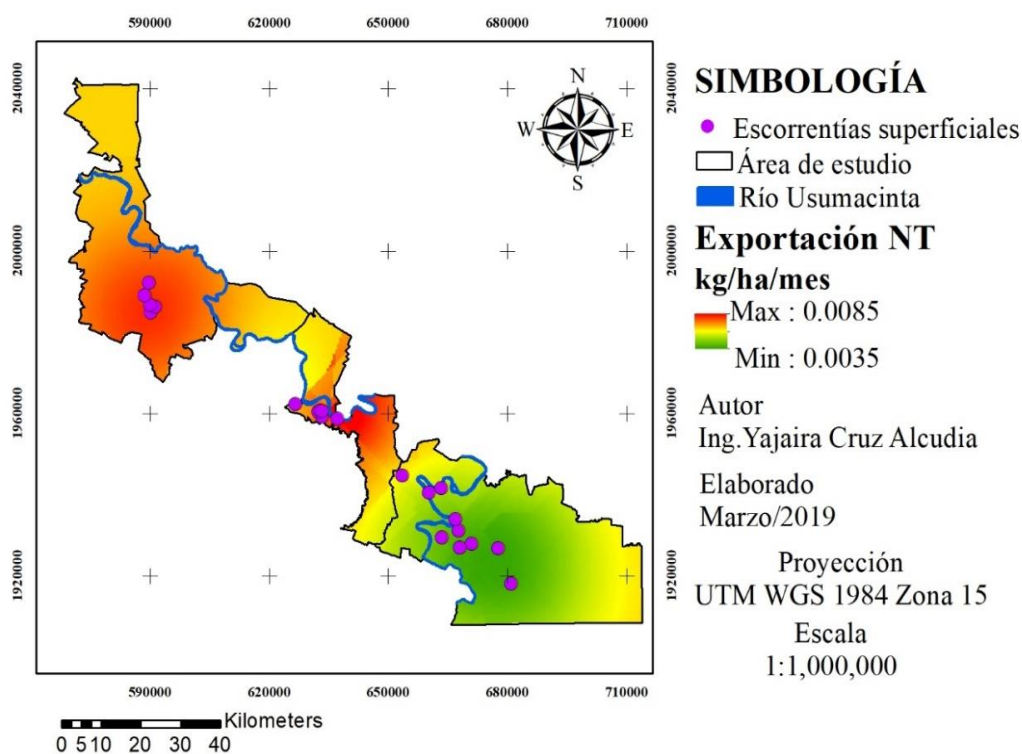


Figura 27. Exportación de NT en la cuenca baja del Río Usumacinta, Tabasco.

El comportamiento de NT en dirección a la desembocadura puede ser atribuible al cambio de uso de suelo que ha causado devastación de selvas; al uso continuo y excesivo de fertilizantes inorgánicos; y a la ganadería extensiva (Torrez *et al.*, 2005).

La distribución espacial de la exportación de N-NO_3^- en el área de estudio está representada por $0.0013 \text{ kg ha}^{-1}\text{mes}^{-1}$ (Figura 28); se observó que los aportes de este compuesto se distribuyen diferente al NT debido a la amplia solubilidad del N-NO_3^- que facilita su dispersión en el área de estudio. De acuerdo con la interpolación, Tenosique puede considerarse una zona no vulnerable, aún cuando destina una mayor superficie al uso de suelo agropecuario. Se observó que la distribución de ambos compuestos se concentra en dirección a la desembocadura del río Usumacinta.

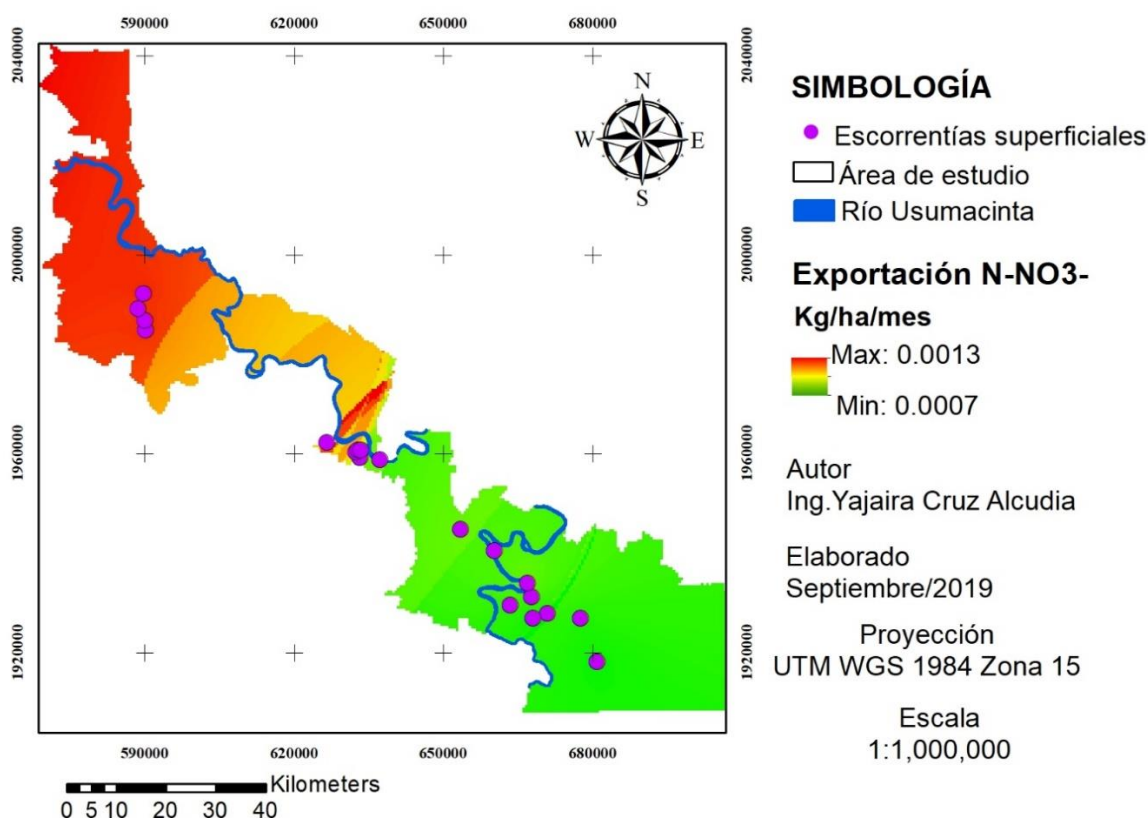


Figura 28. Exportación de N-NO_3^- en la cuenca baja del Río Usumacinta, Tabasco.

7.8 Balance hídrico

El balance hídrico comprende el proceso donde la precipitación es considerada la entrada y la escorrentía la salida. De acuerdo con la dinámica de la escorrentía

durante el ciclo hidrológico, los niveles de precipitación influyen en los niveles de escorrentía superficial (Oyarzún *et al.*, 1997); y con ello el transporte de NT y N-NO₃⁻ contenidos en ella. Como resultado se obtuvo que la precipitación en el área de estudio osciló entre 76 y 250 mm y la escorrentía generada fue de 40 y 170mm (Figura 29).

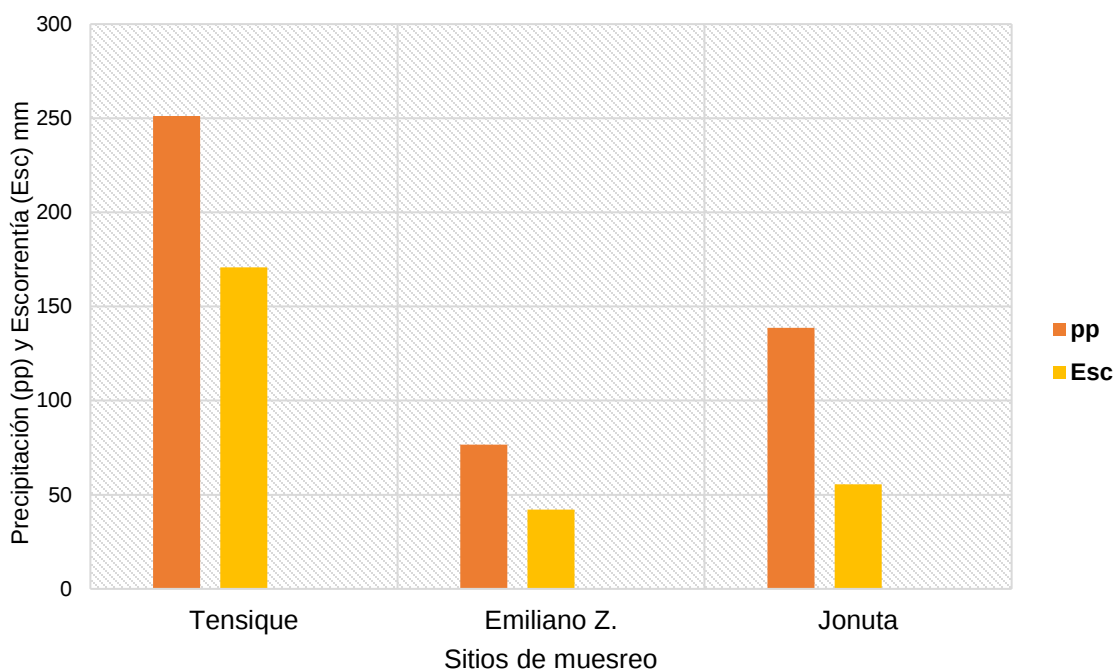


Figura 29. Balance hídrico en el área de estudio.

Es importante mencionar que no fue posible aplicar el método Nadal (1982) debido a falta de información. Por tanto, el valor de la escorrentía teórica será considerado como valor de referencia, se observó que ésta fue superior en el municipio de Tenosique (170 mm) y menor en Jonuta (42 mm) y Emiliano Zapata (55 mm).

De acuerdo con Torbert (1999), Fessehare (1999) y Torrez (2005); existen dos variables de referencia que ayudan a determinar si un sitio presenta pérdida de nitrógeno por escorrentía; los cuales son la concentración del compuesto y el volumen. A partir de éste análisis se obtuvo la cantidad de NT de acuerdo al

volumen de escorrentía teórica. El resultado obtenido muestra que, en el municipio de Jonuta, la escorrentía transporta 107.84 mg/m² de NT, en Tenosique 1017.84 mg/m² y en Emiliano Zapata 1297.00 mg/m². La cantidad de N-NO₃⁻ de acuerdo al volumen de escorrentía teórica está representada por 22.32 mg/m² en el área de estudio ubicada en el municipio de Jonuta, 123.32 mg/m² en Emiliano Zapata y 316.59 mg/m² en Tenosique, Tabasco. De acuerdo con Arauzo (2006) y Heaton (1985), la cantidad de nitrógeno que se pierde por escorrentía es principalmente en la forma N-NO₃⁻ por la alta solubilidad que presenta este compuesto. Por lo tanto, a través de este medio de transporte el N-NO₃⁻ contribuye a la eutrofización y deterioro del ecosistema acuático (Ledesma *et al.*, 2013).

7.9 Relación entre la exportación de NT y N-NO₃⁻ en aguas superficiales

Mediante el análisis de regresión lineal (α : 0.05) de la exportación y las concentraciones de NT en aguas superficiales; se pudo observar una baja correlación ($R^2= 0.50$) entre las variables estudiadas, sin embargo; la escorrentía superficial es un factor del ambiente causante del incremento de nutrientes en aguas superficiales (Álvarez y Angeler, 2007). El cual, impacta la diversidad fitoplanctónica que regula el oxígeno en el agua, y altera la calidad fisicoquímica del ambiente acuático (Esqueda *et al.*, 2016).

El análisis de regresión lineal permitió observar la proyección de los posibles incrementos de NT a partir del valor de exportación máximo, y se encontró que al presentarse un valor de exportación de 0.8 kg ha⁻¹mes⁻¹ (valor calculado) la concentración de NT en aguas superficiales puede rebasar el límite máximo permisible (1.6 mg L⁻¹). El cual es establecido por los estándares internacionales de la calidad ambiental para la conservación del ambiente acuático (ECA, 2008).

El análisis de regresión lineal (α : 0.05) entre la exportación de N-NO₃⁻ y sus concentraciones en aguas superficiales; permitió observar que la relación entre estas dos variables no está estrechamente relacionada ($R^2= 0.006$). Sin embargo, de acuerdo con Hendry (1988), los ríos tan caudalosos, por su naturaleza, son lentos para ser impactados por nutrientes, pero una vez contaminados, no tienen la

capacidad de auto depurarse con facilidad. Durante el desarrollo de este proyecto el Río Usumacinta tuvo caudales que oscilaron entre 2243.2, 1055.84 y 827.34 m³ s⁻¹ en los sitios donde están ubicados los puentes de Boca del Cerro (Tenosique), Jonuta y Chablé (Emiliano Zapata) en temporada de lluvias; siendo la dilución un factor determinante en la evaluación del efecto de las concentraciones de este compuesto en aguas superficiales.

Se realizó una proyección de posibles incrementos de N-NO₃⁻ en la escorrentía, se empleó un valor máximo de 0.5 kg ha⁻¹ mes⁻¹ (valor calculado). Esta estimación además de incrementar la concentración de N-NO₃⁻ en aguas superficiales, rebasa los 5 mgL⁻¹ del criterio ecológico de calidad del agua para uso pecuario, acuícola y protección a la vida acuática (CE-CCA-001/89). Si el ingreso de este compuesto continúa hasta generar una exportación de 4 kg ha⁻¹ mes⁻¹ (valor calculado), la concentración de N-NO₃⁻ en aguas superficial podría rebasar el rango máximo de 10 mg L⁻¹, establecido en el reglamento nacional primario de agua potable en los Estados Unidos (EPA, 2019). La presencia de tal concentración en el agua, puede provocar la eutrofización de la fuente de abastecimiento, lo que significa que deja de ser aprovechable para agua potable, riego, recreación, pesca y turismo. Un río o cuerpo de agua eutrófico produce cianobacterias y toxinas; las cuales pueden provocar la muerte de organismos acuáticos y el hombre (Martelo y Lara, 2012).

8. Conclusiones

El uso de suelo destinado a las actividades agrícolas y pecuarias tiene una fuerte influencia en el incremento de nitrógeno en el suelo. Fue posible observar que tanto el NT como el N-NO_3^- se presentan en altas concentraciones en el área de estudio.

Además del escurrimiento superficial, los factores que influyen sobre la dinámica del NT y N-NO_3^- hacia aguas superficiales fueron las características del suelo y los niveles de precipitación. No se encontró evidencia suficiente para atribuir que la presencia de estos compuestos (NT y N-NO_3^-) en las escorrentías, modifiquen significativamente la calidad del agua del Río Usumacinta. Sin embargo, la distribución de estos compuestos permite obtener evidencia del riesgo potencial de contaminación por compuestos nitrogenados en suelos de uso agropecuario, y una estimación de la exportación de estos hacia aguas superficiales. Es importante mencionar que, al incrementarse los niveles de contaminación aumenta el riesgo de eutrofización del sistema acuático.

Se observó que la exportación de N-NO_3^- fue menor a la NT. Los valores más altos se presentaron en el municipio de Jonuta, aún cuando en éste se ubicaron menor cantidad de sitios de muestreo. Esto se atribuye al uso de suelo y grado de erosión del mismo. Es posible que, en los municipios de Emiliano Zapata y Tenosique, la superficie fertilizada haya sido menor durante el periodo del muestreo.

La aplicación de Sistemas de Información Geográfica facilita la interpretación de los resultados de la exportación de nitrógeno, y permite identificar zonas de vulnerabilidad.

9. Alternativas de control de la Contaminación Difusa

En México, no se han diseñado programas específicos para reducir el impacto de la contaminación difusa. A diferencia de las descargas puntuales, este tipo de contaminación se rige por un marco reglamentario como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), y la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Aguilar y Pérez, 2007). Las cuales con limitación y escasez de información no han podido establecer disposiciones reglamentarias eficientes para sancionar o mitigar el impacto de este tipo de contaminación (Aguilar y Pérez, 2007).

Es imprescindible la actualización de las bases de datos por parte del sector agropecuario, y mayor información respecto a la presencia o nivel de contaminantes en cuerpos de agua. Esto permitiría la coordinación de esfuerzos entre dependencias de gobierno y el sector público y privado; e integrar componentes clave para resolver los problemas de contaminación difusa de cuerpos de agua en territorio nacional (Aguilar y Pérez, 2007).

Existen medidas de prevención de contaminación por nitrógeno, principalmente en la Unión Europea, debido a la amenaza de ésta sobre la contaminación difusa; las cuales son:

1) Directiva 91/676/CEE dedicada a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitrógeno utilizados en la agricultura; consiste en establecer zonas vulnerables de contaminación de N-NO_3^- y una vez conocidas establecer programas de acción. Los programas de acción se encuentran basados en las medidas de desarrollo de las prácticas agrícolas; algunas de estas medidas son:

- a) Periodo conveniente de aplicación de fertilizante y evitarla en terrenos con pendientes muy pronunciadas.
- b) La aplicación de fertilizantes a suelos en terrenos hidromorfos, inundados.

- c) Las condiciones de aplicación de fertilizantes en suelos cercanos a cuerpos de agua.
- d) La capacidad y el diseño de los tanques de almacenamiento de estiércol para evitar la contaminación del agua superficial y subterránea por escorrentía y filtración de líquidos que contengan estiércol y residuos procedentes de productos vegetales almacenados como el forraje ensilado.
- e) La gestión del uso de la tierra con referencia a los sistemas de rotación de cultivos, y a la proporción de la superficie de tierras dedicada a cultivos permanentes en relación con cultivos anuales.
- f) El mantenimiento de un mínimo de vegetación durante periodos de lluvia que absorba el nitrógeno del suelo que, de lo contrario, podría causar fenómenos de contaminación del agua por nitratos.
- g) El establecimiento de planes de fertilización acordes con la situación particular de cada explotación y la consignación en registros del uso de fertilizantes.
- h) La prevención de la contaminación del agua por escorrentía y la filtración del agua por debajo de los sistemas radicales de los cultivos en los sistemas de riego.

2) Acuerdos ambientales de acuerdo a lo especificado por la Directiva Marco del Agua (DMA) con proyección al 2027 (Martínez y Albiac, 2003).

Los acuerdos consisten en recompensar de manera complementaria a aquellos agricultores que voluntariamente aseguren servicios ambientales adicionales basados en la legislación vigente (Reglamento del Consejo 2078/92/CE). Donde se señalan métodos de producción agrícola compatibles con la protección al ambiente y el mantenimiento del paisaje; algunas de estas medidas son:

- a) El número de animales por unidad de superficie deberá limitarse, con objeto de asegurar una gestión integrada de la producción animal y vegetal en la unidad de

producción. Para minimizar cualquier forma de contaminación, particularmente del suelo, aguas superficiales y capas freáticas.

b) La carga ganadera debe guardar una estrecha proporción con la superficie disponible para evitar los problemas derivados del sobrepastoreo y erosión. Para permitir el esparcimiento del estiércol, a fin de evitar todo impacto negativo en el ambiente.

c) La cantidad total de estiércol por explotación no deberá exceder los 170 kg. de nitrógeno por hectárea, de la superficie agrícola utilizada.

d) La capacidad de las instalaciones de almacenamiento del estiércol deberá ser tal que resulte imposible la contaminación de las aguas por vertido directo o por escorrentía y filtración en el suelo.

10. Literatura citada

- Aguilar, I. A., Pérez, E. R. H. (2007) La contaminación agrícola del agua en México: retos y perspectivas. *Revista Latinoamericana de economía* 39 (153), 520-537.
- Álvarez, C. M., Angeler, G.D., (2007). Exportación de nutrientes en las cuencas hidrográficas de Latinoamérica: una recopilación. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3 (1), 31-43.
- Arreguín C. F., Gómez B. A., Zurieta D. J. (2000). "Contaminación difusa". *Tlálloc* 7(19): 8-10, julio-septiembre.
- Arauzo, M., Valladolid, M., Martínez, B. J. J., Gutiérrez, C. (2006) Dinámica espacio-temporal del contenido en nitrato de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del rioja (La Rioja, España) Vulnerabilidad del acuífero aluvial. *Revista Limnetica* 25 (3): 753-762.
- Ávila, H., Tudares, C., Sánquiz, M., Araujo, M., Morales, N., Rojas, J., Pirela, D., 2007. Nitrogen and phosphorus in superficial waters of the low part of the River Catatumbo. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia* 30(29):29-35
- Ayvar, C.J.F., Navarro, C.I.C.J., Zamora, T. A. M., 2018. The Mexican Agricultural sector in the context of APEC: A Data Envelopment Analysis with presence of "bad outputs". *Revista análisis económico* 83(43): 126:137
- Barba, E. M., Rangel J. M., Ramos, R. R., 2006. Clasificación de los humedales de tabasco mediante sistemas de información geográfica. *Revista Universidad y ciencia Colegio de la Frontera Sur ECOSUR*, 22 (2):101-110
- Benassini, O., 1972. Aprovechamiento de los ríos internacionales mexicano-guatemaltecos, *Revista Recursos Hidráulicos*, 1 (4), 414-427.
- Bosch, J. M., Hewlett, J. D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal J of Hydr.* (55) 3-23

- Bormann, F.H. y Likens, G.E., 1967. Nutrient cycling. *Science*,155: 424-429.
- Bravo, I. L., Saldaña, F. P., Izurieta, D. J., Mijangos, C. M., 2013. La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo.
- Breña, P. A. F., Jacobo, V. M. A., 2006. Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial Buenos Aires.
- Camargo, J.A., Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Revista Ecosistemas* 16 (2), 98-110
- Camilloni, I., Vera, C. 2006. El ciclo del agua. Informe digital el aire y el agua en nuestro planeta. <http://difusion.df.uba.ar/Voluntariados/Aire%20y%20Agua%20Camilloni-Vera.pdf>.
- Carabias, J. C., De la maza, J., Cadena, R. 2015. Libro digital Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona
- Cárdenas, G. L. C., Sánchez, I. A. O., 2013. Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Revista Universidad y Salud* 2389:70 66
- Castro, T. M. T., Diéguez V., A., López M. M. B., Taboada, C. M. M., Dafonte D., J., Paz, G. A. (2000) Variaciones en los niveles de nitrógeno en aguas superficiales como consecuencia de los cambios de uso del suelo. *Revista Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña*.
- Carjaval, R. R., 1997. Propiedades físicas químicas y biológicas de los suelos. Libro (8) 328-347
- Cerón, R. E. L., Aristizábal, G. F. A. 2012. Nitrogen and phosphorus cycles dynamics in soils. *Revista Colomb. Biotecnol* 1(14) 285-295.
- CCA (1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. DOF 14 de diciembre 1989. México
- CICESE (2015). Base de datos de precipitación del Estado de Tabasco. Consultado en <https://www.cicese.edu.mx/>

- COLLADO, G. C. B., 2008. Contaminación de las aguas subterráneas por nitratos provenientes de la utilización de purines de cerdo en la agricultura. Tesis.
- CONAGUA., 2010. Actualización de la disponibilidad media anual de agua, Estado de Tabasco.
- CONAGUA., 2017. Estadística del agua en México
- CONAGUA., 2015. Atlas del agua en México
- Chow, T. V., Maidment, R. D., Mays, W. R., (1988). Hydrologic Processes. Libros Applied Hydrology.
- Contreras, M. F., 2016. Condiciones laborales de la mano de obra rural de México. Revista Ximhai Universidad Autónoma Indígena de México 4(12) 133:151
- Cotler, H. A., Galindo, A. A., González, M. I. D., Pineda, L. R. F., Rios, P. E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. México D.F.: Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas
- Cruz, M., Polanco, M., 2014. El sector primario y el estancamiento económico en México. Revista Problemas del Desarrollo 178 (45): 10-26
- De Vos, J. 1988. Oro verde la conquista de la Selva Lacandona por los madereros tabasqueños 1822-1949, Instituto de Cultura de Tabasco-FCE.
- ECA. 2018. Estándares nacional de calidad del agua. Perú.Consulta en http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wpcontent/uploads/sites/22/2013/10/ds_002_2008_eca_agua.pdf
- EPA. 1993. Method 351.2, Revision 2.0: Determination of Total Kjeldahl Nitrogen by Semi-Automated Colorimetry. Consultado en sitio web <https://www.epa.gov>.
- EPA. 1993. Method 353.1, Revision 2.0, Determination of Nitrate-Nitrite Nitrogen by Automated Colorimetry Colorimetry. Consultado en sitio web <https://www.epa.gov>.
- EPA. 2019. National Primary Drinking Water Regulations. Consultado en sitio web <https://www.epa.gov>.

- FAO., 2009. Guía para la descripción de suelos, México. Consulta en sitio web <http://www.fao.org>.
- FAO., 2012. El sector agropecuario ante el desafío del cambio climático. México. Consulta en sitio web <http://www.fao.org>.
- Flores, L. H. E., Ramírez, V. H., Byerly, M. K. F., Ruiz, C. J. A., Martínez, S. J. A., Díaz, M. P., Alemán, M. V., 2003. Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, México. *Revista Terra Latinoamericana* 3(21) 389-400
- Flores, L. H. E., Carrillo, G. R., Francisco N. N., Hidalgo, M. C., Ruíz, C. J. A., Castañeda, V. A. A., Velazco, N. R. (2009). Aportes de nitrógeno y fósforo de tres sistemas agrícolas de la cuenca hidrográfica "el Jihuite", en Jalisco, México. *Revista Agrociencia* 43, 659-669.
- Fessehaye, G., A. Edward, K. Newell and I. Robert. 1999. Dissolved nitrogen transport in surface runoff from field-sized watersheds. *Tektran*. United States Agriculture Department
- García, G. A., Kauffer, M. E. F. 2011. Las cuencas compartidas entre México, Guatemala y Belice: Un acercamiento a su delimitación y problemática general *Frontera Norte* 45 (23) 131-161
- Garzón, J. E., Cárdenas E. A., 2013. Emisiones antropogénicas de amoníaco, nitratos y óxido nítrico: compuestos nitrogenados que afectan el medio ambiente en el sector agropecuario colombiano. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia* 2(60) 121-138
- Hans, E. A., Brian, K., Soren, E. L. (1999). Agricultural practices and diffuse nitrogen pollution in Denmark: Empirical leaching and catchment models. 39(12), 257-264
- Hamann., Ankersen T. 1996. The Usumacinta river, Building a Framework for Cooperation between Mexico and Guatemala, paper submitted to the roundtable meeting held in San Cristobal de Las Casas (Mexico).

- Hernández, G. S. E. 2006. Diagnóstico de la calidad de agua de los tributarios que drenan al lago Cocibolca. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-UNAN-Managua.
- Hernán, C.M., García, F.O., Rodríguez, C. J., Castellanos, V. A. E. (2015). Cambios en el almacenamiento de nitrógeno y agua en el suelo de un matorral desértico transformado a sabana de buffel (*Pennisetum ciliare*). Revista Terra latinoamericana 33(1).
- Howarth, r.w., Billen G., Swaney D., Townsend, N., Jaworski, K., Lajtha, J.A., Downing, R., Elmgren, N., Caraco, T., Jordan, E., Berendse, J., Freney, v., Kudeyarov, I. P., Murdoch y Zhu Zhao-Liang. 1996. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. Journal Biogeochemistry 35: 75-139.
- Hoyos, B. C. A., Bedoya, C. I., Álzate, D.A. 2014. Evolución en la carga de nutrientes de ríos de montaña que fluyen a un embalse, cuenca media del río Magdalena. Revista EIA, 11(22): 77-91
- IMTA, 2017. Importancia del control de calidad en campo. Texto informativo consultado en https://www.imta.gob.mx/images/pdf/articulos/Control_de%20Calidad_en_Campo.pdf
- Inclan, B. L. A. 2000. La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo. Reporte técnico consultado en sitio web www.researchgate.net
- INEGI, 2016. Plan municipal de desarrollo (2016-2018). México <https://www.inegi.org.mx/>
- JAYME, G. T. 2014. Movilización de nitrógeno y fósforo en la cuenca hidrológica del río verde México. Tesis
- Lin, J. P. (2004). Review of published export coefficient and evento mean concentration (EMC) data. Wetlands regulatory assistance program.

- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodriguez, M. C., Sánchez, D. A. R. 2013 Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciência Agronômica* 3 (44) 419-425.
- Likens, G.E., Bormann, F.H., Pierce, R.S., Eaton, J.S. y Johnson, N.M., 1977. *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer Verlag, New York, 141 (6).
- Llambí, L., Lindemann, T., Mora D. 2010. Informe Asistencia a los países Andinos en la reducción de riesgos y desastres en el sector agropecuario.
- March, M. I., M. Castro (2016). La cuenca del Río Usumacinta: perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable, Inecc (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático).
- Martelo, J., Lara, B. J.A. (2012). Macrófitos flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 15(8), 221–243.
- Mejía, H. J., Mejía, H. I., 2007. Nutrición Proteica de Bovinos Productores de Carne en Pastoreo. *Revista Acta Universitaria* 2(17). 45-54
- Mazari, M. (2012). Agricultura y contaminación del agua. *Revista Problemas de desarrollo* 47 (177).
- Mora, U. A. 2016. La Importancia de los Recursos Hídricos en los Usos del Suelo en la Península Ibérica. *Revista Portimão* 9 103-118.
- Morales, B., Chávez G. Estimación de la carga de nutrientes procedentes de la cuenca de drenaje superficial del río Tepenaguasapa 2010. *Revista científica de Nicaragua* 1(23) 18-26
- Neiff, J. J., 2003. Calidad del agua en el tramo bajo del río Negro, Chaco, Argentina. *Revista FACENA* 0(19) 67-85.
- Norma mexicana. NMX-AA-026-SCFI-2010 Análisis de agua - medición de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- Ordoñez, G. S. J. (2017). Cuencas hidrográficas. Libro digital de Global Water Partnership (GWP), consulta sitio web: www.gwp.org.

- Oyarzún, C. E., Huber, a. 2003. exportación de nitrógeno en cuencas boscosas y agrícolas en el sur de chile. revista Gayana botánica 60(1) 63-68
- Oyarzún, C. E., 2003. Exportacion de nitrogeno en cuencas boscosas y agrícolas en el sur de chile, Gayana Bot. 60(1): 63-68
- Pacheco, Á. J., Cabrera, S. A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. Revista de Ingeniería, 7 (2) 47-54.
- Quirino, C. P. E., Ávila, D. D., Hernández, M. S. L., García, G. C., 2016. desarrollo económico del sector agropecuario en México a 20 años de la firma TLCAN. Revista TECSISTECATL de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México (20) 1:6
- Salazar, J.E. 2006. El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche. Revista Agronomía Mesoamericana 17(1): 69-77.
- Sánchez, J. O., Argumedo, A. M., Álvarez, J. F. G., Méndez, J. A. E., Ortiz, B. E. 2016. Conocimiento tradicional en prácticas agrícolas en el sistema del cultivo de amaranto en Tochimilco, Puebla. Revista Agricultura, sociedad y desarrollo 1870-5472.
- Sandoval, K. G., García, R. R.V., Dávalos, L. L., Doyle, R.D., Owen T. L. 2017. Fijación de nitrógeno en medios acuáticos. Revista en Ciencia y desarrollo 0 (1).
- SIAP, 2013. Los municipios que generan más valor agrícola. Informe Una mirada al panorama agroalimentario de México y el mundo (14).
- Silva, R. C. A., Cevallos, M. R. A., Sarabia, J. M. S., Boza, V. J. A. 2016 Impacto en el medio ambiente de las actividades agropecuarias en el cantón el empalme, Ecuador. Revista: Caribeña de Ciencias Sociales.
- Silva, R. C. A., Cevallos, M. R.A., Sarabia, J. M. S., Boza, V. J. A. 2016. Impacto en el medio ambiente de las actividades agropecuarias en el cantón el empalme, Ecuador Revista: Caribeña de Ciencias Sociales Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador.

- Torbert, H., K. Potter y J. Morrison. 1996. Management effects on fertilizer N and P losses in runoff on Vertisols. Trans. ASAE 39 (1): 161-166.
- Torrez, G. R., 1981. Sector agropecuario y desarrollo económico y social de México. Revista comercio exterior 6 (30) 619-626
- Torres R. D., Florentino A., López M. (2005). Pérdidas de suelo y nitrógeno por escorrentía en un ultisol degradado bajo diferentes condiciones de cobertura vegetal en chaguaramas-guárico. Revista Agronomía Tropical, 55(4), 475-496.
- Valdivia, G. P. O. C. 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. Tesis
- Yáñez, Y. W., Núñez, T. O. P., Yáñez, B. D. B., Rivera, G. V. E., López, V. I. C., Velástegui, E. G.P. Niveles de nitrógeno en suelos del cantón Chambo, provincia de Chimborazo. Revista Selva Andina Biosph, 5 (2).