



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUATUSCO

CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR EL USO DE FERTILIZANTES INORGÁNICOS EN LA ZONA AGRÍCOLA DE TENOSIQUE, TABASCO

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA:
BETZABEL BERISTAIN LÓPEZ**

**DIRECTOR DE TRABAJO RECEPCIONAL
DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA
DR. ADÁN CABAL PRIETO**

HUATUSCO, VER.

JULIO 2018.



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico Superior de Huatusco

Asunto: Liberación de Tesis

ING. CARINA ACOSTA SÁNCHEZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E.

Por este medio les informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral.

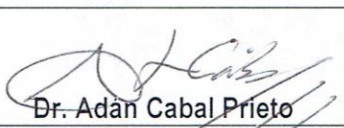
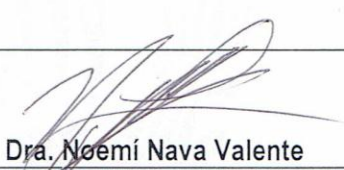
Nombre de la o el Egresado:	C. Betzabel Beristáin López
Carrera:	IAMB
No. de Control:	133Z0232
Nombre del Proyecto:	Contaminación del suelo por el uso de fertilizantes inorgánicos en la zona agrícola de Tenosique, Tabasco
Producto:	I. Tesis

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta actividad para la formación profesional de nuestros(as) egresados(as).

ATENTAMENTE



ING. DALILA REYES SAMPIERI
JEFE DE CARRERA DE ING. AMBIENTAL

 Dr. Adán Cabal Prieto Nombre y Firma del Asesor	 Dr. Salvador Partida Sedas Nombre y Firma del Revisor	 Dra. Noemí Nava Valente Nombre y Firma del Revisor
--	---	---

C.C.P.- División de IAMB- para su conocimiento.
Archivo..

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Adán Cabal Prieto, por su gran apoyo, motivación y confianza para realizar este trabajo, gracias por guiar mis ideas y no solo en la formación de este trabajo, sino también por mi formación académica a lo largo de la carrera. Le agradezco también por haberme facilitado los medios para llevar a cabo mi periodo de residencias profesionales así como las actividades propuestas para el desarrollo de esta tesis

A la Dra. Itzel Galaviz Villa, Jefa del Área de Nutrición y Toxicología del LIRA en el Instituto Tecnológico de Boca del Río, quiero expresarle mi más sincero agradecimiento por permitirme realizar este trabajo, por su disposición, sus buenos comentarios, su disponibilidad y su paciencia.

Al Instituto Tecnológico de Boca del Río por haberme permitido realizar mi periodo de residencias profesionales en el Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) y poder realizar el presente trabajo.

A la Mtra. Magnolia Gricel Salcedo Garduño, por recibirme en LIRA y apoyarme en el transcurso de realización de este proyecto, por su paciencia, su atención y por los buenos consejos.

DEDICATORIA

A:

Dios, por haberme dado la oportunidad de vivir y llegar hasta este punto de mi vida, por brindarme buena salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. Por favor guía mis pasos, aclara mis dudas, llena de valor mi espíritu y desborda abundancia en mi vida.

Mi madre, Araceli López Fernández, por ser la persona que me dio la vida, por ser mi mejor amiga y siempre confiar en mí, porque a pesar de todo sabes que te quiero y que toda mi vida te la dedico a ti.

Mi padre, Felipe Beristain Paredes, por ser mi mentor, porque sin ti yo no sería la persona que hoy en día soy, por confiar en mí y por apoyarme en todas mis decisiones, porque me has dado una buena educación lo cual agradezco, por eso y más te quiero.

Mi hermana, Ariadna Beristain López, por fungir tu papel de hermana mayor y ser mi ejemplo a seguir, por estar a mi lado y apoyarme siempre.

CONTENIDO

I	INTRODUCCIÓN.....	1
II	ANTECEDENTES.....	3
2.1	Problemas ambientales generados por fertilizantes inorgánicos	3
2.2	Efecto de la aplicación de fertilizantes inorgánicos en suelo.....	4
2.3	Área de estudio	5
2.3.1	Localización geográfica	5
2.3.2	Aspectos económicos.....	6
2.3.3	Geología y Geomorfología.....	7
2.3.4	Hidrología	7
2.3.5	Clima	7
2.3.6	Edafología	8
2.3.7	Uso de suelo.....	10
2.3.8	Contaminación en Tenosique	10
III	MARCO TEÓRICO	11
3.1	Suelo	11
3.2	Clasificación	12
3.2.1	Unidades y Subunidades de suelo	13
3.3	Ciclo del nitrógeno.....	21
3.3.1	Ciclo del fósforo.....	23
3.4	Contaminación	26
3.4.1	Contaminación en el Suelo	26
3.5	Fertilizantes.....	27
3.5.1	Fertilizantes nitrogenados.....	29
3.5.2	Fertilizantes fosfatados.....	30
3.6	Contaminación por fertilizantes	32
3.6.1	Contaminación por nitratos.....	33
3.6.2	Contaminación por fosfatos	34
IV	JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	35
V	HIPÓTESIS.....	36
VI	OBJETIVOS.....	36

6.1	Objetivo General	36
6.2	Objetivos Específicos	37
VII	METODOLOGÍA	37
7.1	Localización	37
7.2	Textura del suelo	38
7.3	Fósforo Total	40
7.4	Nitrógeno total	42
VIII	. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
8.1	Textura del Suelo	44
8.2	Fósforo total	45
8.2.1	Clasificación	47
8.3	Nitrógeno Total	48
8.3.1	Clasificación	48
IX	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
X	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
XI	ANEXOS	58

Índice de Cuadros

<i>Cuadro 1. Actividades económicas importantes del estado.</i>	<i>6</i>
<i>Cuadro 2. Superficie ocupada por subunidades de suelo en el estado de Tabasco.</i>	<i>8</i>
<i>Cuadro 3. Superficie ocupada por subunidades de suelo en el estado de Tabasco.</i>	<i>9</i>
<i>Cuadro 4. Subunidades de suelo del municipio de Tenosique, Tabasco.</i>	<i>9</i>
<i>Cuadro 5. Principales procesos identificados en el ciclo del nitrógeno que ocurren en el suelo.</i>	<i>22</i>
<i>Cuadro 6. Principales fertilizantes nitrogenados.</i>	<i>29</i>
<i>Cuadro 7. Principales fertilizantes fosfatados.</i>	<i>32</i>
<i>Cuadro 8. Puntos de muestreo.</i>	<i>37</i>
<i>Cuadro 9. Interpretación de resultados tipo de suelos.</i>	<i>44</i>
<i>Cuadro 10. Resultados clase textural dominante en muestras de suelo de Tenosique.</i>	<i>44</i>
<i>Cuadro 11. Resultado de fósforo total.</i>	<i>46</i>
<i>Cuadro 12. Valores de interpretación de fósforo total.</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 13 Interpretación porcentaje total de fósforo en suelo.</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 14. Resultados de nitrógeno total en suelos de Tenosique.</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 15. Valores de interpretación Nitrógeno total.</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 16. Interpretación de Nitrógeno total en suelos de Tenosique.</i>	<i>49</i>
<i>Cuadro 17. Corrección por temperatura.</i>	<i>58</i>

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Localización del municipio de Tenosique, Tabasco.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. Importancia de los suelos.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3. Relaciones entre el ciclo del nitrógeno y los compartimentos orgánicos y minerales.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4. Relaciones entre el ciclo del fósforo y los compartimentos orgánicos y minerales.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Contaminación local y difusa del suelo.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Curva de calibración de la solución vanadato-molibdato.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 7. Triangulo de texturas.</i>	<i>58</i>

RESUMEN

El suelo es considerado un recurso natural vital para el sustento de las actividades humanas, por lo que debe ser estudiado y analizado con el fin de encontrar la mejor manera de conservarlo a través del tiempo.

La agricultura representa el mayor uso de la tierra y en Tenosique es una de las principales actividades económicas, sabemos que la agricultura conlleva a un uso excesivo de fertilizantes y un mal manejo por el hecho de tener una mayor producción de alimentos. Se sabe que los fertilizantes se pueden clasificar como contaminantes, en vista de que su adición modifica las características naturales del suelo, lo cual perjudica al medio ambiente. En Tenosique, ya existe un problema de contaminación debido al uso extensivo e indiscriminado de agroquímicos, el cual deteriora los suelos y afecta los cuerpos de agua.

Es por esto que en el presente estudio se planteó como objetivo principal determinar el nivel de contaminación del suelo por nitrógeno y fósforo en la zona agrícola de Tenosique, Tabasco.

Para la determinación se tomaron 6 muestras compuestas cada una por 16 muestras simples, se clasificó la textura de cada una mediante el método de Boyoucos, para la determinación de fósforo total se empleó la técnica de Bray II y para la determinación de nitrógeno el método de micro Kjeldhal.

A partir de los resultados obtenidos se concluyó que de las seis muestras de suelo provenientes de Tenosique, Tabasco se clasifican como suelos arcillosos en su mayoría, en el caso de nitrógeno y fósforo total presentan un grado de contaminación medio.

Palabras clave: *Suelo; contaminación; fertilizantes; fósforo; nitrógeno.*

I INTRODUCCIÓN

La agricultura a nivel mundial, constituye una actividad fundamental para la subsistencia de la población humana. Diversos factores han conducido a un proceso de deterioro de sus escasos recursos y a una creciente dificultad para renovarlos (Rueda, *et al.*, 2015). El suelo es considerado un material extraordinario; de acuerdo a FAO (2015), es la capa superficial de la tierra que ha sido transformada muy despacio por la descomposición y acción meteorológica, la vegetación y el ser humano.

El suelo es un recurso natural, vital para el sustento de las actividades humanas, por lo que debe ser estudiado y analizado con el fin de encontrar la mejor manera de conservarlo a través del tiempo (Silva y Correa, 2009). El insuficiente diagnóstico, proveniente de las determinaciones analíticas del suelo, conlleva a errores en la selección y uso de agroquímicos, lo cual a su vez se traduce en problemas de nitrificación y eutrofización, así como contaminación de suelos y mantos acuíferos (Hernández, *et al.*, 2010).

La contaminación por fertilizantes se produce cuando éstos se aplican en una cantidad mayor a la velocidad en la que pueden absorberse por las plantas; o cuando se eliminan de la superficie del suelo por acción del agua o del viento, antes de ser absorbidos (FAO, 2015). En los últimos años, se ha incrementado el uso de fertilizantes para una mayor producción de alimentos, debido a la necesidad creciente de alimento para la humanidad. Se prevé que para 2050 la producción mundial de alimentos aumentará un 70 por ciento y casi el 100 por ciento en los países en desarrollo (<http://www.fao.org/nr/solaw/solaw-home/es/>).

Núñez (1973) y Apolinar (1994), mencionan que los fertilizantes pueden clasificarse como contaminantes, en vista de que su adición al suelo modifica las características naturales y altera el estado normal de las tierras cultivadas; por lo que la contaminación ocurre si entre otros efectos, se degrada la calidad de la tierra. La contaminación acumulada en el suelo reduce la producción agrícola y amenaza la agricultura sostenible (Fernández, 2008).

La agricultura convencional ha optado por la aplicación masiva de fertilizantes y el riego abundante. El problema es que las plantas solo absorben la mitad de esos fertilizantes, el resto se filtra a través del suelo (Fernández, 2008). Los nitratos y fosfatos provenientes de fertilizantes solubles son causa de eutrofización de ríos y lagos, un proceso de enriquecimiento del agua con nutrientes provenientes de fertilizantes minerales u orgánicos, que produce un crecimiento explosivo de algas y una posterior desoxigenación del agua cuando las algas perecen, efecto que provoca que organismos acuáticos mueran (Pérez y Landeros, 2009).

Los suelos del estado de Tabasco, han sido sometidos históricamente a diversas modificaciones, las cuales están relacionadas con las actividades económico-productivas de las diversas comunidades que las conforman. Las modificaciones ocurridas en su cubierta vegetal han originado cambios en el uso de suelo en el municipio de Tenosique (Alquino-Bravata, 2010).

Entre los efectos secundarios de la aplicación de fertilizantes nitrogenados se encuentran: la aportación de nutrientes como el azufre (S), magnesio (Mg), calcio (Ca), sodio (Na) y boro (B); la acidificación o alcalinización del suelo; el incremento de la actividad biológica con importantes efectos indirectos sobre la dinámica global de los nutrientes; daños por salinidad y contaminación de acuíferos; daños causados por las impurezas en los productos de descomposición; y la acción de la cianamida cálcica como herbicida y fungicida (Martínez *et al.*, 2011). Los efectos secundarios de la aplicación de fertilizantes fosfatados se asemejan a los causados por los fertilizantes nitrogenados, que aportan nutrientes como: azufre, calcio, magnesio, manganeso, sodio y sílice; además de variación en el pH del suelo y eutrofización de las aguas (Apolinar, 1994).

Es evidente que el uso continuo de los fertilizantes en el suelo ha truncado su evolución y condicionado negativamente sus propiedades. Como resultado, el suelo llega a degradarse (Vallejo, 2011). Se ha calculado que la superficie total de suelos perdidos a lo largo de historia es mayor que toda la superficie que se mantiene en cultivo (FAO-PNUMA, 1984). Los excedentes globales de fertilizantes seguirán aumentando (+23% de nitrógeno y +54% de fósforo), junto con la

producción de cultivos (82%) para el periodo de 2000-2050 (IASSTD, 2008). A la fecha las prácticas agrícolas han tenido como objetivo maximizar los rendimientos de los cultivos, sin considerar el deterioro ambiental que se ocasiona por el uso desmedido de los fertilizantes (Martínez, *et al.*, 2011).

La agricultura permite nuevas estrategias en el manejo de los recursos que están siendo actualmente utilizadas por los nuevos sistemas de producción agrícola. Para contrarrestar los problemas de contaminación en el suelo es importante que se opten por el uso de biofertilizantes y bioestimuladores microbianos, los cuales representan un componente vital de los sistemas sustentables, ya que constituyen un medio económicamente atractivo y ecológicamente aceptable (Martínez, *et al.*, 2010).

II ANTECEDENTES

2.1 Problemas ambientales generados por fertilizantes inorgánicos

Los fertilizantes, por estar asociados con el incremento temporal en la producción de comida, son alabados. Una de las principales razones del porqué los fertilizantes químicos contaminan el ambiente es debido a la aplicación excesiva y que los cultivos los usan en forma ineficiente. El fertilizante que no es recuperado por el cultivo termina en el medio ambiente, mayormente en las aguas superficiales o aguas subterráneas. La contaminación por nitrato en aguas está muy extendida y a niveles peligrosos en muchas regiones del mundo. Tales niveles de nitratos son peligrosos para la salud humana; estudios han relacionado la injerencia de nitratos con la metahemoglobinemia en niños y con cáncer gástrico, cáncer en vejiga y óseos en adultos (Conway y Pretty, 1991).

Los fertilizantes inorgánicos pueden convertirse también en contaminantes del aire, y han sido recientemente implicados en la destrucción de la capa de ozono y con el calentamiento terrestre. Su uso excesivo también ha sido ligado a la acidificación y a la salinización de los suelos; a la alta incidencia de las plagas y las enfermedades a través de la mediación negativa de los nutrientes en los cultivos (McGuinness 1993).

2.2 Efecto de la aplicación de fertilizantes inorgánicos en suelo

Las consecuencias de la fertilización han sido perjudiciales para el ambiente, por la elevada contaminación causada por el uso irracional de fertilizantes, los cuales causan graves daños en la salud del hombre y los animales. El impacto ambiental causado por el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos puede resumirse de la siguiente manera:

1. Su fabricación produce emisiones de CO_2 y NO_2 a la atmósfera, lo cual contribuye a incrementar los problemas con la capa de ozono.
2. Su aplicación excesiva en el campo da lugar al lavado de nitratos y a emisiones de N_2O y NH_3 , especialmente a partir de urea, con la consiguiente contaminación de todos los factores del agroecosistema. La abundancia de compuestos nitrogenados en los mantos acuíferos, como consecuencia del lavado, hace que en todos los reservorios donde van a desembocar estas corrientes subterráneas se produzca el efecto llamado eutrofización, que consiste en el crecimiento anormal de microorganismos, que agotan el oxígeno disuelto en el agua y producen la muerte masiva de peces y otros organismos acuáticos. Estos problemas de contaminación ya se han manifestado en los ríos más caudalosos del mundo, como el Mississippi en EE.UU. y el Yang Tse en China, en cuyas desembocaduras se aprecia una notable carencia de flora y fauna. Hay que tomar en cuenta que en las aguas afectadas por la eutrofización se estimula el desarrollo de *Pfiesteria*, un organismo que mata a los peces y es dañino para el hombre.
3. Son numerosos los informes que indican la presencia de altos niveles de nitratos en los productos agrícolas, lo que constituye una importante fuente de toxicidad para el hombre y ha obligado a un establecimiento más riguroso del control de los niveles críticos de estos compuestos en las actividades de comercialización de los alimentos (Martínez *et al.* 2010).

2.3 Área de estudio

2.3.1 Localización geográfica

El estado de Tabasco, se localiza en la Región Sureste de la República Mexicana, situado entre las coordenadas 17°19'00" y los 18°39'00" de latitud norte y los 90°57'00" y 94°08'00" de longitud oeste. Tiene una superficie total de 24,661.0 km² (INEGI, 2005), equivalentes al 1.3% del territorio nacional, siendo uno de los estados menos extensos del país. Hacia su interior está integrado políticamente por 17 municipios: Balancán (13.1% de la superficie), Cárdenas (8.0%), Centla (13.2%), Centro (7.2%), Comalcalco (1.7%), Cunduacán (4.1%), Emiliano Zapata (3%), Huimanguillo (14.5%), Jalapa (2.1%), Jalpa de Méndez (1.5%), Jonuta (4.5%), Macuspana (8.4%), Nacajuca (1.8%), Paraíso (2.3%), Tacotalpa (3.3%), Teapa (2.8%) y Tenosique (8.5%) (Palma-López *et al.* 2007).

El municipio de Tenosique se localiza en la Región de los Ríos, al sur del estado de Tabasco, tiene como cabecera municipal a la ciudad de Tenosique de Pino Suárez y se ubica en las coordenadas 17°28'5" de latitud norte y 91°25'6" de longitud oeste (Aquino-Bravata, 2010).



Figura 1. Localización del municipio de Tenosique, Tabasco.
Fuente Aquino-Bravata, 2010.

2.3.2 Aspectos económicos

La actividad económica del estado de Tabasco, está dada por la agricultura, ganadería, forestería, pesca, industria, comercio, turismo y los servicios financieros. De estas actividades, las que mayor divisas generan al estado, es la industria petrolera, seguida del comercio y turismo (Palma-López *et al.* 2007).

Cuadro 1. Actividades económicas importantes del estado.

Actividad económica	Unidades económicas	Valor de la producción (miles de pesos)
Agricultura, aprovechamiento forestal y pesca.	2274	2,501,901
Minería	37	306,608,532
Electricidad, agua y gas	17	375,722
Construcción	345	21,751,190
Manufactura	50751	93,519,311
Comercio	27197	28,027,302
Transportes, correos y almacenamiento	288	3,496,096
Servicios financieros	351	538,442

Fuente INEGI, 2014.

La distribución de la población ocupada en alguna de las actividades más representativas del Municipio de Tenosique son: 6,072 en las actividades agrícolas; 2,285 en el comercio; 2,022 en la industria manufactureras; 1,785 en alguna actividades de gobierno; 1,378 en otros servicios excepto gobierno; 904 en servicios educativos; 885 en rama de la construcción; 634 en servicio de hoteles y restaurantes y 476 en transporte, correos y almacenamiento, entre otros (PDUTenosique, 2017).

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es sin duda uno de los cultivos más rentables que existe en Tenosique, es altamente generador de divisas y de mano de obra; y aún cuando sus rendimientos no son los óptimos, genera ingresos importantes para quienes realizan esta actividad (Palma-López *et al.*, 2007).

Zavala *et al.* (2006) mencionan que en Tenosique, los productores también se dedican al cultivo de maíz (*Zea mays*).

2.3.3 Geología y Geomorfología

Tenosique y su entorno se localizan sobre estratos litológicos sedimentarios de origen aluvial, constituido en la era cenozoica en el periodo cuaternario (PDUTenosique, 2017). La génesis de la zona corresponde a los plegamientos de rocas del terciario cuya geología está constituida principalmente de material calizo y algunas lutitas y areniscas (Palma-López *et al.* 2007). En su geomorfología predominan las llanuras y los lomeríos bajos con planicies extensas de inundación, con una altitud promedio de 60 metros sobre el nivel del mar (msnm) (INEGI, 2001).

2.3.4 Hidrología

Tenosique se ubica dentro de la región hidrológica RH-30 “Grijalva-Usumacinta”, cuenca del Río Usumacinta (A), subcuenca del Río Usumacinta (a).

El Centro de Población de Tenosique de Pino Suárez se asienta sobre la margen derecha del Río Usumacinta que escurre de sur a norte. En época de lluvias, el derrame de las grandes avenidas de este río mantiene inundados durante buena parte del año algunos terrenos bajos que se ubican al Suroeste de la Localidad.

Otros ríos importantes que cruzan el territorio son; El San Pedro, Poleva, Río Seco, San Isidro, el Dieciséis y el Zapote Bobal.

Además de los ríos, Tenosique cuenta con una importante extensión lagunar como son: Canitzán, Grande, El Maíz, El Copo, Santa Cruz, Estapilla, Chica, Coba, Ensenada Grande y San Marcos, entre otras (PDUTenosique, 2017).

2.3.5 Clima

El clima predominante en Tenosique es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; la temperatura media anual es de 26.3 °C, oscilación media mensual de 21°C en enero a 30°C en mayo y la precipitación promedio es de 3 282 mm al año (INEGI, 2001). No obstante, hacia el sur, abarcando aproximadamente 20% de la superficie del municipio, en los límites con la Sierra de Chiapas y Guatemala, el clima es cálido húmedo con lluvias todo el año, las cuales decrecen ligeramente

en invierno, en este caso, la temperatura media anual oscila entre 25.4°C y 26.9°C (SEDESPA, 2006; Aquino-Bravata, 2010).

2.3.6 Edafología

El grupo de suelos más abundante en el estado de Tabasco corresponde a los Gleysols, distribuido principalmente en las grandes áreas de humedales, los Vertisols son un grupo de suelos importante para las actividades agrícolas y pecuarias del estado que ocupan un segundo sitio y seguidamente los Fluvisols en áreas cercanas a la vega de ríos y los Luvisols en la zona de lomeríos (Palma-López *et al.*, 2007).

Cuadro 2. Superficie ocupada por subunidades de suelo en el estado de Tabasco.

Clave	Subunidad de suelo	ha	%
ACfr	Acrisol Férrico	60330.90	2.4
ACgl	Acrisol Gléyico	2001.65	0.1
ACha	Acrisol Háptico	8866.30	0.4
ACHu	Acrisol Húmico	24458.27	1.0
ACpl	Acrisol Plíntico	84424.46	3.4
ALfr	Alisol Férrico	871.31	0.0
ALgl	Alisol Gléyico	1370.40	0.1
ALha	Alisol Háptico	404.98	0.0
ALhu	Alisol Húmico	1772.52	0.1
ARgln	Arenosol Endogléyico	2321.47	0.1
ARha	Arenosol Háptico	57614.30	2.3
ARivw	Arenosol Hipoluvico	15880.36	0.6
CMcr	Cambisol Crómico	12122.04	0.5
CMdy	Cambisol Dístrico	390.02	0.0
CMeu	Cambisol Éutrico	737.09	0.0
CMgln	Cambisol Endogléyico	1957.92	0.1
FLdy	Fluvisol Dístrico	1157.46	0.0
FLeu	Fluvisol Éutrico	210319.31	8.5
FRro	Ferralsol Ródico	9377.94	0.4
GLarum	Gleysol Areni-Úmblico	293.39	0.0
GLdy	Gleysol Dístrico	8214.90	0.3
GLeu	Gleysol Éutrico	99054.31	4.0
GLhu	Gleysol Húmico	445.74	0.0
GLmo	Gleysol Mólico	129271.45	5.2
GLpl	Gleysol Plíntico	12831.84	0.5
HSsa	Histosol Sáprico	87064.94	3.5
HSsosa	Histosol Sodi-Sáprico	3516.93	0.1
LPrz	Leptosol Réndzico	156301.51	6.3

Fuente Palma-López, *et al.* 2007.

Continúa Cuadro 3. Superficie ocupada por subunidades de suelo en el estado de Tabasco.

Clave	Subunidad de suelo	ha	%
LVcr	Luvisol Crómico	154031.36	6.2
LVgl	Luvisol Gléyico	77777.21	3.2
LVha	Luvisol Háplico	14594.51	0.6
PTeu	Plintisol Éútrico	37075.20	1.5
PTum	Plintisol Úmbrico	3036.04	0.1
RGdy	Regosol Dístrico	3776.58	0.2
RGub	Regosol Úrbico	5705.03	0.2
SCgl	Solonchak Gléyico	42834.93	1.7
SCglhi	Solonchak Gléyi-Hístico	341.30	0.0
SCsogl	Solonchak Sodi-Gléyico	10219.68	0.4
VRcr	Vertisol Crómico	56563.36	2.3
VReu	Vertisol Éútrico	318568.86	12.9
VReugl	Vertisol Eutri-Gléyico	2927.36	0.1
VReupe	Vertisol Eutri-Pélico	29066.18	1.2
VRpe	Vertisol Pélico	10903.94	0.4

Fuente Palma-López, *et al.* 2007.

Por otra parte, Zavala *et al.* (2006), al evaluar los suelos urbanos de ocho ciudades de Tabasco, en un área de 4,967 ha del municipio Tenosique, en el que localiza las siguientes unidades: Leptosoles, Vertisoles, Fluvisoles, Gleysoles, Calcisoles, Luvisoles y Cambisoles junto con 22 subunidades de suelos (IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007)).

Cuadro 4. Subunidades de suelo del municipio de Tenosique, Tabasco.

Subunidades de suelo	Clave	Subunidades de suelo	Clave
Acrisol húmico	AChu	Leptosol réndzico	LPrz
Acrisol háplico	ACha	Leptosol lítico	LPli
Cambisol éútrico-calcárico	CMeuca	Arenosol hipolúvico	ARlww
Acrisol plíntico	Acpl	Vertisol éútrico	VReu
Regosol dístrico	RGdy	Luvisol crómico	LVcr

Fuente Aquino-Bravata, 2010.

Los suelos del municipio de Tenosique, en su mayor parte son de origen aluvial como los Gleysoles, Vertisoles, Cambisoles, regosoles y Fluvisoles, considerados como suelos jóvenes y con algunas limitantes naturales.

En la zona correspondiente a los lomeríos y partes llanas aledañas a Tenosique, los suelos son de tipo Luvisoles, son suelos maduros de origen residual y coluvio-luvial, que tiene como material parental areniscas, calizas, lutitas y aluviones (PDUTenosique, 2017).

2.3.7 Uso de suelo

El uso del suelo del entorno de la ciudad de Tenosique es típicamente agropecuario (68.1%) seguido de vegetación nativa (17%), siendo el pastizal el uso más extendido (53%). En el estado de Tabasco los pastizales ocupan más del 50% de la superficie, seguidos de la vegetación hidrófila y los manglares 20%, mientras que la agricultura, de temporal y permanente, significa más del 12%. El principal tipo de tenencia de la tierra en el estado de Tabasco es la propiedad privada 86.1%, el resto es ejidal (Aquino-Bravata, 2010).

Por sus características edafológicas el alto contenido de humedad, los suelos del territorio tienen una gran vocación para uso para el desarrollo de la agricultura mecanizada continua, esto por la opción de establecer obras para riego o por las características climáticas en cuanto al aporte de precipitación.

La aptitud del suelo es media para el desarrollo de los cultivos mientras que es alta para los procedimientos de labranza. De igual manera, son zonas aptas para la ganadería por la alta presencia de pastizales (PDUTenosique, 2017).

2.3.8 Contaminación en Tenosique

Un problema de contaminación es el uso extensivo e indiscriminado de agroquímicos en los cultivos de temporal y ganadería, que representa un problema de contaminación lenta pero sistemática de los suelos, el manto freático y los cuerpos de agua (PDUTenosique, 2017).

III MARCO TEÓRICO

3.1 Suelo

Para el agrónomo, el suelo es la capa donde predomina la actividad orgánica y permite el desarrollo de la vida vegetal. Para el geólogo, el suelo es el material de la zona superficial relativamente delgada dentro de la cual se encuentran las raíces. De acuerdo con el concepto de ingeniería más amplio, se considera que el suelo incluye todos los materiales terrosos, orgánicos e inorgánicos que se encuentran en la zona o capa directamente encima de la corteza rocosa de nuestro planeta (Taylor, 1961).

El suelo es el elemento principal para la producción agrícola, tiene la capacidad de proporcionar agua y nutrientes a los cultivos, actúa de soporte físico de la agricultura, recibe sus residuos y ejerce de filtro depurador para proteger de la contaminación especialmente a las aguas subterráneas (Sinergia, 2006).

Dentro de los ecosistemas, el suelo desempeña diferentes funciones como la de ser hábitat para organismos; es el medio en el que las plantas crecen; es un sistema de reciclaje de nutrimentos y residuos orgánicos; es transformador-filtro y amortiguador de contaminantes; es regulador del ciclo hidrológico y es usado por los humanos como depósito de desechos y área de construcción (Brady y Weil, 2008; López, 2017).

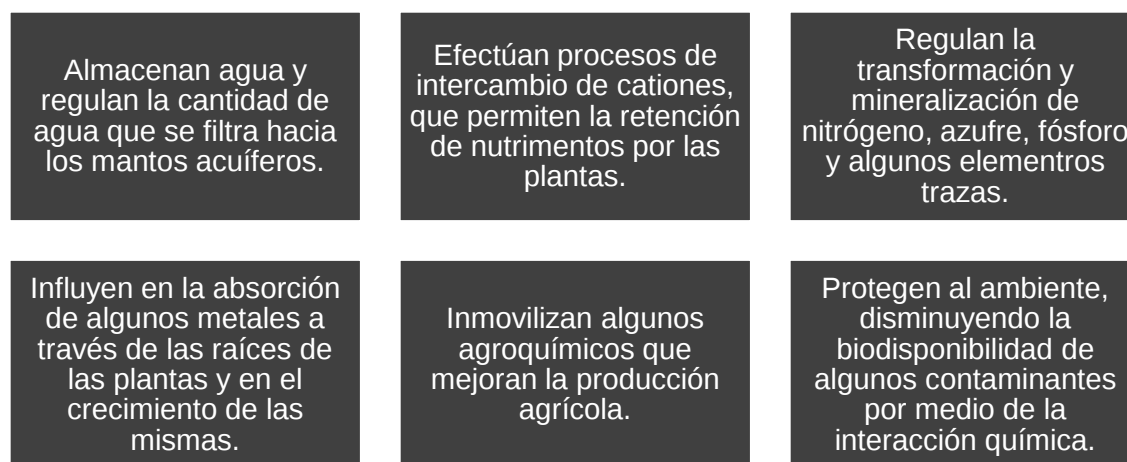


Figura 2. Importancia de los suelos.
Fuente Brady y Weil, 2008; López, 2017.

Su límite superior es el aire o agua poco profunda, en sus márgenes limita con aguas profundas o con áreas estériles de roca o hielo. Su límite inferior normalmente se le ubica hasta donde se realiza la actividad común de las raíces de las plantas nativas perennes, es decir, puede limitarse a la presencia de una capa cementada cercana a la superficie que impide el desarrollo de raíces o bien extenderse a más de 2 m de profundidad. Si esto último sucede es frecuente también establecer como límite inferior la profundidad de 2 m (Palma-López *et al.* 2007).

El suelo provee importantes funciones ambientales, dentro de los cuales destaca ser el sustento de alimento para las plantas, almacenar nutrientes, poseer y albergar materia orgánica proveniente de restos animales y vegetales, ser el hábitat de diversos organismos que transforman la materia orgánica presente en él, entre otros factores que lo hacen ser esencial en el desarrollo de los ecosistemas de los cuales forma parte. Es importante mencionar que el suelo presta otros servicios ambientales dentro de los que se puede enunciar el proporcionar espacios que permiten el esparcimiento de la población y el desarrollo cultural de las regiones en tanto compone paisajes agradables que fomentan la tranquilidad y la diversión de los seres humanos; de igual forma, este recurso participa en la regulación del ciclo hidrológico y sirve como vertedero de desechos, situación que favorece la supervivencia de las organizaciones de las cuales forma parte el hombre, pues de esta forma se desechan aquellos subproductos de producción considerados “indeseables” (Silva y Correa, 2009).

3.2 Clasificación

El suelo está constituido por partículas que le brindan de características físicas especiales. Su tamaño es muy variado desde fragmentos de rocas y gravas hasta partículas microscópicas de arcillas. De acuerdo a Arias (2014), estas partículas se clasifican por su tamaño en:

Grava. Son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de 2 mm de diámetro. Según su origen si son transportadas por las aguas sufren desgaste en sus aristas y son por tanto redondeadas. Suele encontrarse en los

lechos, en las márgenes de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en otros lugares donde las gravas han sido re-transportadas. Las gravas ocupan grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran conjuntamente con arenas, limos y arcillas, sus partículas varían desde 3" (7.62 mm.) hasta 2 mm.

Arena. Es el nombre que se le da a partículas de grano fino procedentes de la desintegración de las rocas ya sea por medio natural o artificial, sus partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro. El origen y la existencia de la arena son análogos al de las gravas, suelen encontrarse juntos en el mismo depósito.

Limo. Suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limos inorgánicos como el producido en canteras o limos orgánicos como el que suele encontrarse en los ríos, siendo este último caso de características plásticas. El diámetro está comprendido entre 0.05 mm. y 0.005 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas, su color varia de gris claro a muy oscuro. Son considerados como suelos pobres para cimentar.

Arcilla. Son partículas sólidas de grano inferior a 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son comprensibles y al aplicársele carga en su superficie se comprimen lentamente (Juárez y Rico, 1973).

3.2.1 Unidades y Subunidades de suelo

Acrisol (A), Acrisoles (AC). Suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. Se caracterizan por tener acumulación de arcilla en el subsuelo, muy ácida y pobre en nutrientes. Son moderadamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2004).

Acrisol háplico (ACha). Estos suelos tienen una expresión típica de ciertos rasgos, se presentan en zonas muy limitadas y su uso está restringido a pastizales de baja calidad nutrimental. Son clasificados como suelos con severas limitaciones de topografía, sus pendientes son cercanas al 7%, adicionalmente están limitados

por su baja fertilidad nativa lo cual dificulta el desarrollo de todo tipo de cultivo (Palma-López *et al.* 2007).

Acrisol húmico (AChu). Son suelos con textura arenosa en todo el perfil, lo que propicia una buena capacidad de infiltración, en época de lluvia presenta manto freático elevado. A pesar de su buen contenido de materia orgánica (MO) son pobre en N, debido a que el pH ácido limita la actividad microbiana. Existen serios problemas de fijación de P, por Al y Fe. Se requiere aplicar N, P y K, para satisfacer la demanda de los cultivos (Palma-López y Triano, 2007).

Acrisol plíntico (ACpl). Suelos de menor fertilidad que los acrisoles húmicos, están ubicados en lomeríos más pronunciados, con riesgos más fuertes de erosión. Se les conoce como “tierras de sabana”, “sabana abierta”, o “tierras amarillas” (Alquino, 2010).

Andosol húmico (Th). Suelos de origen volcánico, constituidos principalmente de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo. Son generalmente de colores oscuros y tienen alta capacidad de retención de humedad. Tienen generalmente bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas. Son muy susceptibles a la erosión eólica (INEGI, 2004).

Arenosol hipolúvico (ARlww). Los arenosoles son suelos que presentan un aumento en los contenidos de arcilla o una acumulación de arcilla en bandas dentro de los 125 cm de profundidad. Se les conoce como “arenales” o “tierras arenosas”. Fisiográficamente se ubican en lomeríos con pendientes entre 3 – 8%, así como pequeños cerros con pendientes que no superan el 12% (Alquino, 2010).

Calcisoles hipocálcicos (CLccw). Los calcisoles son suelos que tienen un horizonte cálcico o petrocálcico en los 100 cm superficiales, sin más característica de diagnóstico que un horizonte ócrico o cámbico, un árgico que es calcáreo o un gípsico subyaciendo a un petrocálcico. El material parental es de roca caliza del Terciario Mioceno. El relieve, exento de inundaciones, favorece el crecimiento de la zona urbana en estos suelos, que son moderadamente permeables, profundos,

de textura franca, poco desarrollados, pH moderadamente alcalino en el perfil (7.5 a 8.0), sin problemas de salinidad, contenidos pobres en nutrimentos y MO, excesivos de Ca que pueden fijar el P, buen drenaje interno. Suelo de baja fertilidad (Zavala *et al.*, 2006).

Cambisol éútrico – calcárico (CMeuca). Son los cambisoles suelos de buena fertilidad, con una saturación de bases mayor al 50%, pero con algunos problemas de erosión por pendientes moderadas, esta saturación de bases puede atribuirse la presencia de materiales calcáricos por la presencia de carbonato de calcio. Presentan una capa franca en todo el perfil, índice alto de infiltración y baja capacidad para retener humedad; cultivos con grandes requerimientos de humedad pueden verse afectados durante la época de secas. Deficiencias de K y alta fijación de P (Alquino, 2010).

Cambisoles éútricos (CMeu). Los cambisoles tienen un horizonte A ócrico y una saturación con bases de 50% o más, al menos entre 20 y 50 cm de profundidad. Estos suelos se dedican al cultivo de pastos nativos. Son suelos con moderada permeabilidad, profundos, de textura migajón arcillosa, desarrollados, con pH fuertemente ácido en el perfil (<5.0), lo que limita la disponibilidad de la mayoría de los nutrimentos, sin problemas de salinidad, contenidos pobres en nutrimentos y MO, buen drenaje interno. Es un suelo de baja fertilidad (Alquino, 2010).

Castañozem (K). Suelos alcalinos que se encuentran ubicados en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluvioso como las sierras y llanuras. Frecuentemente tienen más 70 cm de profundidad y se caracterizan por presentar una capa superior de color pardo o rojizo oscuro, rica en materia orgánica y nutriente, con acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo. Son moderadamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2004).

Chernozem (C). Suelos alcalinos ubicados en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos. Son suelos que sobrepasan comúnmente los 80 cm de profundidad y se caracterizan por presentar una capa superior de color negro, rica en materia orgánica y nutriente, con alta acumulación de caliche suelto o

ligeramente cementado en el subsuelo. Se consideran en estado natural un poco más fértiles que los Castañozems. Son moderadamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2004).

Feozem (H). Suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes, semejante a las capas superficiales de los Chernozems y los Castañozems, pero sin presentar las capas ricas en cal con las que cuentan estos dos tipos de suelos. Son de profundidad muy variable. Presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con más facilidad. El uso óptimo de estos suelos depende en muchas ocasiones de otras características del terreno y sobretodo de la disponibilidad de agua para riego (INEGI, 2004).

Fluvisoles éutricos (Je). Los fluvisoles son suelos que tienen material flúvico en los primeros 25 cm de profundidad, que se extiende al menos hasta los 50 cm; no tienen más propiedades de diagnóstico que un horizonte hístico, mólico, ócrico, takírico, úmbrico, yérmico, sálico o sulfúrico. Solo son afectados por inundaciones extraordinarias. Su uso es de cultivos anuales, pastizales cultivados y huertos familiares, en donde abundan frutales. Son suelos de buena permeabilidad, profundos, de texturas medias sobre gruesas, el pH es moderadamente alcalino (≤ 8.1), los carbonatos presentes pueden fijar el P, sin problemas de salinidad, contenidos bajos de nutrimentos y MO, con buena agregación, muy buena actividad biológica y buen drenaje superficial. Son suelos de baja fertilidad (Alquino, 2010).

Gleysoles éutricos (GLEu). Los gleysoles éutricos tienen saturación de bases de 50% o más entre los 20 y 50 cm de profundidad. El nombre de la unidad se relaciona con la presencia de propiedades gléyicas (saturación con agua durante ciertos periodos o todo el año y procesos de reducción asociados a la segregación de Fe, que se detectan por coloraciones azulosas o verdosas y moteado rojizo,

amarillento u ocre) en los primeros 50 cm de profundidad, y un solo horizonte de diagnóstico hasta 100 cm de profundidad (Palma-López et al., 2007).

Son suelos de lenta permeabilidad, profundos, de textura arcillosa, poco desarrollados, pH moderadamente ácido a fuertemente alcalino en el perfil (6.2 a 8.1), sin problemas de salinidad, contenidos medios de nutrimentos (excepto K) y MO, y excesivos de calcio que puede fijar P, deficiente drenaje interno por el elevado contenido de arcilla que favorece el proceso de desnitrificación, manto freático elevado. Se consideran de baja fertilidad (Alquino, 2010).

Gleysols húmicos (GLhu). Son suelos con contenido alto de C orgánico (>1% en peso), en la fracción tierra fina hasta una profundidad de 50 cm. El material parental es de sedimentos aluviales mezclados con materiales orgánicos. Es un suelo con lenta permeabilidad, profundo, de textura arcillosa, poco desarrollado, con pH moderadamente alcalino en el perfil (7.1 – 7.9), sin problemas de salinidad, contenidos ricos en nutrimentos (a excepción de K) y MO, presenta excesos de Ca que pueden fijar P, deficiente drenaje interno por su elevado contenido de arcilla que favorece el proceso de desnitrificación y manto freático elevado. Se considera un suelo de baja fertilidad (Alquino, 2010).

Histosol (O). Suelos con muy alto contenido de materia orgánica, generalmente de color negro, esponjoso, ligero y con alta capacidad de retención de humedad. Se encuentran restringidos a sitios donde se acumulan desechos orgánicos y agua, tales como pantanos y lechos de antiguos lagos. Frecuentemente tienen olor a podrido y una importante acumulación de salitre. Prácticamente no son susceptibles a la erosión (INEGI, 2004).

Litosol (I). Son los suelos más abundantes del país pues ocupan 22 de cada 100 hectáreas de suelo. Se caracterizan por su profundidad menos de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre (INEGI, 2004).

Luvisol (L). Suelo con acumulación de arcilla. Son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros. Se destinan principalmente a la agricultura con rendimientos moderados. En México 4 de cada 100 hectáreas está ocupada por Luvisoles (INEGI, 2004).

Luvisoles cutani-férricos (LUctfr). Los luvisoles son suelos que presentan barnices de arcilla en el horizonte árgico. Además tienen un horizonte férrico dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo. Son suelos con moderada permeabilidad, profundos, textura migajón arcillo arenosa, pH fuertemente ácido en el perfil (<5.1) lo que dificulta la disponibilidad de nutrimentos en el suelo y una posible toxicidad por Fe y Al, sin problemas de salinidad, bajo contenido de micro nutrimentos y MO, buen drenaje interno por su elevado contenido de arena. Se considera un suelo de baja fertilidad (Alquino, 2010).

Leptosoles réndzicos (LPrz). Los suelos correspondientes a esta subunidad son los leptosoles que tienen un horizonte A mólico, que contiene o recubre inmediatamente, material calcáreo donde el equivalente de carbonato de calcio sobrepasa el 40%, no tiene roca dura y continua o capas cementadas continuas dentro de los 10 primeros centímetros de profundidad. Están exentos de inundaciones por lo que son usados para el desarrollo urbano de la ciudad. Son suelos con buena permeabilidad, poco profundos, con textura media o media sobre gruesa, de poco desarrollo, con pH moderada a fuertemente alcalino (7.4 a >8.5), sin problemas de salinidad, ricos en nutrimentos (excepto en K y Mg), y MO, con buena agregación, muy buena actividad biológica y buen drenaje superficial. Es un suelo de mediana fertilidad (Alquino, 2010).

Leptosol lítico (LPlí). Son aquellos suelos limitados en su profundidad por una roca dura y continua, o por una capa cementada continua dentro de los 10 cm de profundidad. Son limitadas principalmente en profundidad por roca calcárea y en ocasiones por lutitas y areniscas (Alquino, 2010).

Nitosol eútrico (Ne). Los nitosoles son suelos de color rojizo muy brillante y enriquecido de arcilla en todo su espesor, por lo menos hasta 150 cm de profundidad. Son suelos muy profundos pero con una capa superficial muy delgada de color oscuro, donde la parte orgánica está bien mezclada con la parte mineral. Su fertilidad natural es alta. Tienen susceptibilidad a la erosión de baja a moderada (INEGI, 2004).

Planosol (W). Suelos generalmente desarrollados en relieves planos que en alguna parte del año se inundan en su superficie. Son medianamente profundos en su mayoría, entre 50 y 100 cm, y se encuentran principalmente en los climas templados y semiáridos de nuestro país. Se caracterizan por presentar debajo de la capa más superficial, una capa infértil y relativamente delgada de un material claro que generalmente es menos arcilloso que las capas tanto que lo cubren como las capas que la subyacen. Debajo de esta capa se presenta un subsuelo muy arcilloso, o bien, roca o tepetate, todos impermeables. Son muy susceptibles a la erosión, sobre todo en las capas superficiales (INEGI, 2004).

Ranker (U). Suelos de climas templados húmedos o semifríos húmedos, con una vegetación natural típica de bosque. Se caracterizan por ser ácidos, con espesor menor a los 25 cm, color oscuro por el alto contenido de materia orgánica y porque descansan directamente sobre roca no carbonatada. Su susceptibilidad a la erosión es alta cuando sufren desmonte debido a que se encuentren por lo general en laderas (INEGI, 2004).

Regosol (R). Suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Son arenosos, ácidos y deficientes en fósforo. Muchas veces están asociados con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad. En general son claros o pobres en materia orgánica (INEGI, 2004).

Regosol dístrico (RGdy). Suelos que tienen saturación con bases menor de 50% en por lo menos alguna parte entre 20 y 100 cm desde la superficie del suelo, o en

una capa de 5 cm de espesor directamente encima de un contacto lítico en Leptosoles (Palma-López *et al.* 2007).

Rendzina (E). Estos suelos se caracterizan por tener una capa superficial abundante en materia orgánica y muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Generalmente las rendzinas son suelos arcillosos y poco profundos por debajo de los 25 cm, pero llegan a soportar vegetación de selva alta perennifolia. El uso forestal de estos suelos depende de la vegetación que presenten. Son moderadamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2004).

Solonchak (Z). Se presentan en zonas donde se acumula el salitre, tales como lagunas costeras y lechos de lagos, o en las partes más bajas de los valles y llanos de las regiones secas del país. Tienen alto contenido de sales en todo o alguna parte del suelo (INEGI, 2004).

Solonetz (S). Se caracterizan por tener un subsuelo arcilloso con terrones duros en formas de columnas o prismas debido al alto contenido de sales de sodio. Estos suelos se localizan en zonas donde se acumulan sales, el particular, el álcali de sodio. No tienen uso agrícola y su recuperación es difícil y costosa (INEGI, 2004).

Vertisoles eutri-pélicos (VReupe). Los vertisoles son suelos que, mezclados, tienen al menos 30% de arcilla en los primeros 18 cm, formación de grietas en algunas épocas de sequía y agregados estructurales en forma de cuña. Tienen permeabilidad lenta, son profundos, de textura arcillosa, densidad aparente media, capacidad de agua aprovechable alta; son suelos poco desarrollados, con pH (6.7 a 8.0), neutro a moderadamente alcalino en el perfil, sin problemas de salinidad, ricos en nutrientes excepto potasio (K), y materia orgánica (MO), presentan alto contenido de calcio que pueden fijar P, por lo que su drenaje interno es deficiente por el elevado contenido de arcilla que favorece el proceso de desnitrificación. Se considera un suelo de mediana fertilidad (Palma-López *et al.* 2007).

Xerosol (X). Literalmente, suelo seco. Tienen por lo general una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica. Debajo de esta capa

puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien, muy semejante a la capa superficial. Su rendimiento agrícola está en función a la disponibilidad de agua para riego. Son de baja susceptibilidad a la erosión, salvo en laderas o si están directamente sobre caliche o tepetate a escasa profundidad (INEGI, 2004).

Yermosol (Y). La capa superficial de los yermosoles es aún más pobre en humus y generalmente más clara que los Xerosoles. En ocasiones presentan capas de cal, yeso y sales en la superficie o en alguna parte del subsuelo. Su uso agrícola está restringido a las zonas donde se puede contar con agua de riego (INEGI, 2004).

3.3 Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, por lo que se tiene sistemáticamente en cuenta en los planes de fertilización (Porta *et al.*, 2003).

El ciclo del nitrógeno comprende diferentes compartimentos ambientales como la atmósfera, la biosfera, la litósfera, la hidrósfera y la pedosfera. Los procesos más importantes que ocurren en este ciclo son: la fijación de N_2 atmosférico; la fijación en compuestos orgánicos de seres vivos, la inmovilización, la mineralización, la nitrificación, la fijación de $N-NH_4^+$ en las arcillas minerales; la lixiviación, el lavado y escorrentía superficial; la desnitrificación y la volatilización (López, 2017; Porta *et al.* 2003).

La formación del nitrógeno puede ocurrir de diversas maneras, ésta se realiza frecuentemente en forma biológica. Como sucede con las bacterias, algas y líquenes que viven en el suelo y que transforman el nitrógeno del aire en amoníaco y otros compuestos similares (Arellano, 2002). Los ingresos de nitrógeno al suelo se dan a través de los fertilizantes químicos, el abono de ganado, deposición atmosférica y a través de la mineralización de los residuos del cultivo y el nitrógeno orgánico del suelo (Drury, 2014; López, 2017) entra en la biosfera por fijación química y biológica del nitrógeno molecular (N_2) y se remueve de la misma por desnitrificación (Cerón y Aristizábal, 2012).

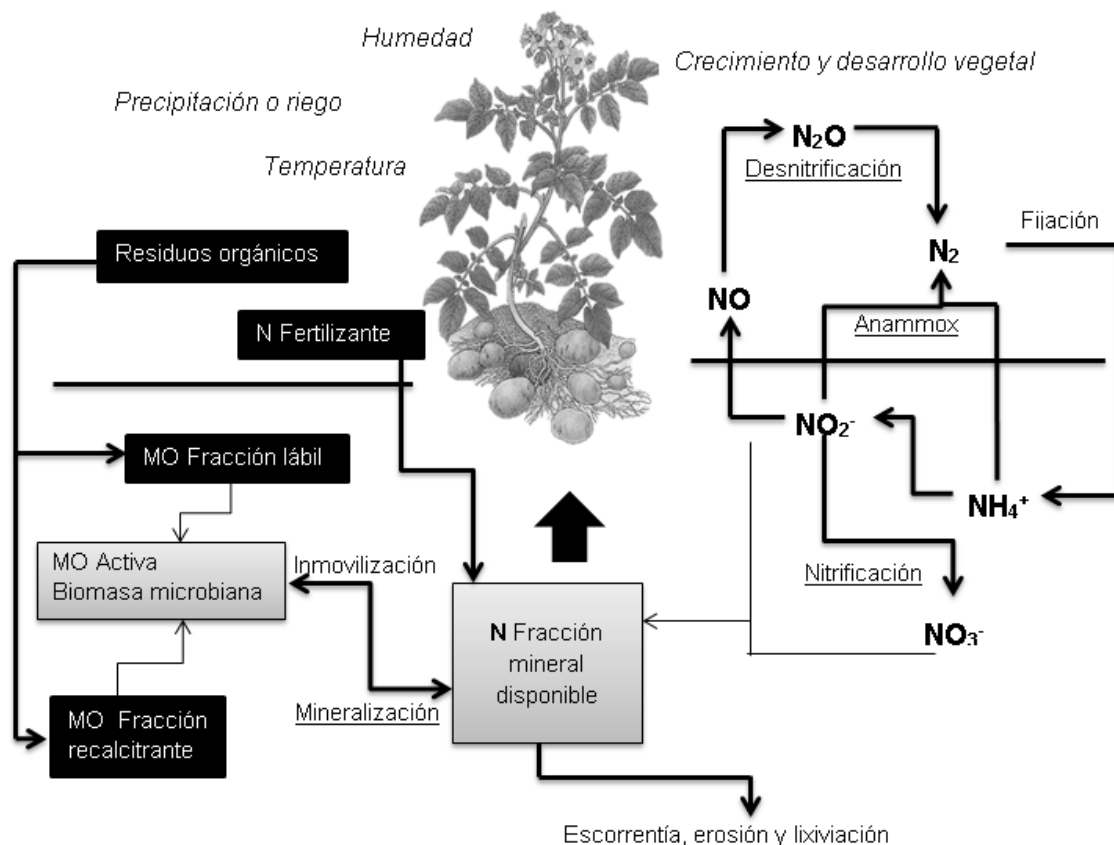


Figura 3. Relaciones entre el ciclo del nitrógeno y los compartimentos orgánicos y minerales. Los cuadros negros son las entradas al sistema, los grises las fracciones disponibles; sin recuadro procesos y factores que tienen influencia en la disponibilidad de nitrógeno.

Fuente Cerón y Aristizábal, 2012.

Cuadro 5. Principales procesos identificados en el ciclo del nitrógeno que ocurren en el suelo.

Denominación	Descripción
Fijación de N_2 atmosférico	Incorporación por la lluvia al suelo: N-NO_3^- , N-NH_4^+ . Fijación simbiótica: N-NH_4^+ en el suelo. Actividad bacteriana: Rhizobium y otros; $\text{N}_2 + 6\text{H}^+ \rightarrow 2\text{NH}_3$ Fijación no simbiótica: N-orgánico y N-NO_3^- Procesos industriales: fabricación de fertilizantes tales como: N-NO_3^- , N-NH_4^+ y N-NH_2

Fuente Porta *et al.*, 2003.

Continúa Cuadro 5. Principales procesos identificados en el ciclo del nitrógeno que ocurren en el suelo.

Denominación			Descripción
Fijación	en compuestos orgánicos de seres vivos		Plantas, animales y sus residuos, estiércoles, purines y desechos urbanos.
Inmovilización			Estabilización en el suelo en forma N-orgánico (humus). Actividad microbiana que incorpora N en secuencias metabólicas para biosintetizar constituyentes celulares del organismo, en particular proteínas.
Mineralización			Paso de N-orgánico a N-NO_3^- y N-NH_4^+ por hidrólisis. Afecta anualmente a un 2-3 % del N-inmovilizado en el suelo, y parcialmente a la materia orgánica recién incorporada.
Nitrificación			Paso de N-NH_4^+ a N-NO_3^- por oxidación enzimática, que tiene lugar en dos etapas: $\text{N-NH}_4^+ \rightarrow \text{HONH}_2 \rightarrow \text{HONNOH} \rightarrow \text{NO}_2^-$ por acción de bacterias autotróficas aerobias: Nitrosomonas, Nitrosolobus, Nitrospira. El N-NO_2^- producido es tóxico para las plantas superiores. La oxidación prosigue: $\text{NO}_2^- + \text{O}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ por acción de bacterias autotróficas aerobias: Nitrobacter.
Fijación	N-NH_4^+ en arcillas		Formación de complejos de esfera interna.
Adsorción	N-NH_4^+ en arcillas		Formación de complejos de esfera externa, el N-NH_4^+ se halla en forma intercambiable.
Lavado y escorrentía superficial			El N-NO_3^- no absorbido por las plantas, al no poder ser absorbido por las arcillas ni por la materia orgánica es susceptible de ser lavado siendo transferido del suelo al agua freática. También puede haber pérdidas por erosión. El N-NO_2^- se produce en suelos con drenaje insuficiente y condiciones reductoras.
Desnitrificación			El paso de N-NO_3^- a N-NO_x , y a N-N_2 tiene lugar en medios anaerobios.
Volatilización			El N-NH_4^+ puede perderse como N-NO_3^- en suelo calizos y en suelos arenosos.

Fuente Porta *et al.*, 2003.

3.3.1 Ciclo del fósforo

En el ciclo del fósforo se presentan las pérdidas en el suelo representadas por las cosechas, lavado, escurrimiento y erosión; además, se observan las ganancias de fósforo en el suelo, representadas por residuos de animales y biosólidos,

deposición atmosférica, residuos de plantas y aplicación de fertilizantes minerales. También se observa las formas o los componentes en que se encuentra el fósforo en el suelo (De las Salas, 1987; Rojas, 2013).

El ciclo del P a diferencia del ciclo del nitrógeno, no incluye cambios en la valencia. Los principales procesos en el suelo involucran, toma por las plantas y su retorno a través de los residuos vegetales y animales, reacciones de fijación biológico dado por procesos de mineralización-inmovilización y solubilización dependientes de la actividad microbiana (Stevenson y Cole, 1999; Cerón y Aristizábal, 2012).

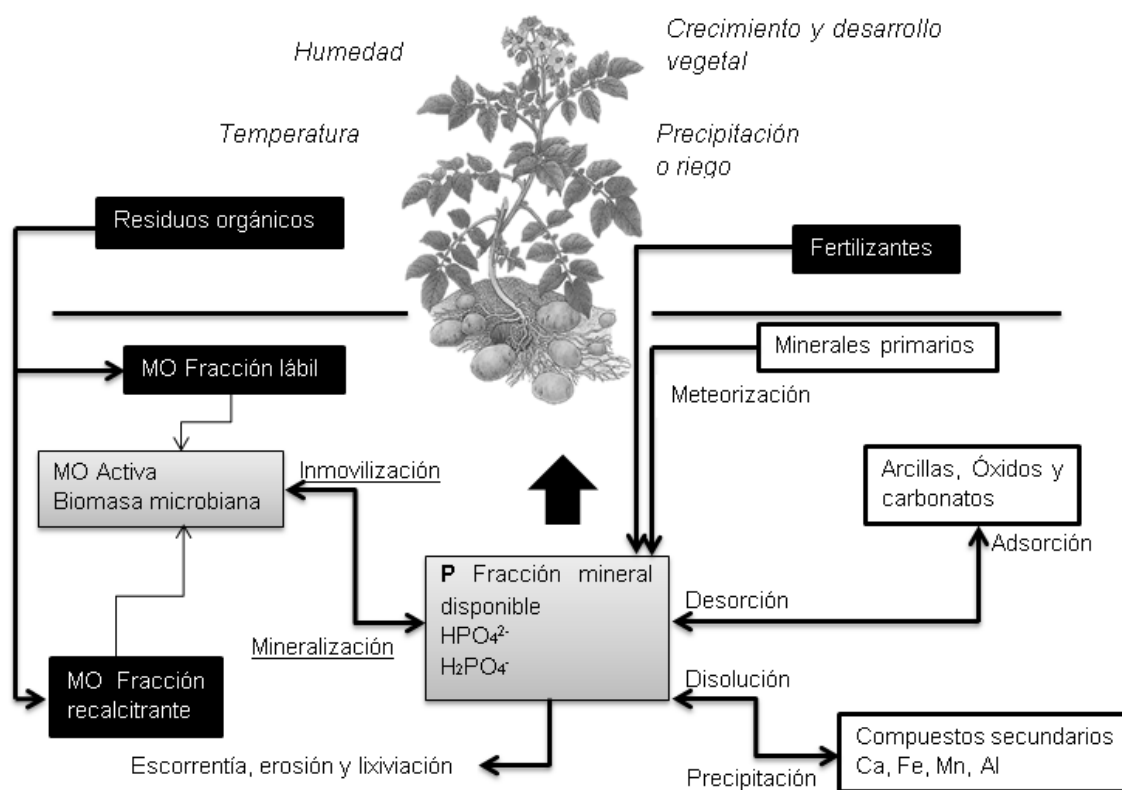


Figura 4. Relaciones entre el ciclo del fósforo y los compartimentos orgánicos y minerales. Los cuadros negros son las entradas al sistema, los grises las fracciones disponibles, sin color las fracciones minerales; sin recuadro procesos y factores que tienen influencia en la disponibilidad de fósforo.

Fuente Cerón y Aristizábal, 2012.

La mitad del fósforo en la biosfera se encuentra en forma orgánica. En los suelos el P puede encontrarse en forma de apatito y en las formas orgánicas. Ni una ni otras son formas asimilables por las plantas, por lo que se requerirá un proceso de mineralización para que pase a ser disponible para las plantas (Porta et al., 2003). De las Salas (1987), afirma que un proceso importante dentro del ciclo es la mineralización de fósforo orgánico, ya que implica la formación de compuestos menos complejos (ácidos nucleicos, proteínas), a partir de sustancias polimerizadas (nucleoproteínas), que liberan ácido fosfórico (Rojas, 2013). El fósforo inorgánico se presenta generalmente fuertemente fijado en forma de fosfatos de Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} y Al^{3+} , especialmente en arcillas del grupo de las caolinitas y ocluido en los óxidos de hierro y aluminio (Cerón y Aristizábal, 2012).

La principal contribución a la dinámica del fósforo en los suelos está dada por el recambio de los procesos de mineralización-inmovilización microbianos (Richardson y Simpson, 2011), que poseen un papel esencial especialmente en la rizósfera. Los microorganismos que colonizan la rizósfera pueden excretar ácidos orgánicos que incrementan la solubilidad del P y enzimas con actividad fosfatasa que hidrolizan mono di y tri ésteres de fosfato, junto con las asociaciones micorrízicas que son críticas en la disponibilidad para muchas plantas (Graham y Miller, 2005), estas últimas utilizan una combinación eficiente de translocación del P acompañada de actividades fosfatasa y fitasa (Cerón y Aristizábal, 2012). Los ácidos nucleicos y fosfolípidos se mineralizan rápidamente (Lim et al., 2007), ya que los diésteres de fosfato se adsorben débilmente en los materiales del suelo, siendo más vulnerables a la degradación microbiana, mientras que los monoésteres, como los fosfatos de inositol, no son fácilmente mineralizables y llegan a acumularse en grandes cantidades.

Para liberar los grupos fosfatos del inositol se requiere de fosfatasas específicas llamadas fitasas (Lim et al., 2007). Se conocen microorganismos (*Bacillus*, *Enterobacter* ssp, hongos como *Aspergillus*, *Emmericella*, *Penicillium* y hongos micorrizicos) que producen actividad fitasa extracelular y estimulan el crecimiento vegetal por aumento en la disponibilidad de fosfatos (Idriss et al., 2002). La

desfosforilación del *myo*- IP_o es catalizada por la actividad 3-fitasa de origen vegetal, sin embargo la actividad puede ser inhibida por la presencia de montmorillonita (Turner *et al.*, 2002); el tipo de arcillas y el número de grupos fosfato presentes tienen influencia en la adsorción. Las poblaciones microbianas rizosféricas poseen actividad para degradar el fitato y se cree (Lim *et al.*, 2007) que las fitasas tipo β -helice (BBP: β -propeller phytase) tienen el principal papel en la hidrólisis de dicho sustrato, tanto en comunidades acuáticas como en comunidades de suelo.

Las fosfatasas extracelulares que se requieren para la mineralización/hidrólisis de los ésteres orgánicos de P, las producen microorganismos (*Bacillus subtilis*, *Nostoc sp.*, *Caulobacter crescentus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Sinorhizobium meliloti*, *Corynebacterium glutamicum*) y plantas. La aplicación de materia orgánica incrementa tanto la actividad fosfatasa como el contenido de fósforo microbiano, que a su vez contribuye al incremento de P disponible (Cerón y Aristizábal, 2012).

3.4 Contaminación

La contaminación puede definirse como el aporte de un elemento o de un compuesto químico desde el exterior del lugar que provoca un aumento respecto a la concentración inicial, lo que produce efectos desfavorables, tanto por su acción desactivadora, como si provocan un aumento excesivo de la actividad (Porta *et al.*, 2003).

3.4.1 Contaminación en el Suelo

Un suelo contaminado es aquel que ha superado su capacidad de amortiguación para una o varias sustancias y como consecuencia pasa de actuar como un sistema protector a ser causa de problemas para el agua, la atmósfera y los organismos. Se puede decir que un suelo está contaminado, cuando las características físicas, químicas o biológicas originales han sido alteradas de manera negativa, debido a la presencia de componentes de carácter peligroso para el ecosistema; en este caso, la productividad que el suelo tenía, se pierde total o parcialmente (Cepeda, 2003; Silva y Correa, 2009).

Estos efectos tiene dos consecuencias generales: a corto plazo disminución de la producción y aumento de los gastos de explotación (cada vez el suelo necesita mayor cantidad de abonos y cada vez produce menos); a largo plazo infertilidad total y desertificación del territorio (Gaiak, 2007).

La contaminación del suelo generada por actividades económicas puede presentarse de dos formas: degradación edáfica, proveniente de fuentes claramente delimitadas (contaminación local o puntual) y la causada por fuentes difusas (Silva y Correa, 2009).

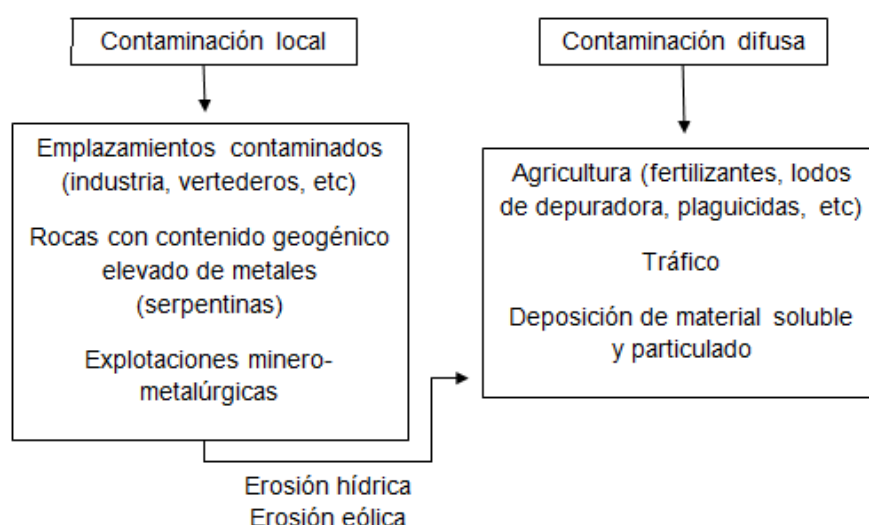


Figura 5. Contaminación local y difusa del suelo.

Fuente AEMA, 2002; Silva y Correa, 2009

Las actividades económicas, especialmente la agricultura, están haciendo un uso cada vez más intensivo del suelo, empleando insumos como plaguicidas y fertilizantes, con el fin de obtener alimentos y materias primas (Silva y Correa, 2009). Más del 50% de las cosechas obtenidas son atribuidas al uso de fertilizantes (Bifani, 1992; Lira y Trujillo, 1992; Apolinar, 1994).

3.5 Fertilizantes

Son productos naturales o manufacturados que se emplean para aumentar el desarrollo de las plantas suministrando los elementos químicos esenciales. Los que se aportan en grandes cantidades por los fertilizantes son fósforo, nitrógeno y potasio, los cuales no son asimilables en forma elemental y se suministran en

forma de combinación química, con uno o más elementos esenciales, tales como carbono, hidrógeno, oxígeno, calcio, magnesio, azufre y cloro (Sanchez, 1988).

Los fertilizantes se aplican para subsanar las deficiencias de nutrimentos primarios, secundarios y con menor frecuencia para micronutrientes. Las deficiencias se pueden diagnosticar visualmente (SAGARPA, 2016).

Tienen como objetivo conseguir altos rendimientos en las cosechas y producir buena calidad. Su acción consiste en:

- Mejorar el suelo como sustrato nutritivo
- Complementar el suministro natural
- Deficitario, de elementos nutritivos
- Restituir los elementos nutritivos que han sido extraídos por el propio cultivo o que han sido desaparecido por otros motivos (Finck, 1988).

La obtención de fertilizantes está ligada a fuentes de materias primas que en unos casos son agotables y en otros no. El nitrógeno, que es el más importante para la nutrición tenía antes fuentes muy limitadas (productos derivados de pescado, sangre seca, estiércol y otros restos orgánicos, subproductos amoniacales del gas de hornos de coque, harinas de semillas oleaginosas, yacimientos de nitrato y guano), pero actualmente se dispone de una fuente inagotable que es el aire, ello es posible gracias al descubrimiento del método síntesis del amoniaco a partir de nitrógeno atmosférico. El fósforo se obtiene de los yacimientos de fosforita, minerales que, aunque se encuentran en gran abundancia, son agotables (Sanchez, 1988).

La composición de los fertilizantes es la cantidad de nutrientes que contienen. Los fertilizantes a base de nitrógeno, fósforo y potasio se designa mediante tres números; el primero indica el porcentaje en nitrógeno, el segundo el porcentaje en anhídrido fosfórico y el tercero el porcentaje de potasio. Por ejemplo el abono del tipo 16 – 20 – 15 es un abono que tiene 16 kg de nitrógeno, 20 kg de anhídrido

fosfórico y 15 kg de óxido de potasio. Se preparan abonos mixtos de distintas composiciones, debido a las necesidades de cultivo que requieren fórmulas específicas de abonado (Sanchez, 1988). Los fertilizantes se pueden encontrar en forma sólida o líquida.

3.5.1 Fertilizantes nitrogenados

La aplicación de fertilizante nitrogenado es el que más influencia ha tenido sobre el incremento en el rendimiento de los cultivos. El consumo mundial de fertilizantes nitrogenados se ha incrementado 15 veces, mientras que el fósforo se ha incrementado tan sólo 8 veces (Olson, 1978; Catellanos, 1981; Medina y Cano, 2001).

Los fertilizantes nitrogenados son aquellos que portan el átomo de nitrógeno en forma de amonio (NH_4), nitrato (NO_3) o amida (NH_2). Otros compuestos nitrogenados como el nitrito, el N molecular (N_2) y el óxido nitroso (N_2O) no forman parte de los fertilizantes. Un producto gaseoso que se utiliza en los países desarrollados es el amoníaco (NH_3) pero que no se utiliza en la mayoría de los países del tercer mundo porque requiere de maquinaria sofisticada para su aplicación al suelo (Cepeda, 2010). El siguiente cuadro muestra las características principales de los fertilizantes nitrogenados más usados.

Cuadro 6. Principales fertilizantes nitrogenados.

Nombre	Formula	Nutrimento %	Índice salino	Índice básico	Índice ácido
Amoníaco anhidro	NH_3	82	0.572		148
Nitrato de amonio	NH_4NO_3	35	2.990		62
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21	3.253		110
Fosfato monoamónico (MAP)	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	11	2.453		58
Fosfato diamónico (DAP)	$(\text{NH}_4)\text{HPO}_4$	18	1.614		70
Solución nitrogenada		40	1.930		57
Nitrato de potasio	KNO_3	13-14	5.336		
Nitrato de sodio	NaNO_3	16	6.060	29	
Urea	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	45-46	1.618		71

Fuente SAGARPA, 2016.

El nitrógeno orgánico o amoniacal se encuentra formando parte de los residuos de cosecha, abonos orgánicos o en los microorganismos del suelo. Los fertilizantes amoniacales contienen como compuesto de N_2 , el nutrimento amonio, o su forma básica el amoníaco. El amoníaco es un gas incoloro, de olor muy penetrante, venenoso para las plantas y los animales, cuando se encuentra muy concentrado, sin embargo, es inocuo para el hombre y nutritivo para las plantas cuando se encuentra en forma diluida. El sulfato amónico es el abono nitrogenado sintético más antiguo contiene un 21% de N; es una sal blanca, cristalizada, en forma de agujas, soluble en agua, pero poco higroscópica (Finck, 1988). El amonio puede ser oxidado a nitratos y ser fijado por las partículas sólidas del suelo o utilizado sin cambio por los microorganismos y las plantas.

Los abonos nítricos contienen la sustancia nutritiva nitrato (NO_3^-), es decir, el anión del ácido nítrico. Los abonos nítricos actúan de forma especialmente rápida ya que son directamente asimilables por las plantas (Finck, 1988). Los nitratos pueden perderse por volatilización y lavado pudiendo contaminar las aguas subterráneas de forma irreversible.

La urea es la carbamida (la diamida del ácido carbónico), es sometida a la amonificación (formación de NH_4) y nitrificación previas para su utilización por los microorganismos y plantas (Boixadera y Cortés, 2000; Martínez *et al.*, 2011). La descomposición de la urea en el suelo se produce por medio de enzimas microbianas: primeramente se transforma en carbonato amónico y a continuación en amonio, el cual en la mayoría de los casos se transforma inmediatamente en nitrato (Finck, 1988).

3.5.2 Fertilizantes fosfatados

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para las plantas y los microorganismos, junto con el nitrógeno se encuentra en estado libre en la naturaleza porque se oxida muy fácilmente; sin embargo, son muy comunes los compuestos orgánicos y principalmente minerales que contienen fósforo; este a su vez puede ser un nutriente limitante, ya que es un componente de los ácidos nucleicos y de los fosfolípidos (Arias, 2014).

El fósforo del suelo se presenta casi exclusivamente como orto fosfatos derivados del ácido fosfórico, H_3PO_4 , Ca y Al. Los compuestos formados pueden encontrarse en forma de sales en solución, sales cristalinas o sales absorbidas por los coloides del suelo. El ion fosfato puede, además, ser directamente absorbido por los coloides del suelo o puede formar enlaces de gran estabilidad con los hidróxidos de Fe, Al o Mn que forman parte de los coloides del suelo. Estos últimos constituyen el "fósforo fijado" (Munera y Meza, 2018). En suelos básicos el fósforo se inactiva fácilmente en formas insolubles, por lo que suele encontrarse poco fósforo en forma activa. El fósforo activo es el fósforo que en teoría utilizan las plantas (Garrido, 1994).

Los abonos fosfatados (Finck, 1988), son productos químicos que contienen fósforo asimilable en forma de anión fosfato, o lo producen por transformación. Sánchez, (1988) menciona que las tres fuentes principales de fertilizantes fosfatados son:

- Fosfatos minerales o de rocas.
- Escorias básicas, subproducto del acero.
- Huesos, subproducto de la industria de la carne.

La respuesta de los cultivos a la aplicación de fertilizantes fosfatados depende del nivel de fósforo disponible en el suelo, además de otros factores del suelo, del cultivo y del manejo del fertilizante. Entre los factores del suelo se destacan la textura, la temperatura, el contenido de materia orgánica y el pH, mientras que los factores del cultivo deben mencionarse los requerimientos y el nivel de rendimiento que se desea obtener (García y Picone, 2007; Rojas, 2013).

La deficiencia de fósforo es el principal factor limitante de producción en los Oxisoles y Ultisoles. Estos suelos frecuentemente tienen la característica de fijar fuertemente el fósforo y requieren altas dosis de nutrientes para corregir la deficiencia (Fernandez *et al.*, 1995; Rojas, 2013).

La fertilización fosfatada constituye una solución para dos propósitos, por un lado se procura aumentar el contacto del fósforo con la raíz, y por otro lado, se busca disminuir la fijación del fósforo por el suelo (Malavolta, 1980; Rojas, 2013).

Cuadro 7. Principales fertilizantes fosfatados.

Nombre	Formula	Nutrimiento %	Índice salino	Índice básico	Índice ácido
Superfosfato simple	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	20	0.390	Neutro	
Superfosfato triple (SFT)	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	46	0.210	Neutro	
Fosfato monoamónico (MAP)		48	0.485		
Fosfato diamónico (DAP)		46	0.637		

Fuente SAGARPA, 2016.

El nombre superfosfato, proviene de los primeros tiempos del abonado mineral e indica la superioridad de este abono respecto de los fosfatos naturales. Los superfosfatos doble y triple indican riquezas doble y triple respectivamente. Los abonos fosfatados son productos poco puros desde el punto de vista químico, lo cual resulta ventajoso para el abonado ya que significa una aportación adicional (Finck, 1988).

3.6 Contaminación por fertilizantes

En la agricultura moderna altamente tecnificada es común el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos, destacando los nitrogenados, fosforados y potásicos.

Estos fertilizantes, al aplicarlos en dosis superiores a los requerimientos de los cultivos, conducen a una baja eficiencia en su utilización (menor al 50%) y a un impacto adverso en el ambiente (Keeney, 1982; Peña *et al.*, 2001), como la contaminación de la atmósfera (Ramanathan *et al.*, 1985), los suelos (Castellanos y Peña, 1990; Ubaldo, 2015).

Este uso excesivo de fertilizantes químicos también puede provocar desbalances nutricionales en los cultivos hortícolas y bajo rendimiento y calidad de los frutos cosechados (Maynard *et al.*, 1976; Engels y Marschner, 1995; Urbán, 2005).

Los fertilizantes pueden incluirse como contaminantes, en vista de que su adición al suelo modifica las características naturales y altera el estado normal de las tierras cultivadas, por lo tanto la contaminación ocurre si entre otros efectos, se degrada la calidad de la tierra (Nuñez, 1973; Apolinar, 1994).

Etchevers (1991) y Apolinar (1994) mencionan que el nitrógeno y el fósforo son los elementos relacionados con el deterioro ambiental, por ser los que con mayor frecuencia se adicionan y mantienen la capacidad productiva del suelo. Pero es el nitrógeno en su forma nítrica el que merece mayor cuidado, ya que, es más susceptible a transformaciones químicas y bioquímicas, a movilización en el perfil del suelo y a posibles pérdidas por volatilización y/o eluviación.

3.6.1 Contaminación por nitratos

El uso de fertilizante nitrogenado en exceso a los requerimientos de los cultivos provoca altas emisiones de NO_2 hacia la atmósfera y se deja sentir en el ambiente ya que es el causante de fenómenos como el smog o la lluvia ácida. El exceso de nitrógeno puede tener efectos tan devastadores como los gases de efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono (Boixadera y Cortés, 2000).

Los nitratos se pueden volver tóxicos en las plantas y afectar su calidad. Una concentración alta de nitratos en el agua y plantas consumidas por los animales de sangre caliente y por el hombre generalmente afectan su salud (Medina y Cano, 2001).

Debido al fuerte impacto que tiene la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de los cultivos, los agricultores de zonas altamente tecnificadas, donde aunado al mal manejo, se dan aplicaciones excesivas de fertilizantes. Es en estos lugares donde se generan los siguientes problemas:

- 1) Eutroficación de aguas superficiales.
- 2) Aumento de la concentración de nitratos en aguas freáticas.
- 3) Emisión de óxido nitroso a la atmósfera.
- 4) Acumulación de nitratos en plantas de consumo humano.
- 5) Acumulación en el suelo de metales pesados y otros (Apolinar, 1994).

La sobrefertilización con nitrógeno, además de ser asociada con niveles altos residuales de nitratos en el suelo y agua (que contribuyen a la contaminación),

también puede afectar adversamente la productividad y calidad de frutos. Es importante saber qué cantidad de fertilizante nitrogenado se debe aplicar, para no tener una sobrefertilización (Medina y Cano, 2001).

A la fecha las prácticas agrícolas en México y otras partes del mundo han tenido como objetivo maximizar los rendimientos de los cultivos, sin considerar el deterioro ambiental que se pudiera ocasionar por el uso desmedido de los insumos (Martínez *et al.*, 2011).

3.6.2 Contaminación por fosfatos

El fósforo es un elemento que no se mueve en el suelo. Así que cuando un agricultor fertiliza con fósforo, este se queda donde se coloca. Esto significa que no es lixiviado a comparación del nitrógeno. El fósforo se mantiene generalmente en la zona radicular. No se considera un riesgo para el medio ambiente a menos que sea movido junto con las partículas del suelo en el proceso de erosión (Lazcano, 1996).

Fernández (2011), menciona que en suelos alcalinos, el fósforo se precipita en forma de fosfatos de calcio, mientras que en suelos ácidos lo hace como fosfato de hierro (strengita) o de aluminio (variscita). El ión fosfato es adsorbido por diversos componentes del suelo, en particular óxidos y oxihidróxidos de hierro y aluminio y aluminosilicatos no cristalinos (alofanos).

El proceso de eutrofización del agua es una de las principales consecuencias de la contaminación de origen agrario; el fósforo es frecuentemente el factor limitante de este proceso en aguas continentales y su control es de máxima importancia para reducir la eutrofización de las aguas superficiales. El movimiento vertical hacia abajo del fósforo disuelto en el agua de percolación puede alcanzar el agua subterránea, particularmente cuando el nivel freático es elevado. La presencia de fósforo disuelto en el agua de drenaje del suelo es destacable en suelos sobrefertilizados, que han alcanzado elevados niveles de fósforo asimilable, o en suelos con baja capacidad de adsorción de fósforo. En la migración vertical en el suelo de fósforo disuelto juegan un papel importante los macroporos, como vías preferenciales para el movimiento de este nutriente (Fernández, 2011).

IV JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El suelo ha sido utilizado para depositar los residuos, incluyendo los que han sido removidos del aire y de la tierra. La mayor parte de los esfuerzos en cuanto a la protección ambiental se han abocado a limpiar el aire y el agua, sin embargo, no se deben descuidar los aspectos de contaminación del suelo, ya que amenazan no sólo a los usos futuros del mismo sino también la calidad de aire circundante, el agua superficial y el agua subterránea.

En México, la agricultura ocupa aproximadamente 20 millones de hectáreas, de las cuales en cinco millones se tiene establecido un modelo tecnológico intensivo dependiente del uso de agroquímicos para poder elevar los rendimientos (Apolinar, 1994).

La fertilización constituye uno de los principales factores que limitan la producción agrícola, pues los cultivos absorben sólo una fracción del fertilizante aplicado que oscila entre 10 y 60% (Peña *et al.*, 2001).

Durante los últimos años se han registrado problemas de contaminación de aguas freáticas y superficiales asociados al uso de fertilizantes. Hablar del uso de fertilizantes y contaminación nos lleva a considerar cuánto, cuándo, cómo y en qué forma debemos aplicar los agronutrientes químicos, puesto que no todos los nutrientes incorporados al suelo son absorbidos por la planta (FAO-ONU, 1986; Apolinar 1994).

La contaminación del suelo es el resultado de la aplicación directa de plaguicidas o fertilizantes en la tierra. El exceso de fertilizantes en la agricultura no es sólo un problema que afecta a la economía desde el punto de vista de adquisición de los mismos, sino también un problema que puede traer asociado desequilibrios en el suelo que perjudiquen su fertilidad además de provocar contaminación en el medio ambiente, donde las aguas utilizadas para el consumo humano, animal y vegetal pueden estar afectadas (Yepis *et al.*, 1999).

La importancia de los agronutrientes químicos en las explotaciones agrícolas, se refleja en el hecho de que más del 50% de las cosechas obtenidas actualmente

son atribuidas al uso de fertilizantes (Bifani, 1992; Lira y Trujillo, 1992; Apolinar 1994).

El nitrógeno y el fosforo son los elementos relacionados con el deterioro ambiental, por ser los que con mayor frecuencia se adicionan para reponer las cantidades absorbidas por las cosechas y mantener la capacidad productiva del suelo (Etchevers, 1991; Apolinar 1994).

En el caso del nitrógeno solo un 50% del nutrimento fertilizante es aprovechado, debido a los fenómenos de volatilización, el proceso de desnitrificación, la fijación laminar del ion amonio por las arcillas y la lixiviación del ion nitrato. El fosforo por su parte, experimenta reacciones con los componentes del suelo, produciéndose su fijación e inmovilización, hasta el punto en que únicamente un 25% a 30% está disponible para el cultivo (Jiménez, 1992; Apolinar, 1994).

El proceso de contaminación derivado de aplicaciones frecuentes o altos niveles de fertilización, puede manifestarse a futuro como salinización, basificación o acidificación del suelo (Apolinar, 1994).

V HIPÓTESIS

El mal manejo de fertilizantes inorgánicos conlleva a problemas de contaminación al suelo.

VI OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Determinar el nivel de contaminación del suelo por nitrógeno y fósforo en la zona agrícola de Tenosique, Tabasco.

6.2 Objetivos Específicos

- Realizar la clasificación textural de acuerdo al tipo de suelo del municipio de Tenosique, Tabasco.
- Determinar el nivel de nitrógeno y fósforo total del suelo de la zona agrícola en Tenosique, Tabasco.
- Realizar la clasificación de las muestras de suelo de acuerdo al contenido de nitrógeno y fósforo total.

VII METODOLOGÍA

7.1 Localización

Las muestras tomadas para el presente estudio fueron distribuidas en 6 puntos dentro del municipio de Tenosique, Tabasco.

Cuadro 8. Puntos de muestreo.

Muestra	Latitud Norte (N)	Latitud Oeste (W)
ST2	17.60367	-91.59294
ST4	17.446264	-91.514855
ST5	17.388646	-91.399741
ST6	17.340973	-91.295384
ST8	17.4155	-91.4278
ST9	17.4155	-91.411641

ST= Suelo Tenosique

Se procedió a tomar una muestra compuesta por 16 muestras simples. Lo anterior para garantizar la representatividad de la misma en el área de estudio. Las muestras fueron colectadas con una pala, y mezcladas sobre una superficie plástica que permitiera la homogenización de la muestra. Una vez que se tomó la muestra se depositó en bolsas transparentes de plástico y etiquetadas con clave de la muestra, fecha en que se tomó, lugar y nombre de la persona que realizó el muestreo. Se le coloca una nueva bolsa plástica negra para impedir la entrada de luz y descomposición de la misma. Además, ya con la muestra de suelo para

reforzar y evitar que haya escape del suelo sustraído, por último se colocan en una hielera para su almacenamiento.

Es importante mencionar que la recolección de las muestras fue en el mes de Junio en temporada de lluvias.

7.2 Textura del suelo

La mayoría de los suelos poseen partículas coloidales, tanto orgánicas como inorgánicas, cargadas negativamente, con lo que repelerán a los aniones, y como consecuencia estos suelos lixiviarán con facilidad. La textura de los suelos es un factor importante en relación con la lixiviación. Cuanto más fina sea la textura, más capacidad de retención presentarán (Martínez *et al.*, 2011).

La textura es la composición granulométrica de un suelo, se refiere al porcentaje de las distintas fracciones minerales que las componen. Las fracciones más gruesas pueden separarse mediante tamizado, pero no así la fracción correspondiente a las arcillas. Para determinar el contenido en arcillas se emplean dos métodos: el del densímetro de Bouyoucos, y el de la pipeta. Ambos se basan en la ecuación de Stokes que relaciona el tamaño de las partículas con el tiempo de caída en una solución acuosa (Moros, 2008).

En el método del densímetro, se prepara una suspensión acuosa de suelo en la que el metafosfato sódico se emplea como agente dispersante de los agregados del suelo. Se mide la densidad de la suspensión a diferentes tiempos. Los resultados se comparan con una tabla que relaciona porcentaje acumulado de partículas a diferentes tiempos con diámetro de partícula (Moros, 2008).

Para el presente estudio se procedió a la determinación de la textura del suelo por el procedimiento de Bouyoucos a través del método AS-09 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. En el presente método se elimina la agregación debida a materia orgánica y la floculación debida a los cationes de calcio y magnesio. No se eliminan otros cementantes como carbonatos.

Se pesó 50 gr de suelo en la balanza granataria AE ADAM PW124, en vasos de precipitado de 250 ml, posteriormente se dan ataques con 40 ml de peróxido de

sodio al 30%, se espera hasta sequedad aproximadamente 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo se da un segundo ataque, la NOM-021-SEMARNAT-2000 menciona que por lo regular dos ataques son necesarios para eliminar la materia orgánica.

Cuando la muestra se encuentra totalmente seca después de dos ataques con peróxido se colocan en vasos de 250 ml y se agrega una alícuota de 10 ml de hexametáfosfato de sodio y se deja reposar durante 15 minutos.

Las muestras pasan a una licuadora ya que necesitan estar en agitación mecánica, y se dejan licuar durante 5 minutos. Al finalizar el tiempo de agitación, se vació el contenido en una probeta de 1000 ml limpiando la licuadora con una piseta para evitar que queden restos de suelo. Se agregó agua destilada hasta completar un litro en la probeta. Una vez aforado se procede a suspender el suelo con agitación manual operando durante un minuto.

El tiempo de lectura se ha escogido de 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetro mayores de 0.002 mm (limo y arena). Estos límites han sido establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos y se han usado para construir el triángulo de texturas. Se debe procurar que al momento de hacer la lectura no haya una alteración en la suspensión.

Una vez finalizada la determinación de las muestras se procede a hacer los cálculos correspondientes para determinar la textura del suelo. Es importante mencionar que siguiendo el procedimiento de la norma se deben realizar las correcciones por temperatura (ANEXOS) según sea el caso en las lecturas del hidrómetro de acuerdo a la temperatura, agregando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5°C restando la misma cantidad por cada grado debajo de dicha temperatura.

La lectura a los 40 segundos se multiplica por 2, esto es igual al porcentaje de arcilla más el limo. Restándole 100 se obtiene el porcentaje de arena. La lectura obtenida a las 2 horas multiplicadas por 2 es igual al porcentaje de arcilla. El

porcentaje de limo se obtiene por diferencia. Una vez que se obtiene el porcentaje de limo, arena y arcilla se determina la textura correspondiente con el triángulo de texturas (ANEXOS).

Con el resultado obtenido del triángulo de texturas procede a la interpretación en la nomenclatura del suelo según lo indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (ANEXOS).

7.3 Fósforo Total

Existen diferentes métodos para medir el fósforo en el suelo. Cada uno de estos puede variar dependiendo de los objetivos del estudio, de la muestra y sus propiedades, la precisión necesaria y las facilidades que se tengan en el laboratorio. En 1945, Bray y Kurtz proponen un método rápido para estimar las formas de fosforo disponible para las plantas y consiste en la extracción con una solución de NH_4F 0.03 N y HCl 0.1 N que se basa en el efecto de disolver algunos fosfatos de calcio y una parte de fosfato de hierro y aluminio; en solución ácida el NH_4F disuelve los fosfatos de hierro y aluminio por medio de la formación de complejos con el ion fluoruro (Arias, 2014). Para la determinación de fósforo total en los suelos de Tenosique se implementó el método de Bray II para la extracción del fosforo, el cual disuelve fácilmente algunos fosfatos por medio de la formación de complejos con el ion fluoruro. Con el fin de incluir una mayor cantidad de fósforo proveniente de la apatita del suelo (Arias, 2014).

La determinación total del fósforo se estableció de acuerdo con la norma NMX-AA-029-SCFI-2001 la cual establece dos métodos para determinar fósforo total en aguas residuales, naturales y residuales tratadas. El método a utilizar de acuerdo a la norma es el método de ácido vanadomolibdofosfórico, la cual es una solución diluida de ortofosfatos, el molibdato de amonio reacciona con el vanadato para formar el ácido el cual se torna de un color amarillo al efectuar la reacción.

Se pesaron 2.85 gr de suelo en la balanza granataria AE ADAM PW124, esta cantidad se diluye con 20 ml de la solución de Bray II en agitación manual durante 40 segundos, posteriormente se filtran y se añade una alícuota de 18 ml a un

matraz aforado de 50 ml junto con 10 ml de la solución colorimétrica, se afora y homogeneiza. Pasando 30 min se hace la lectura colocando el extracto en una celda de cuarzo de 1 cm² y este se coloca dentro del espectrofotómetro Rayleigh VIS-7220G a una longitud de onda de 470 nm.

Curva de Calibración. Entre las características definidas para un método analítico está su linealidad, definida como la habilidad de un método analítico para entregar resultados proporcionales a la concentración de un analito en un rango específico. Solo algunas veces, los procedimientos analíticos propuestos llegan a proponer los datos de una curva de calibración típica, pero en todos los casos la información es suficiente para definir las concentraciones de las soluciones a preparar para obtener la curva de calibración (Camacho, 2008; Arias, 2014).

Un primer objetivo en la implementación y validación de un método analítico es verificar el comportamiento del sistema en el laboratorio propio, para ello se construye una curva de calibración con un mínimo de cinco puntos, para un intervalo de confianza del 95%, un óptimo de siete puntos, para un intervalo de confianza del 95%, y un máximo de ocho puntos, para un intervalo de confianza del 99%. La validación y revalidación, por lo tanto de una curva de calibración tan estricta como la descrita, se lleva a cabo durante la implementación del método o cuando alguna condición analítica cambia, o dependiendo de los requerimientos y condiciones del método (Arias, 2014).

Para nuestra curva de calibración se toma una alícuota que contenga de 0.1 a 1.0 mg de fósforo a un matraz volumétrico de 50 ml. Se añade 10 ml del reactivo de molibdato de amonio-vanadato molibdato. Mezclar y diluir dejando en reposo durante 30 minutos para su posterior lectura de densidad de color a una longitud de onda de 470 nm en el espectrofotómetro.

Se determina el fósforo gracias a la curva de calibración preparada a partir de estándares recomendados. Se toman alícuotas de 0, 5, 10, 15, 20 ml de la solución estándar de fósforo de 50 ppm y se esperan 30 minutos para desarrollo de color.

Para los resultados de contenido total en fósforo se realiza con la siguiente ecuación según la NOM-021-SEMARNAT-2000:

$$P \text{ (mg Kg}^{-1} \text{ de suelo)} = CC \times V_f / A \times V_i / p$$

Donde:

CC: mg L⁻¹ de P en la solución.

V_f: volumen final de la solución colorimétrica, ml.

A: alícuota del extracto usado colorimetría, ml.

V_i: volumen de la solución empleada para hacer el extracto, ml.

p: peso de la muestra seca al aire.

7.4 Nitrógeno total

El nitrógeno total en los suelos variará de 0.01 por ciento a varias unidades por ciento. Sin embargo, la gama habitual en suelos que no sean turbosos ni abonados con estiércol, va de 0.05 a 0.30 por ciento de nitrógeno. En las plantas, los valores irán comúnmente de 0.2 a 4.0 por ciento, dependiendo de las especies, la parte de la planta y su edad.

El método empleado para a determinación de nitrógeno total es modificado según el equipo a emplear y las variaciones que este tenga.

Para la determinación de nitrógeno se pesaron proporciones de suelo de 1 gr en el quipo AE ADAM PW124, para comparar la cantidad de nitrógeno y si este variaba, una vez pesados se introducen en los tubos del sistema compacto de digestión Trade Raypa MMB/2 de micro Kjeldahl, junto con 2 gr de catalizador de Sulfato de Potasio (K₂SO₄) con Sulfato de Cobre Pentahidratado (CuSO₄ 5H₂O) y por último se añade 5 ml de Ácido Sulfúrico concentrado.

Una vez que se tienen preparados los tubos se lleva al proceso de digestión a una temperatura inicial de 21°C, conforme pase el tiempo la temperatura en el digestor se elevará hasta alcanzar una temperatura final de 400°C. Este proceso tiene un

tiempo aproximado de duración de 2 horas con 30 minutos en el equipo Trade Raypa MMB/2 micro Kjeldahl.

Cuando finaliza el proceso de digestión se lleva uno por uno los tubos a la unidad de destilación Trade Raypa DNP/1500MP de micro Kjeldahl. En este proceso, el equipo de destilación se debe mantener frío ya que a una temperatura elevada puede reventar los tubos. Se colocan los tubos dentro del equipo junto con un matraz previamente preparado con ácido bórico al 4% y una mezcla de indicadores de verde de bromocresol y rojo de metilo, se añade la opción de destilación, el equipo automáticamente añade 25 ml de Hidróxido de sodio (NaOH) al 40% y 25 ml de agua destilada al tubo. Este proceso dura 5 minutos en destilar la cantidad de 100 ml.

Al finalizar el proceso de digestión se hace la titulación con ácido clorhídrico 0.1N hasta obtener un vire en la solución contenida en el matraz.

Para calcular el porcentaje de nitrógeno se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% N = \frac{ml \text{ ácido} \times N \text{ del ácido} \times Meq_N (0.014) \times 100}{\text{peso de la muestra (en gramos)}}$$

Dónde:

ml ácido: representa los mililitros gastados en la titulación.

N: es la normalidad del ácido clorhídrico.

Meq_N: son los miliequivalentes del nitrógeno.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Textura del Suelo

El siguiente cuadro nos permite interpretar los resultados obtenidos para así determinar el tipo de suelo que predomina en las muestras de suelo de la zona de Tenosique, Tabasco.

Cuadro 9. Interpretación de resultados tipo de suelos.

Clave	Clase de textura
R	Arcillosa
RI	Arcillo limosa
Ra	Arcillo arenosa
Cr	Franco arcillosa
CrI	Franco arcillo limosa
Cra	Franco arcillo arenosa
C	Francosas
CI	Franco limosa
L	Limosa
Ca	Franco arenosa
Ac	Areno francosa
A	Arenosa

Fuente SEMARNAT, 2002

El cuadro 9 presenta los resultados del porcentaje en arena, arcilla y limo así como la nomenclatura resultante acorde al triángulo de texturas. Para cada nomenclatura corresponde una clave.

Cuadro 10. Resultados clase textural dominante en muestras de suelo de Tenosique.

N° de Muestra	Clave de Muestra	Arena %	Arcilla %	Limo %	Nomenclatura del Suelo	Clasificación Textural
1	ST2	81.3%	10.15%	8.55%	Franco Arenoso	Ca
2	ST4	42.94%	34.34%	22.72%	Franco arcilloso	Cr
3	ST5	37.3%	28.34%	34.36%	Franco arcilloso	Cr
4	ST6	37.3%	47.15%	15.55%	Arcilloso	R
5	ST8	24.94%	26.34%	48.72%	Francosas	C
6	ST9	25.3%	44.34%	30.36%	Arcilloso	R

El resultado en arena, limo y arcilla, indican que el predominante en las muestras es arena, con un 81.3% el cual se encuentra en la muestra ST2, el predominante de arcilla se encuentra en muestra ST6 con un porcentaje de 47.15% y el limo predomina en la muestra ST8 con un 48.72%. Los porcentajes más bajos en arena se encuentran en la muestra ST8, arcilla ST8 y limo ST6.

Al comparar los resultados, podemos destacar que predominan los suelos Francos-Arenosos-Arcillosos.

Nuestros resultados coinciden con los resultados mencionados por Alquino-Bravata (2010), de acuerdo a la clave del suelo, nos indica que del total de nuestras 6 muestras analizadas predominan los Chernozem y Regosoles.

Podemos recordar que los Regosoles constituyen el segundo tipo de suelo más importante en México, ya que representan gran parte de nuestro territorio, son suelos que se caracterizan por su profundidad, pedregosidad y fertilidad; por otra parte, los Chernozem se caracterizan por ser ricos en materia orgánica, por su buena profundidad y fertilidad. Mientras los regosoles están sujetos a zonas áridas, los chernozem están ubicados en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos lo cual es característico del estado de Tabasco.

8.2 Fósforo total

Para la determinación del análisis del fósforo total fue necesario realizar la curva de calibración como se describe en el apartado de la metodología, la cual en la figura 6 se presenta el resultado.

Curva de calibración

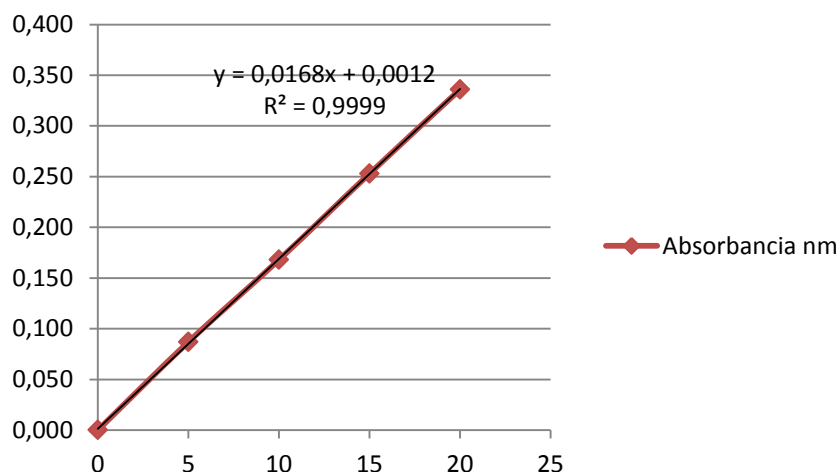


Figura 6. Curva de calibración de la solución vanadato-molibdato.

La curva de calibración resultante de la solución molibdato de amonio-vanadato de amonio, se obtuvo un resultado en coeficiente de correlación lineal deseado ya que el resultado de este fue 0.9999 lo que nos indica que nuestros resultados no están sujetos a errores.

Una vez que se determinó que no existe ningún error con nuestra solución y al haber obtenido un resultado ideal en la curva de calibración, se deriva a la lectura de nuestras muestras en el espectrofotómetro y posteriormente al cálculo de las concentraciones de P en los filtrados de las muestras y de nuestro blanco por medio de la resolución de la ecuación de regresión, obteniendo los siguientes resultados.

Cuadro 11. Resultado de fósforo total.

Muestra	Absorbancia	Concentración de P	mg kg ⁻¹ de P
ST2	0.019	1.06	4.94
ST4	0.031	1.78	8.32
ST5	0.074	4.34	20.30
ST6	0.060	3.48	16.26
ST8	0.106	6.25	29.23
ST9	0.018	1.00	4.67

Los resultados obtenidos para los suelos ST2, ST4 y ST9 representan un porcentaje mínimo de fósforo total en el suelo, mientras que ST5, ST6 y ST8 presentan índices más altos de la concentración en el suelo.

8.2.1 Clasificación

El siguiente cuadro muestra el rango en el que se encuentra el fósforo total en el suelo.

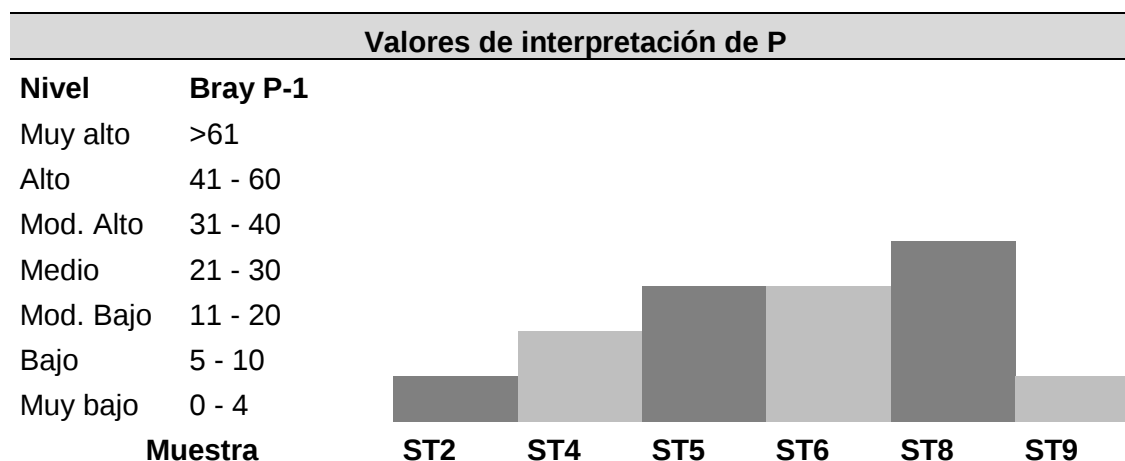
Cuadro 12. Valores de interpretación de fósforo total

Nivel	Bray P-1
Muy bajo	0 – 4
Bajo	5 – 10
Moderadamente bajo	11 – 20
Medio	21 – 30
Moderadamente alto	31 – 40
Alto	41 – 60
Muy alto	> 60

Fuente: Fertilab, 2018; SEMARNAT, 2002.

Los resultados obtenidos de fósforo total se muestran en el cuadro 11, los cuales al comparar con los rangos que indica el cuadro 12 de acuerdo a la norma oficial, podemos observar que la mayoría de las muestras se encuentran por debajo del nivel medio total de fósforo en el suelo, mientras que la muestra ST8 con un mayor índice, se encuentra dentro de la media.

Cuadro 13 Interpretación porcentaje total de fósforo en suelo.



Los resultados obtenidos en cuanto a cada una de las muestras podría deberse a que en su mayoría existe un suelo franco el cual presenta características óptimas para los cultivos, ya que es poco permeable, rico en nutrientes y materia orgánica. Es importante mencionar que los resultados varían dependiendo el tipo de suelo, ya que el fósforo tiene una movilidad diferente en cada uno; también interviene el tipo de cultivo presente en la zona; factores climáticos como la precipitación debido a que este macronutriente se puede llegar a perder por lixiviación.

8.3 Nitrógeno Total

Cuadro 14. Resultados de nitrógeno total en suelos de Tenosique.

Clave de la muestra	% total de N
ST2	0.05
ST4	0.12
ST5	0.11
ST6	0.18
ST8	0.05
ST9	0.34

Los resultados obtenidos en porcentaje total de nitrógeno nos indica la muestra de suelo donde se presenta un mayor índice de nitrógeno, así como menor presencia de este en los diferentes puntos de muestreo. Estos resultados se clasifican conforme a la los rangos de porcentaje total en suelo que indica la norma oficial.

8.3.1 Clasificación

El rango de porcentaje total presente en los suelos se indica en el siguiente cuadro:

Cuadro 15. Valores de interpretación Nitrógeno total.

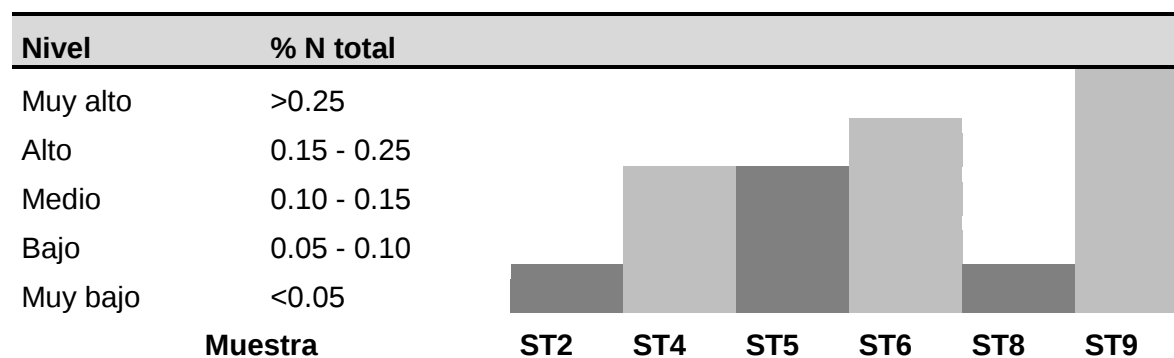
Clase	Nitrógeno total
Muy bajo	<0.05
Bajo	0.05 – 0.10
Medio	0.10 – 0.15
Alto	0.15 – 0.25
Muy alto	> 0.25

Fuente SEMARNAT, 2002

De acuerdo a los resultados obtenidos (cuadro 14) y conforme a lo indicado en el cuadro 15, podemos determinar que el resultado en porcentaje de nuestras muestras ST2 y ST8 es de un porcentaje total en nitrógeno muy bajo, mientras en las muestras ST4 y ST5 se encuentran dentro del rango medio de nitrógeno total.

Es importante mencionar que estas muestras presentan una textura franco-arenoso y arcillosa. Garrido (1994), menciona que las pérdidas por lavado pueden ser muy elevadas en suelos arenosos (más del 50%), llegando a minimizarse en suelos muy arcillosos.

Cuadro 16. Interpretación de Nitrógeno total en suelos de Tenosique.



Por otro lado nuestra muestra ST6 presenta un alto porcentaje de nitrógeno mientras que la muestra ST9 presenta un porcentaje muy alto de nitrógeno. La textura del suelo es un factor importante en relación con la lixiviación; el resultado obtenido en la muestra ST9 podría deberse a que las características de este suelo son arcillosas, recordemos que este tipo de suelo son pesados y no drenan el flujo de agua fácilmente.

Existen varios factores que intervienen para que exista una disponibilidad de estos elementos en el suelo, el hecho de que se encuentren sobre o debajo del índice medio puede deberse a los tipos de cultivo que se encuentran en cada una de las zonas de donde se sustrajo la muestra de suelo. El contenido total de un nutriente en el suelo no da idea de la cantidad que está disponible en la planta, ya que los cultivos presentes pudieron haber absorbida en buena cantidad una parte del nitrógeno.

También es importante recalcar, como ya se menciono en los resultados de fósforo, otro factor importante y que puede intervenir en la interpretación de los resultados para cada uno de los nutrientes es la precipitación, debido a que las muestras fueron tomadas en periodo de junio y como se menciono al inicio de la investigación, Tenosique se caracteriza por tener un índice de precipitación abundante en esta temporada.

IX CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conforme la población va en aumento incrementa la demanda de alimentos y esto implica más cultivos y un mayor uso de fertilizantes, pero esto equivale a estar cada vez más cerca de una catástrofe ambiental.

El exceso de fertilizantes no solo contamina el suelo y el agua, sino que también se envía más óxido nitroso a la atmosfera, lo cual nos afecta a los seres humanos. Es por esto que es importante determinar los niveles totales en el suelo de estos fertilizantes.

A partir de los resultados obtenidos podemos determinar que del 100% de las muestras de suelo analizado, un 50% presenta un índice elevado en porcentaje de fertilizantes inorgánicos en lo que se refiere a nitrógeno y lo que indica presencia de contaminación en estas zonas. En lo que se refiere a fósforo total, existe presencia de este pero sin un riesgo, ya que se encuentra por debajo de la media del rango establecido por la norma. Estos resultados no significan que en las demás zonas de estudio no haya presencia de contaminantes, ya que como se mencionó a lo largo del presente trabajo, los fertilizantes llegan a lixiviarse o volatilizarse, de esto también depende el tipo de suelo de cada zona, lo cual implica que podría haber presencia de nitratos en el agua del río Usumacinta.

Sería importante, para evitar que estos suelos se sigan degradando y en un futuro esto conlleve a mayores problemas ambientales, concientizar a los ejidatarios de la zona y en especial a los productores que siembran sus cultivos en los puntos de estudio, que obtén por nuevos métodos de fertilización, ya que como bien se sabe

existen biofertilizantes o compost que son amigables con el ambiente. Otra opción amigable al medio ambiente es el uso de micorrizas, ya que estas ayudan a la planta en el crecimiento y obtener los nutrientes que esta necesita.

También es fundamental que se promueva a un cambio en el manejo de los fertilizantes en el municipio de Tenosique ya que la actividad agrícola es el principal sustento para las familias de este municipio y de este depende la economía.

X REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEMA. (2002). Agencia Europea de Medio Ambiente - PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). Con los pies en la tierra: la degradación del suelo y el desarrollo sostenible en Europa: Un desafío para el siglo XXI. Problemas medioambientales, No. 16, 34p.

Apolinar, B. (1994). Tópicos selectos de la producción agrícola actual la contaminación del suelo por uso excesivo de fertilizantes (N-P-K). Cuautitlan Izcalli, Estado de México.

Aquino-Bravata, V. (2010). Uso actual de los suelos de Tenosique, Tabasco. Colegio de Postgraduados, 34(1), 741–746. Disponible en: http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/256/Sanchez_Borja_M_DC_Fitosanidad_2010.pdf?sequence=1

Arellano, J. (2002). Introducción a la Ingeniería Ambiental. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Arias, L. (2014). Estandarización de una metodología para la medición de fosfatos por el método fotométrico en muestras de suelos en el centro integral de diagnóstico agropecuario de Risaralda (CIDAR). Universidad Tecnológica de Pereira, 78.

Boixadera, J., Cortés, A. (2000). Nitratos, agua y agricultura, un problema moderno de utilización del suelo. Horticultura.

Brady, N., Weil, R. (2008). The nature and properties of soils: New Jersey, Prentice Hall, 975pp.

Castellanos R., J. Z. (1981). La contaminación del agua por nitratos provenientes de la agricultura CIAN-INIA-SARH Seminarios Técnicos. Comarca Lagunera. 6(9): 139-158..

Cepeda, J. (2003). Efectos sobre la salud de los contaminantes químicos ambientales. Universidad del Norte. Buenos Aires. Disponible en: http://www.uninorte.edu.co/extensiones/IDS/Ponencias/salud_y_ambiente/Contaminacion%20quimica.pdf.

Cepeda, J. (2010). Historia de la fertilidad de suelos. UASD.

Cerón, L. E., Aristizábal, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos Nitrogen and phosphorus cycles dynamics in soils, 285–295.

Conway, G. R., Pretty, J.N. (1991). Unwelcome Harvest: Agriculture and Pollution. London: Eartscan Publications Ltd pp. 672.

De las Salas, G. (1987). Suelos y ecosistemas forestales. San José-Costa Rica. Disponible en: http://books.google.com/books?hl=es&lr=lang_es&id=hC4Fdd-LhNsC&oi=fnd&pg=PR1&dq=fósforo+en+%0Ael+sistema+suelo-+planta&ots=yDeNwkcf-w&sig=9kg0v2blj2anget4cA7CWAH5%0Acdg#v=onepage&q=f%25C3%25B3sforo%2520en%2520el%2520sistema%2520suelo-%2520planta%0A

Drury, C., Yang, J., Jong, R., Yang, X., Huffman, E., Kirkwood, V., Reid, K. (2014). Residual soil nitrogen indicator for agricultural land in Canada: Soil Sen, 226, 167-177.

Etchevers, J. (1991). El papel de los fertilizantes en la agricultura sostenible. EN: Memorias del Primer Simposium Nacional de Agricultura Sostenible: Una opción para el desarrollo sin deterioro ambiental. Colegio de Postgraduados, Montesillos, México. pp. 309-320.

FAO. (2015). Agricultura mundial : hacia los años 2015 / 2030 Informe resumido.

FAO-PNUMA (1983). Directrices para el control de la degradación de los suelos. Roma. 43 págs.

Fernández, M. (2008). Fertilizantes y contaminantes, un círculo vicioso. http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/naturaleza/2008/04/02/175872.php

Fernández, M.L. (2011). Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Santiago de Compostela. <https://www.researchgate.net/publication/230688083>

Fertilab. (2018). <https://www.fertilab.com.mx/analisis-de-suelos>

Finck, A. (1988). Fertilizantes y fertilización. Fundamentos y métodos para la fertilización de los cultivos. (S. A. EDITORIAL REVERTÉ, Ed.). Barcelona, España. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=IL8KcUQAQ0C&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=true>

Gaiak, E. (2007). Fertilizantes de plantas, esterilizantes de suelos. Agricultura Y Contaminación. Gara. Disponible en: <http://gara.naiz.eus/paperezkoa/20071014/43003/es/Fertilizantes-plantas-esterilizantes-tierras>

Garrido, S. (1994). Interpretación de análisis de suelos. In Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (p. 40). Madrid: Rivadeneyra, S.A.

Graham, J., Miller, R. (2005). Mycorrhizas: gene to function. Plant and Soil, 274, 74–100.

Hernández, O., Ojeda, D., López, J., Arras, A. (2010). Abonos orgánicos y su efecto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México. TECNOCENCIA, Chihuahua. Vol. IV, No. 1.

IASSTD (2008). <http://www.unep.org/dewa/Assessments/Ecosystems/IAASTD/tabid/105853/Default.aspx>

Idriss, E. E; Makarewicz, O; Farouk, A; Rosner, K; Greiner, R; Bochow, H; Borris, R. (2002). Extracellular phytase activity of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB45 contributes to its plants growth promoting effect (Vol. 148).

INEGI. (2001). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tenosique, Tabasco. Clave geoestadística 27017.

INEGI. (2004). Guía para la interpretación de Cartografía Edafología. En Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (pp. 11–24). Aguascalientes, Ags. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>

INEGI. (2014). Censos Económicos. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ce/ce2014/default.aspx>

IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

Juárez, E., & Rico, A. (1973). Mecánica de Suelos, Tomo I. México.

Lazcano, I. (1991). Informaciones Agronómicas. Instituto de la potasa y el fósforo A.C. México y Norte de Centroamérica. Vol. 1 No.6. pp. 10-11.

Lim, B. L., Yeung, P., Cheng, C., & Hill, J. E. (2007). Distribution and diversity of phytate-mineralizing bacteria. The ISME Journal, 1, 321–330.

López, S. (2017). Uso de fertilizantes nitrogenados en la cuenca del río grande de Comitán, ¿La lixiviación representa un problema ambiental? CDMX.

Martínez, F., Ojeda, D., Hernández, A., Martínez, J., & De la O, G. (2011). El exceso de nitratos: un problema actual en la agricultura. Universidad Autónoma de Chihuahua, 11–16. Disponible en: http://www.uach.mx/extension_y_difusion/synthesis/2011/08/18/el_exceso_de_nitratos_un_problema_actual_en_la_agricultura.pdf

Martínez, R., Dibut, B., & Ríos, Y. (2010). Efecto de la integración de aplicaciones agrícolas de biofertilizantes y fertilizantes minerales sobre las relaciones suelo-planta. Scielo, 31(0258–5936). Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362010000300009

McGuinness, H. (1993). Living soils: sustainable alternatives to chemical fertilizers for developing countries. Unpublished manuscript, Consumers Policy Institute, New York.

Medina, Ma., Cano, P. (2001). Contaminación por nitratos en agua, suelo y cultivos en la comarca lagunera. Torreón Coahuila, México. Revista Chapingo, Serie Zonas Aridas 2(1): 9-14.

Moros, P. (2008). Suelos contaminados. Trabajo de laboratorio. EOI. Escuela de Negocios.

Munera, G., & Meza, D. (2018). El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. Universidad Tecnológica de Pereira.

Núñez, R. (1973). El uso de fertilizantes y la contaminación del medio ambiente. EN: Memoria I Reunión Nacional Sobre Problemas de Contaminación Ambiental (Tomo II). Edit. Dir. Gral. Planeación, Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, S.S.A. Enero de 1973. México, D.F. pp. 1019-1025.

Palma-López, D. J., Cisneros Domínguez, J., Moreno Cáliz, E., Rincón Ramírez, J. A. (2007). Suelos de Tabasco: Su uso y manejo sustentable. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/David_Palma3/publication/293958380_Suelos_de_Tabasco_Su_Uso_y_Manejo_Sustentable/links/56bcfac008ae6cc737c6bdb3/Suelos-de-Tabasco-Su-Uso-y-Manejo-Sustentable.pdf

Palma-López, D. J., Triano-Sánchez, A. (2007). Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. II. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México

Peña, J., Grageda, O., Vera, J. (2001). Manejo De Los Fertilizantes Nitrogenados En México: Uso De Las Técnicas Isotópicas (^{15}N). Terra, 20, 51–56.

Pérez, A., Landeros, C. (2009). Agricultura y deterioro ambiental. Vol. 16 No. 73: p 19.

Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tenosique de Pino Suarez. (2017). Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Ordenamiento Territorial y Obras Públicas. Ayuntamiento de Tenosique.

Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente (3a Edición). Madrid-Barcelona-México: Mundi-Prensa.

Ramanathan, V., R.J. Cicerone., H.B. Singh and Kiehl. (1985) Trace gas trends and their potential role in climate change. J. Geophys. Res. 90:5547-5566.

Richardson, A. E., Simpson, R. J. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. Plant Physiology, 156(3), 989–996. **<https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>**

Rojas, A. (2013). Aplicación de diferentes fuentes y dosis de fertilizantes fosfatados en el cultivo de soja. Universidad Nacional de Asunción.

Rueda, E., Ortega, J., Barrón, J., López, J., Murillo, B., Hernández, L., Alvarado, A., Valdez, R. (2015). Los fertilizantes biológicos en la agricultura. Universidad de Sonora, Unidad Regional Norte. INVURNUS Volumen 10 No. 1: 10-17

SAGARPA. (2016). Uso de fertilizantes. Secretaría de Desarrollo Rural, 11. Disponible en: **<http://www.sagarpa.gob.mx/>**

Sanchez, C. (1988). Métodos de análisis de fertilizantes fosfatados. México, D.F.

SEDESPA. (2006). Programa de ordenamiento ecológico del estado de Tabasco. Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente. Gobierno del Estado de Tabasco.

SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana Nom-021-Semarnat-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de La Federación, 85.

Silva, S., Correa, F. (2009). Análisis de la Contaminación del Suelo: Revisión de la Normativa y Posibilidades de la Regulación Económica. Semestre Económico, (23), 13–34.

Sinergia. (2006). Producción Respetuosa en Viticultura-Impactos Ambientales en Agricultura. Proyecto Life Sinergia, 1–11. Disponible en: **http://www.lifesinergia.org/formacion/curso/03_impactos_ambientales_en_agr.pdf**

Stevenson, F.J., Cole, M.A. (1999). Phosphorus. En: Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorous, Sulfur, Microbutrients. John Wiley & Sons, Inc. New York. p 279-329.

Turner, B. L., Papházy, M. J., Haygarth, P. M., McKelvie, I. D. (2002). Inositol phosphates in the environment. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 357(1420), 449–469.

Ubaldo, G. (2015). Efecto de la adición de algas marinas en las características de tres suelos y la producción de CO₂. Saltillo, Coahuila.

Urbán, G. (2005). Fertilizantes químicos en México (1843-1914). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Vallejo, A. (2011). Formulación del Proyecto Comunal de forestación y reforestación de la parroquia San José de Angochagua, Cantón Ibarra, Provincia de Imbabura. Universidad Técnica del Norte. Disponible en: **[http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/808/4/03 FOR 184 TESIS FINAL.pdf](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/808/4/03%20FOR%20184%20TESIS%20FINAL.pdf)**

Taylor, D. (1961). Principios fundamentales de Mecánica de Suelos. (S. A. Compañía Editorial Continental, Ed.). México, D.F.

Yepis, O., Fundora, O., Pereira, C., Crespo, T. (1999). La contaminación ambiental por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados en el cultivo del tomate. *SCIENTIA Gerundensis*, (24), 5–12.

Zavala, C.J., Castillo, A.O., Ortiz, C.A., Palma, D.J., Rincon, R., Moreno, C., Salgado, G. (2006). Base geográfica digital de suelos urbanos de la ciudad de Cárdenas, Comalcalco, Huimanguillo, Macuspana, Paraíso, Teapa, Tenosique y Villahermosa. H. Cárdenas Tabasco. Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco, Secretaria de Comunicaciones Asentamiento y Obras públicas. Informe Final Julio 2006. 359 pp.

XI ANEXOS

Cuadro 17. Corrección por temperatura.

TEMPERATURA °C	CORRECCIÓN	TEMPERATURA °C	CORRECCIÓN
15.0	- 1.62	21.5	+ 0.18
15.5	- 1.44	22.0	+ 0.90
16.0	- 1.26	22.5	+ 1.08
16.5	- 1.08	23.0	+ 1.26
17.0	- 0.90	23.5	+ 1.44
17.5	- 0.72	24.0	+ 1.62
18.0	- 0.54	24.5	+ 1.80
18.5	- 0.36	25.0	+ 1.98
19.0	- 0.18	25.5	+ 2.15
19.5	- 0	26.0	+ 2.34
20.0	+ 0.18	26.5	+ 2.52
20.5	+ 0.36	27.0	+ 2.70
21.0	+ 0.54	27.5	+ 2.858
		28.0	+ 3.06

Fuente SEMARNAT, 2002

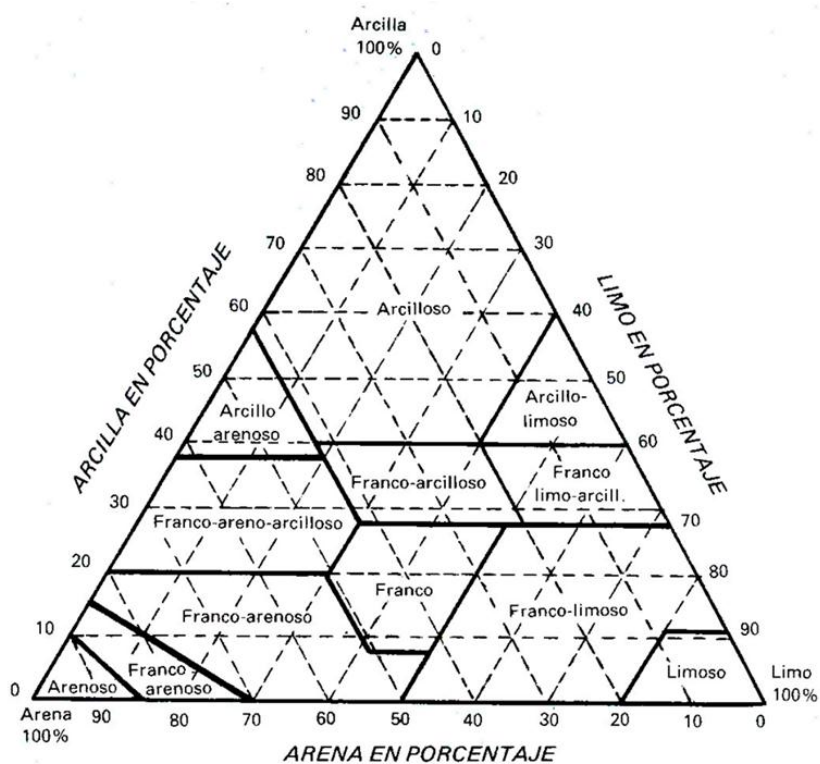


Figura 7. Triángulo de texturas.

Fuente SEMARNAT, 2002