



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE  
MEXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**“Fósforo total en sedimentos de Laguna Grande, Veracruz (2016-2017)”**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**BIÓLOGO**

Presenta

**Julio Buendía Díaz**

Director de tesis

**M. en C Ernesto Mendoza Vallejo**

Asesora

**M. en C Catalina Machuca Rodríguez**

Apoyado por Proyecto PAPIME  
PE208318

Ciudad de México, junio 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

*“Sabemos que el sufrimiento produce perseverancia; la perseverancia, entereza de carácter, la entereza de carácter, esperanza.”*

*Romanos 5:3-4*

*“El perseverar hasta el final es un proceso que ocupa cada minuto de la vida, cada hora y cada día, de amanecer a amanecer. Se logra al seguir los mandamientos de dios por medio de la disciplina personal.”*

*Dieter F. Uchtdorf*

*“A Son Never Forgets”*

## **Agradecimientos**

Gracias a YAHWEH por darme vida, salud y por bendecir todos mis días con cada una de las personas a mi alrededor.

A la FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA mi segunda casa, la cual me dio las herramientas necesarias para afrontar el mundo laboral.

Mi mentor y amigo Ernesto Mendoza Vallejo, por ser paciente conmigo y mostrarme la calidad de persona que es, además de exponer lo que significa ser un excelente profesor.

A mi asesora Catalina Machuca Rodríguez, pues es una persona valiosa y le agradezco profundamente los comentarios muy acertados que realizo, pues me ayudaron a mejorar como estudiante.

A la memoria del señor Juan Obeso Orozco un tío, padre, hermano y un mejor amigo. Aunque la vida decidió separarte de mi lado y no pueda compartir este logro contigo quiero que sepas que te estoy eternamente agradecido, por lo poco o mucho que compartiste conmigo. Tu esencia aún perdura en mi corazón.

A la persona que más admiro y que ante la adversidad tiene el don de resolver las cosas con amor, paciencia y fe, mi madre María Concepción Díaz Cifuentes, pues eres mi gran soporte y sin ti nada de esto hubiera funcionado, eres esa luz que guía mi camino. Cada día me vuelves mejor persona.

Para mi padre Fortino Francisco Buendía Torres, pues me has enseñado el valor que tiene el trabajo. Eres mi ejemplo a seguir, enseñándome como darle la cara a la vida con valentía, fuerza, astucia y perseverancia.

A mi gran equipo: Wendolyne, María, Francisco y Estefany. Gracias por ser la mejor compañía, he aprendido tanto de cada uno ustedes. Soy dichoso de contar con su inconmensurable apoyo en los buenos y malos ratos. Bien se dice "uno solo puede ser vencido, pero dos pueden resistir. La cuerda de tres hilos no se rompe fácilmente". Los amo.

A los pequeños ángeles que se integraron a la familia; Manuel, Josué, Wendolyne, Ian e Ismael. Pues verlos cada día me da la fuerza para seguir adelante.

A mis amigos que con su humor ácido, hicieron mi estancia en la facultad de principio a fin más agradable. Juan, Armando, Emanuel y Pabel.

Para Demi, a pesar de no tener la dicha de compartir mucho tiempo contigo soy feliz de que llegaras a mi vida. Tus palabras fueron la clave, pues aunque no lo supieras me motivaron para confiar en lo que estaba haciendo.

Para mis hermanos perdidos Alan y Yanin, mis pequeños tesoros. Dignos de ser guardados.

Para mis sinodales; Elvia García Santos, Eloísa Adriana Guerra Hernández y Genaro Montaña Arias por tomarse la molestia de ayudarme a mejorar el trabajo.

El presente trabajo conto con el apoyo financiero del programa PAPIME clave del proyecto PE208318.

## Índice

Introducción .....	1
Marco teórico .....	3
Lagunas costeras.....	3
Importancia de sistemas costeros.....	3
Agentes precursores de la dinámica en cuerpos costeros.....	3
Dinámica de nutrientes .....	4
Sedimentos en sistemas acuáticos.....	4
Interfase sedimento/agua .....	5
Importancia del fósforo .....	6
Propiedades químicas y físicas del fósforo.....	6
Ciclo del fósforo .....	8
Fósforo inorgánico .....	9
Justificación .....	10
Hipótesis .....	11
Objetivos.....	11
General.....	11
Particulares.....	11
Área de Estudio .....	12
Laguna Grande, Vega de Alatorre, Veracruz.....	12
Material y métodos.....	13
(A) Fase de campo .....	13
(B) Fase de laboratorio .....	14
Determinación granulométrica por método Bouyoucos.....	14
Cuantificación de fósforo inorgánico total por método Bray II espectrofotometría .....	16
(c) Fase de Gabinete .....	17
Resultados.....	18
1. Granulometría .....	18
1.1 Temporada de Secas.....	19
1.2 Temporada de Lluvias.....	20

1.3 Temporada de Nortes .....	21
2. Fósforo Total Inorgánico .....	22
3. Potencial de hidrógeno .....	23
Discusión .....	25
▯ Parámetros ambientales en temporada de seca.....	29
▯ Parámetros ambientales en temporada de lluvias .....	29
▯ Parámetros ambientales en temporada de nortes .....	30
A) Composición Textural, concentración de fósforo total inorgánico y pH en “La Barra”. .....	31
B) Composición Textural, concentración de fósforo total inorgánico y pH en “Laguna Grande”	32
C) Composición Textural, concentración de fósforo total inorgánico y pH en “Laguna Chica”...	34
Estado Trófico.....	36
Conclusión .....	37
Bibliografía.....	38

## Resumen

Se analizó la dinámica espacial y temporal de la concentración del fósforo total inorgánico de los sedimentos superficiales del sistema lagunar costero Grande. El contenido total de fósforo inorgánico se determinó por el método de Bray y Kurtz II; y la clase textural se evaluó mediante el análisis de Bouyoucos. Para su estudio, y debido a su geomorfología el sistema lagunar fue dividido en tres subsistemas, Laguna Chica, Laguna Grande, y La Barra. Los resultados muestran que a través del ciclo de estudio, mayo de 2016 a marzo de 2017, las arenas predominaron en los sedimentos del sistema lagunar. Mientras que los limos y las arcillas estuvieron presentes en proporción similar. A lo largo de las temporadas, nortes, secas y lluvias, la proporción de arcillas permaneció sin diferencias significativas entre los subsistemas. Sin embargo, espacialmente, durante la temporada de lluvias, existió discrepancia entre el subsistema La Barra con respecto a los otros dos subsistemas.

Al considerar la adsorción del fósforo en los tipos sedimentarios, las arcillas fueron de mayor interés, pues al poseer una elevada área superficial activa, con enlaces no saturados, son capaces de interactuar con diversos tipos de sustancias como los cationes de potasio ( $K^+$ ), magnesio ( $Mg^{++}$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ). Durante la temporada de nortes, se presentaron las máximas concentraciones del fósforo total inorgánico en los sedimentos del sistema lagunar, lo que se atribuye a diversos factores, como la relativa poca profundidad del sistema lagunar, los vientos de gran intensidad que forman olas favoreciendo el proceso remoción y mezcla de los sedimentos en la columna de agua. Mientras que, en la temporada de lluvias se tienen los valores mínimos: siendo probable que la disminución provenga como consecuencia del régimen de inundaciones provocado por la precipitación pluvial, que generó un aumento en la profundidad del sistema lagunar, y disminución notable de la intensidad de los vientos.

En cuanto a las concentraciones de fósforo disuelto, durante la temporada de secas, se presentaron diferencias significativas entre el subsistema La Barra y los subsistemas Laguna Grande y Laguna Chica. Mientras que, en la temporada de lluvias, la diferencia se presentó entre los subsistemas Laguna Grande y La Barra. A grandes rasgos, el subsistema "La Barra" presentó un comportamiento diferente a los otros dos subsistemas. De acuerdo al criterio de Contreras (2002), a lo largo de las temporadas del año, las concentraciones promedio de fósforo total registradas en el sistema estuarino-lagunar Grande (0.0007 a 0.048 g P- $PO_4$ /kg de sedimento), lo caracterizan como un sistema ligeramente eutrofizado.

## Introducción

La considerable riqueza específica de los sistemas costeros mexicanos, se atribuye principalmente a los altos niveles de productividad primaria, hecho que se refleja, a nivel nacional, en las actividades pesqueras locales. En otras palabras, ecológicamente, los ecosistemas costeros como lagunas costeras y estuarios, reúnen las características medio ambientales requeridas para un desarrollo óptimo de diversidad y abundancia de especies al formar ensamblados característicos por sus complejas cadenas tróficas que involucran un importante flujo de materia y energía a lo largo del año (Chávez *et al.* 2005).

Existe diferencia en la dinámica nutrimental entre los ambientes oceánicos y los costeros; éstos últimos comprenden lagunas, estuarios, pantanos salobres, marismas, entre otros, y se caracterizan por presentar zonas someras con elevada tasa de sedimentación, así como la regeneración bentónica de nitrógeno y del fósforo (Parsons *et al.* 1977; Hargrave 1980). Por lo que, los procesos biogeoquímicos ligados al sedimento adquieren gran relevancia, ya que, en función de su composición, el sedimento es capaz de retener nutrientes y compuestos a través de procesos físicos como la adsorción, la quelación, el intercambio iónico o la coprecipitación (Gunkel 2003; Zambrano *et al.* 2005). La dinámica sedimentológica, en cuanto a la captura o liberación del fósforo o del nitrógeno, es afectada por el nivel del agua, el tiempo de residencia, la temperatura, la morfometría del sistema, la cantidad de sedimento que se encuentra en la interfase sedimento-agua, la velocidad e intensidad de los vientos (Rosas 2001; Wetzel 1981). Los sedimentos ricos en fósforo, nitrógeno o materia orgánica, generalmente son de origen autóctono, y forman parte natural de ecosistemas acuáticos eutróficos. Mientras que, aquellos sedimentos con baja concentración de compuestos fosfatados, nitrogenados y de materia orgánica caracterizan a los ecosistemas acuáticos denominados oligotróficos (Naumann 1930).

En los sistemas costeros, el fósforo (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) juega un papel determinante en el metabolismo biológico, actuando como limitante de la productividad, además de formar parte de un componente esencial de los ácidos nucleicos y fosfolípidos. Sin embargo, su ingreso a los ecosistemas acuáticos es, principalmente, consecuencia directa de descargas de agua epicontinental, así como del acarreo de materiales parentales por medio de las mareas y las corrientes marinas en la zona litoral. Sin embargo, a lo largo del siglo anterior, la concentración de fósforo en los sistemas costeros fue alterada por los procesos de impacto ambiental, consecuencia de desperdicios industriales y domésticos

(detergentes y líquidos cloacales), uso de plaguicidas y fertilizantes agrícolas, así como el aumento de escorrentías en cuencas deforestadas

En los sedimentos de las lagunas costeras se llevan a cabo numerosos procesos autogénicos, sean químicos o biológicos, que determinan la transformación de los compuestos sedimentados e implican su inmovilización definitiva o por el contrario su retorno al agua. Como es el caso del calcio y/o el hierro en los sedimentos, que se encuentran en equilibrio con el fosfato disuelto en agua intersticial. Además, en el sedimento el proceso de descomposición de la materia orgánica mediado por organismos bacterianos implica la liberación de fosfato disuelto, que pasa a incorporarse al agua intersticial. Dependiendo de las características de la matriz sedimentaria se establecerá una concentración de equilibrio, resultado de todos los procesos que actúan simultáneamente como descomposición, adsorción y precipitación. Cuando dicha concentración de equilibrio supera la concentración en el agua superficial al sedimento, se produce un flujo de fosfato desde el sedimento hacia el agua por difusión. Por el contrario, si la concentración en equilibrio es inferior a la concentración del agua, el flujo por difusión se produce en el sentido desde el agua hacia el sedimento (Bostrom *et al.* 1988).

En el presente estudio se abordan aspectos de la dinámica espacial y temporal del fósforo contenido en los sedimentos del sistema lagunar costero Grande, ubicado en la parte central de las costas de Veracruz. Entre los objetivos se encuentra el determinar cuantitativamente las concentraciones del fósforo total inorgánico presente en los sedimentos, a lo largo de un ciclo anual, comprendido de junio de 2016 a marzo de 2017.

## **Marco teórico**

### **Lagunas costeras**

Las lagunas costeras de la zona intertropical, constituyen humedales de importancia ecológica, con una alta diversidad biótica. Se caracterizan por ser cuerpos acuáticos semicerrados, conectados con el mar por medio de una boca, donde se encuentran dos masas de agua de diferentes características, marinas y dulceacuícolas, de manera permanente o efímera. Además, el sistema lagunar costero se ubica por debajo del nivel máximo de las mareas más altas, y está separado del mar por medio de una barrera arenosa, que corre generalmente paralela al eje mayor de la laguna (Lankford 1977). La circulación del agua marina proveniente de la zona nerítica, favorece que sea introducida al sistema lagunar por medio del proceso mareal, entrando a la laguna a través de la boca. Por su parte, la descarga de agua dulce al sistema lagunar proviene de los ríos y la lluvia. Los vientos y las corrientes internas generadas dentro de la laguna crean una eficiente circulación, con el consecuente aumento de la productividad, originado por la elevada tasa de nutrientes, provenientes principalmente de la descarga de ríos. Estos aportes pueden traer consigo riesgos para la integridad del sistema lagunar por su contenido de contaminantes de origen antrópico. En el estado de Veracruz las lagunas costeras en su mayoría, se caracterizan por ser salobres, donde el intercambio del agua de los ríos y del mar se origina principalmente por las mareas (Contreras, 2000).

### **Importancia de sistemas costeros**

Los estudios de dinámica costera y los procesos litorales adquieren gran relevancia al considerar que entre un 70 y 80% de la población mundial se ubica en zonas costeras o cercanas a ellas, especialmente zonas urbanas (CEPAL, 2002). En la franja costera se desarrollan actividades recreativas, turísticas, además de importantes actividades económicas como la localización de puertos marítimos y la ubicación de operaciones industriales. La dinámica costera es la encargada de la construcción geomorfológica de la línea de costa y también la responsable por los procesos de erosión y deposición que la mantienen en constante alteración (McLachlan 1983). Atendiendo a esto se debe tomar en cuenta la composición de los sedimentos ya que son altamente heterogéneos e incluye tanto minerales como materia orgánica que afecta directamente la absorción de nutrientes.

### **Agentes precursores de la dinámica en cuerpos costeros.**

Los principales agentes que determinan la circulación y el transporte de materiales en las lagunas costeras son: el impacto del viento, los gradientes de densidad, son consecuencia de los gradientes

de temperatura y/o de salinidad, causados por: otros agentes, la acción periódica de las mareas y descargas de agua dulce por ríos afluentes, el intercambio de agua dulce con la atmósfera por la evaporación y la precipitación, y el intercambio de calor, presión barométrica, la morfología de la cuenca (batimetría y contorno), la fricción en el fondo y las paredes laterales de la cuenca y el efecto de coriolis (Farreras 2006).

### **Dinámica de nutrientes**

La dinámica de los nutrientes en las aguas costeras depende, principalmente, de mecanismos de retroalimentación entre los ecosistemas, ya que como en este caso de estudio, parte de la biomasa de la laguna se exporta a alta mar, la materia orgánica se remineraliza en la columna de agua o en los sedimentos, y se importan formas inorgánicas de nutrientes (Nixon 1980; Dame *et al.* 1986; Nixon *et al.* 1994). Mientras que en el sistema lagunar costero, los procesos biogeoquímicos son complejos debido a las diferentes interacciones con los sedimentos y la competencia bentónica-pelágica de los productores primarios (Keiser *et al.* 1989; Fourqurean *et al.* 1993). Los sedimentos regulan la concentración del nitrógeno y, por lo tanto, la productividad de los sistemas marinos costeros. Además de ser considerados como una fuente y un sumidero en el ciclo biogeoquímico de este elemento (Lohse *et al.* 1993). En el caso de los fosfatos, los sedimentos funcionan como un regulador de sus concentraciones dentro de un rango estrecho, liberándolo o secuestrándolo, por lo que puede limitar la disponibilidad de este nutriente para el fitoplancton (Froelich 1988; Vidal 1994). En cuanto a los sedimentos suspendidos en la columna de agua, sus efectos a corto plazo conducen a una competencia efectiva entre las especies de fitopláncticas por las partículas de sedimento con fosfato (Fourqurean *et al.* 1993; Vidal 1994). Por lo tanto, para los sistemas costeros con conexión permanente al mar, las aguas marinas puede ser la principal fuente de nutrientes inorgánicos necesarios para apoyar la productividad de un ecosistema.

### **Sedimentos en sistemas acuáticos**

En los sistemas acuáticos los sedimentos se encuentran constituidos por una mezcla de varios materiales, que pueden ser distinta composición física, química o biológica como son, el agua intersticial que se encarga del llenado de los espacios entre las partículas sólidas, los componentes inorgánicos como son rocas y minerales, originados por la erosión de los materiales presentes en la superficie, la materia orgánica que se puede encontrar en concentración variable, la mezclas de proteínas, carbohidratos, lípidos y sustancias húmicas, y los componentes antrópicos (Peluso 2011).

De esta manera, el sedimento constituye una base para el asentamiento de sistemas tróficos en ecosistemas acuáticos, constituyéndose como el principal hábitat de las poblaciones bentónicas, las cuales a su vez tienen un importante papel ecológico, en cuanto al flujo de materia y energía, siendo los intermediarios naturales entre productores primarios, detritos y consumidores superiores.

### **Interfase sedimento/agua**

El fósforo, al igual que otros nutrientes inorgánicos, puede ser incorporado o liberado de los sedimentos de acuerdo a la naturaleza de la materia orgánica que se deposita en ellos, así como a la actividad de los organismos y las características mismas de los sedimentos como su potencial redox. Generalmente los fosfatos son retenidos en sedimentos oxidados, como es el caso de las capas superiores del sedimento (Arenas y De la Lanza 1990; Raaphorst *et al.* 1992). Parte de este fósforo inorgánico puede ser retenido por adsorción de los iones disueltos en las partículas de sedimento, en agregados orgánicos y por la formación de hidróxidos de hierro y aluminio (Raaphorst *et al.* 1990,1992; Jensen *et al.* 1995). Sin embargo, parte del fósforo constituyente de la materia orgánica depositada recientemente sobre el sedimento se libera rápidamente a partir de la actividad degradadora de bacterias y alimentaria de ciliados (Jensen *et al.* 1995). El fósforo depositado o acumulado en las capas más profundas del sedimento es también liberado gradualmente por procesos de reducción química (Arenas y De La Lanza, 1990; DeAngelis *et al.* 1989).

Al interior del sedimento se forma un gradiente en la concentración de los elementos nutritivos desde los puntos donde se generan, o están en mayor concentración, hasta los lugares donde se consumen o hacia la columna de agua. La velocidad de dicho flujo depende del gradiente de concentración, del coeficiente de difusión específico de cada ion, y de las características del sedimento (Santschi *et al.* 1990). La cantidad de nitrógeno y fósforo que fluye del sedimento varía también de acuerdo al régimen climático que determina la cantidad y calidad de la materia orgánica que entra por aporte de los ríos y la escorrentía, las cuales a su vez condicionan tanto a la comunidad presente como a los procesos químicos y biológicos (Boon y Cain 1988; Teague *et al.* 1988; Law *et al.* 1991; Bak y Nieuwland 1992; Valdés y Real 1994).

En lagunas costeras tropicales someras, los intercambios de nitrógeno y fósforo entre el agua y el sedimento pueden ser modificados por la resuspensión de sedimentos, a consecuencia del régimen de vientos (Santschi *et al.* 1990; Fardaste *al.* 1994).

En condiciones de anoxia, la descomposición de la materia orgánica en ambientes anóxicos de la interface sedimento agua transcurre a través de vías anaeróbicas, utilizando aceptores de electrones distintos al oxígeno. En presencia del ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), la vía metabólica preferente es la desnitrificación que mantiene el potencial redox a un nivel moderadamente reductor. Una vez agotado el ion nitrato, el potencial redox disminuye alcanzando valores que permiten la reducción del  $\text{Fe}^{3+}$  y la consiguiente solubilización de los óxidos-hidróxidos de hierro. El resultado de esta reacción es, por una parte, la imposibilidad de retención del fosfato liberado por la descomposición de la materia orgánica sobre partículas férricas, al mismo tiempo que el fosfato previamente adsorbido sobre este tipo de partículas retorna al agua. Esta secuencia de reacciones de óxido-reducción es la razón por la que la disponibilidad de elevadas concentraciones de nitrato en el sedimento actúa como limitante de liberación de fosfato desde el sedimento (Bostrom *et al.* 1988).

En algunos casos se ha observado una asimilación del fosfato procedente del sedimento por parte de la comunidad bacteriana de la interface sedimentaria (Gachter y Mayer 1993). Así mismo, en sistemas en los que existen una elevada concentración de materiales húmicos en la interface agua/sedimento, estos pueden retener una fracción importante del fosfato en forma de coloides (López, 2004).

### Importancia del fósforo

El fósforo constituye un elemento básico de las sales inorgánicas de calcio que se encuentran en los huesos y dientes. El 90% del fósforo que se halla en estos es en forma del ion negativo ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (Wetzel 1975).

#### Propiedades químicas y físicas del fósforo

Peso atómico	30.98
Número atómico	15
Color del sólido	Blanco
Densidad del sólido (gr/ml)	1.812
Punto de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	44.1
Punto de ebullición ( $^{\circ}\text{C}$ )	280
Fórmula del hidruro	$\text{PH}_3$
Estabilidad del hidruro	Estable en ausencia de aire

Configuración electrónica: P  $[\text{Ne}] 3s^2 3p^3$

Los iones fosfato monobásico y dibásico actúan como amortiguadores, para mantener el pH apropiado de los fluidos corporales. El ácido fosfórico también puede reaccionar con grupos funcionales de

alcoholes en compuestos orgánicos y así formar fosfoésteres. Los ésteres orgánicos de fosfatos se encuentran en los fosfolípidos (que forman las membranas de las células y tejidos nerviosos), el ácido desoxirribonucleico (DNA) y ácido ribonucleico (RNA) que controlan la herencia y síntesis de proteínas y las coenzimas, compuestos que operan en el cuerpo junto con las enzimas.

Los fosfoésteres son conocidos como fosfatos de energía elevada, siendo los que suministran las necesidades inmediatas de energía de la célula. Esta importante función del fósforo, lo convierte en un elemento esencial en la constitución celular. Afortunadamente, para el humano, el fósforo tiene una distribución tan amplia en su alimentación diaria que prácticamente tiene la seguridad de obtener cuando menos 800 mg diarios que representan el requerimiento básico en los adultos (Bloomfield, 1993).

En las células, el fósforo forma parte de la estructura del ARN y ADN, al constituir los grupos fosfato sillares de estas moléculas biológicas responsables de la biosíntesis de proteínas y transmisión de información genética. Así como en el adenosintrifosfato (ATP), molécula encargada de proporcionar energía a las células (Brown, 1988). El ADN es una sustancia polimérica formada por miles de unidades llamadas nucleótidos, y los sus componentes fundamentales de estas unidades son el ácido fosfórico, la desoxirribosa y cuatro bases. El ácido fosfórico se obtiene de los minerales y la dieta; la desoxirribosa se sintetiza en el organismo a partir de la glucosa, y las cuatro bases nitrogenadas se producen en el cuerpo a partir de los aminoácidos (Hein 1992).

Formas alternativas de la utilización del fósforo son las siguientes: se utiliza en la elaboración de aleaciones especiales como el bronce fosforoso, así como raticidas, venenos, fuegos artificiales, fertilizantes, bombas y compuestos de fósforo. Combinado con el azufre sirve para fabricar cerillas. El ácido fosfórico se utiliza en: la industria farmacéutica, la elaboración de fertilizantes y la industria química (Babor 1977).

La mayoría de las piedras que contienen fósforo son convertidas en fertilizantes. La piedra de fósforo contiene grandes cantidades de arena y arcilla. En una planta de tratamiento, arena y arcilla son removidas, así como aquellos materiales orgánicos. El resultante se concentra y se envía a plantas que lo convierten a ácido fosfórico o en fertilizantes de fosfatos solubles en agua. Los carbonatos de calcio  $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$  contenidos en la piedra de fosfato son insolubles ( $K_{ps} = 2.0 \times 10^{-29}$ ), se convierte a

una forma soluble para el uso en fertilizantes tratando la piedra de fósforo concentrada con ácido sulfúrico o fosfórico (Brown 1988)

Los haluros de fósforo son más estables que el nitrógeno, por lo que en la industria naval los fosfuros son utilizados como gas para inflar lanchas o salvavidas, ese gas contiene fosforo cálcico.

### **Ciclo del fósforo**

El fósforo en la hidrósfera se encuentra en concentraciones escasas, actuando como limitante en la productividad primaria. La pérdida de fracciones del fósforo coloidal en un ambiente acuático, suele ser reemplazado por la regeneración de fracciones de fósforo solubilizado, ya sea por la descomposición existente en las profundidades, la liberación del fósforo presente en sedimentos o por el fósforo contenido en los afluentes que desembocan en el cuerpo de agua (Pérez 1999).

El ingreso de fósforo se debe principalmente al crecimiento de los asentamientos humanos, el fósforo como tal es utilizado por sus propiedades químicas ya que contrarresta la dureza del agua y maximiza la eficacia de la limpieza. Es muy común encontrarlo en abonos agrícolas, usado con fines industriales o en detergentes, productos de uso doméstico y en desechos orgánicos.

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

Los cuerpos de agua ricos en materia orgánica muestran concentraciones elevadas de fósforo. El intercambio de fósforo entre sedimentos y el agua radica en el ingreso neto del fósforo en los sedimentos. Factores físicos, químicos y metabólicos afectan directamente la eficiencia de inmovilización de fósforo en los sedimentos y la rapidez de los procesos que reintegran el fósforo del agua.

Los cambios a través de la interfase sedimento-agua son regulados por mecanismos asociados con los equilibrios entre los minerales y el agua, que se llevan a cabo por medio de procesos de adsorción, interacciones del potencial redox dependientes de la cantidad de oxígeno y las actividades de las bacterias, hongos, plancton e invertebrados (Margalef 1983). La degradación microbiana de las partículas de materia orgánica muerta que sedimenta y en los sedimentos, es el proceso principal de

consumo de oxígeno en las aguas profundas de los cuerpos de agua (GCBB 2005). Las algas que crecen sobre los sedimentos pueden utilizar eficientemente el fósforo de éstos (Sánchez *et al.* 2001).

Además, las algas son capaces de crecer a expensas de la extracción suficiente del fósforo de diversos compuestos particulados inorgánicos de solubilidad extremadamente baja, que se encuentran en suspensión en el agua (Santoyo, 1994). La mayoría del fósforo liberado al agua durante el crecimiento activo de las algas es fosfato inorgánico soluble que, por su parte, es reciclado rápidamente. Derivado de la lisis y la descomposición de las algas, la mayor parte del fósforo se encuentra en forma orgánica y es degradado por las bacterias, que actúan como mediadoras en la degradación del fósforo disuelto, de orgánico a fósforo inorgánico (Wetzel 1981).

El fósforo puede encontrarse en forma de sales de hierro, aluminio, calcio, y de especies orgánicas. Su dinámica incluye una serie de reacciones y de procesos de transporte que pueden terminar en un estado no aprovechable. Entre estos procesos se puede citar la incorporación del fósforo al sedimento.

### **Fósforo inorgánico**

El fósforo inorgánico resulta de la mineralización del fósforo orgánico, así como de la descomposición del plancton sestónico (Hipse *et al.* 2006).

En la mayoría de los cuerpos acuáticos naturales, el porcentaje de fósforo total en forma de ortofosfatos es considerablemente bajo (<5%). Las plantas acuáticas necesitan fosfato inorgánico para la nutrición, típicamente en la forma de iones ortofosfato ( $PO_4^{3-}$ ). La disponibilidad de las formas inorgánicas de fósforo para sostener la productividad en orden descendente es la siguiente: ortofosfatos > pirofosfatos > trifosfatos > aniones polifosfatos mayores. Estas formas químicas del fósforo forman complejos, quelatos y sales insolubles cuando se asocian con iones de metales. El grado de formación de complejos y quelatos entre los fosfatos inorgánicos y los iones de metales en cuerpos de aguas naturales dependerán del pH y de la presencia de otros iones como los sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ), carbohidratos, fluoruro, especies orgánicas, entre otros.

## Justificación

Actualmente han sido documentadas investigaciones estrechamente relacionadas con la importancia ecológica de los sedimentos en cuanto al aporte de nutrientes, por su parte Black, C., (1968) demostró que el contenido de fósforo disponible en los suelos se da en función de su estado evolutivo, así como la mineralogía y granulometría. Las investigaciones relacionadas a suelos costeros son relativamente escasas, por lo que es de suma importancia hacer hincapié en la necesidad de realizar estudios detallados al respecto y de esta manera implementar medidas para conservar o restaurar complejos sistemas lagunares. En particular, los humedales costeros, como lo es el sistema lagunar costero Grande, ecológicamente funcionan como reservorios naturales de gran importancia en cuanto a la productividad primaria y diversidad biológica, reflejo de la dinámica de compuestos fosforados en este tipo de ecosistemas, comparable con la producción primaria de las grandes selvas tropicales, además de brindar servicios ambientales que pueden ser aprovechados.

La investigación tiene como finalidad analizar la relación existente en las concentraciones de fósforo y los tipos sedimentarios, Melgar (1998) señala que la cantidad del nutriente puede ser de varios órdenes de magnitud superior a la del agua, y se traduce como importante fuente interna para la eutrofización. Atendiendo a la premisa de los factores que pueden afectar la disponibilidad del fósforo a través de la composición granulométrica. Siendo ésta, una manera de determinar el estado de conservación en que se encuentra este sistema costero, ya que los desechos urbanos e industriales que llegan, en mayor o menor proporción, al sistema provocan incrementos en la tasa de nutrientes, con la consecuente probabilidad de su alteración lo que implica procesos de eutrofización y con ello, la disminución de la calidad del agua; y consecuentemente, un cambio en las condiciones ambientales, modificando en su conjunto al ecosistema.

### **Hipótesis**

Es posible encontrar diferencias significativas en las concentraciones de fósforo total inorgánico, si la composición de la clase textural de los sedimentos es afectada por las variaciones climáticas locales; temporadas de secas, lluvias y nortes. Por lo que es probable que el agregado particular de los diferentes tipos sedimentarios, influyan en la capacidad de adsorción del fósforo.

### **Objetivos**

#### **General**

- Evaluar la dinámica espacio-temporal del fósforo total en los sedimentos del sistema lagunar Grande

#### **Particulares**

- Determinar la composición textural de los sedimentos
- Cuantificar los niveles de fósforo total inorgánico en los sedimentos del sistema lagunar.
- Evaluar la distribución espacial de las concentraciones de fósforo en el área de estudio.
- Evaluar la distribución de fósforo para las diversas temporadas del ciclo anual que se suceden en la localidad.
- Verificar el estado trófico del sistema lagunar costero Grande.

## Área de Estudio

### Laguna Grande, Vega de Alatorre, Veracruz

La zona de estudio corresponde al sistema lagunar Grande, municipio de Vega de Alatorre, Veracruz, y se ubica en la porción central del estado de Veracruz, en las coordenadas 20° 02' latitud norte y 96° 38' longitud oeste (García, 1973). Con una superficie total de 22.5 km<sup>2</sup>, el sistema lagunar Grande está formado por tres cuerpos acuáticos conectados, los que en el presente estudio son considerados como subsistemas: Laguna Chica (LC), Laguna Grande (LG), y La Barra (LB). La Barra comunica las aguas del sistema lagunar con las del Golfo de México, por medio de un canal de 300 m de anchura y 3.5 km de largo.

Laguna Chica (LC) está ubicada en la parte norte del sistema lagunar, y su eje mayor presenta una longitud promedio de 3 km, y el menor de 0.8 km. En su eje mayor laguna Grande, presenta 4.7 km de longitud y en su eje menor 1.5 km de ancho, La Barra está ubicada al suroeste de ambas lagunas, y conecta por medio de una boca con la zona marina. El sistema en general, presenta una profundidad promedio de 0.9 m, así como una amplitud de marea de 0.4 a 0.6 m. El aporte de las aguas continentales al sistema lagunar se tiene por los ríos y caños de poco caudal; en Laguna Grande descargan los arroyos "El Diamante", "El Carey", y el "Salado", y en Laguna Chica descarga el arroyo denominado "El Huanal".

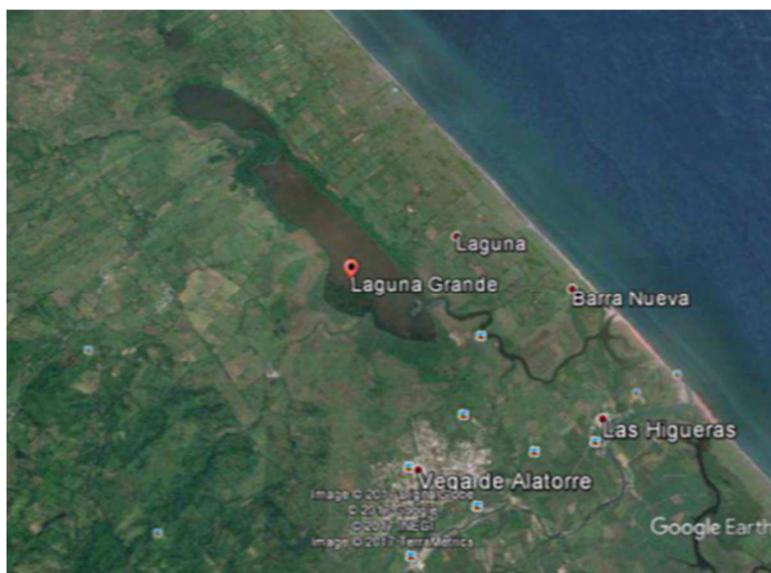
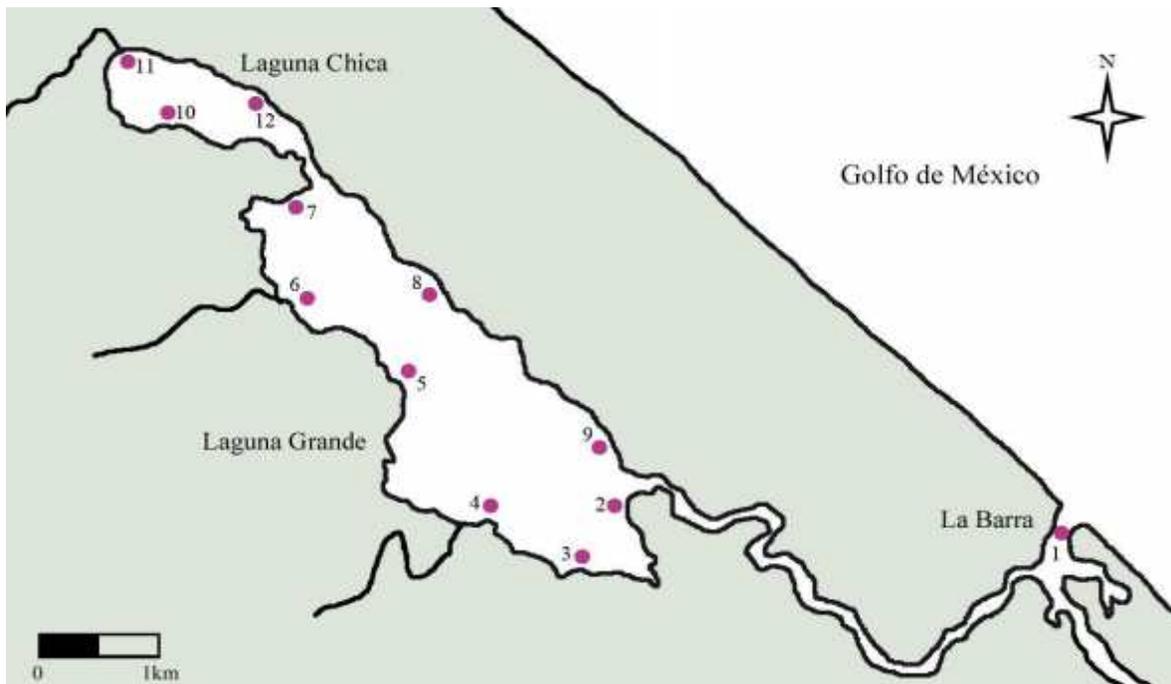


Figura 1. Ubicación geográfica del sistema lagunar Grande, Veracruz. Obtenido de Google maps.

## Material y métodos

### (A) Fase de campo

Los sedimentos extraídos del sistema lagunar costero Grande, corresponde al periodo 2016-2017, y comprende los meses de mayo y junio para temporada de secas; agosto, septiembre y octubre para temporada de lluvias; febrero y marzo para temporada de nortes. Con base en las características del sedimento se seleccionaron las áreas de conchal, arenosas, fangosas, de vegetación y zonas de descarga urbana, fueron considerados 12 puntos de muestreo, distribuidos en los subsistemas de la siguiente manera: En La Barra se tiene solo una estación de muestreo del mismo nombre La Barra, en Laguna Grande las estaciones son La Puerta, El Salado, El Carey, Punta Brava, El Diamante, Fondo de Laguna Grande, Frente a la Puerta, Frente a Punta Brava; y en Laguna Chica se tienen las estaciones: El Huanal, Fondo de Laguna Chica y Puerto Arturo (Figura2). Para la extracción del sedimento se utilizó una draga tipo Van Been. El sedimento así obtenido fue almacenado en bolsas de plástico previamente etiquetadas y preservadas a temperatura de 4°C.



**Figura 2.** Localización de las estaciones de colecta con coordenadas geográficas 20° 02' N y 96° 38' O: 1. La Barra, 2. La Puerta, 3. El Salado, 4. El Carey, 5. Punta Brava, 6. El Diamante, 7. Fondo LG, 8. Frente a Punta Brava, 9. Frente a la Puerta, 10. El Huanal, 11. Fondo LC y 12. Puerto Arturo.

## (B) Fase de laboratorio

### Determinación granulométrica por método Bouyoucos.

En laboratorio las muestras colectadas se sometieron al proceso de secado, molienda, y tamizado (Tamiz 2 mm). A continuación, se eliminaron los carbonatos. Para lo cual se pesaron 50 g de sedimento, al cual se le añadió 100ml de agua destilada y 5ml de ácido acético 5%.



Figura 3. Exposición a la intemperie de cada muestra.



Figura 4. Almacenamiento de sedimento molido y seco.

Más adelante, se procedió a la eliminación de la materia orgánica, por medio de su oxidación con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) (Sadzawka *et al.* 2006).



Figura 5. Muestras donde se observan el resultado físico de la eliminación de carbonatos.



Figura 6. Proceso de la oxidación de la materia orgánica.

Liberadas las muestras de las interferencias, se aplicó un agente dispersor, hexametáfosfato de sodio en un medio acuoso. Para finalmente, con la ayuda del hidrómetro, cuantificar después de 40 segundos y de 2 horas de sedimentación, la densidad de la suspensión (Sandoval *et al.* 2011).



Figura 7. Muestras en el proceso de análisis granulométrico, según el método Bouyoucos.

Con los valores obtenidos se calculó la proporción de arcillas, limos y arenas, mediante la aplicación de las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ limo + arcilla} = ((D - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) - \text{temperatura corregida}) + C / B * 100$$

$$\% \text{ arcilla} = ((F - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) + \text{temperatura corregida} + E) / B * 100$$

$$\% \text{ arena} = 100 - G$$

$$\% \text{ limo} = 100 - (\text{arena} + \text{arcilla})$$

Donde:

B= peso de la muestra

C= lectura de la densidad a los 40 segundos

D=temperatura a los 40 segundos

E= densidad a las dos horas

F= temperatura a las dos horas

La corrección de la temperatura se tomó de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 MÉTODOAS-09.

Para determinar la textura se procedió a localizar las cantidades de cada una de las tres fases de partículas.

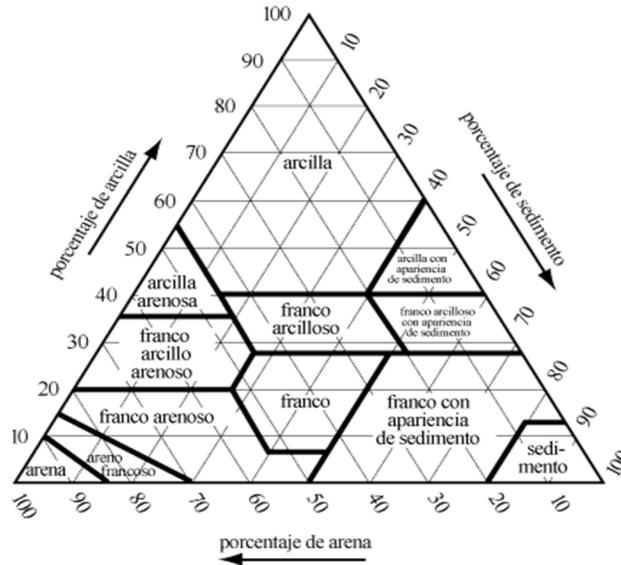


Figura 8. Triángulo textural del departamento de agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (1996).

### Cuantificación de fósforo inorgánico total por método Bray II espectrofotometría

El método Bray II se fundamenta en la extracción del fósforo total a través de una solución de fluoruro de amonio y ácido clorhídrico, con lo que obtiene la disolución de los fosfatos de hierro, aluminio y calcio que se encuentran presentes en el suelo. Una vez extraído el fósforo, éste se hace reaccionar con ácido cloromolibdico para formar un complejo color azul, el cual es directamente proporcional a la cantidad de fósforo contenido en la muestra. La absorbancia de la solución resultante se mide con la ayuda de un espectrofotómetro con una longitud de onda de 660 nm. A la par, se elaboró la curva de calibración con patrones de fosfato monobásico de potasio (García y Ballesteros 2006).

Para cuantificar la concentración de fósforo inorgánico total se aplicó la siguiente transformación:

$$\text{mg P/kg (suelo)} = \frac{\text{mg}}{\text{L P (solución)}} * \frac{\text{L}}{1000\text{mL}} * \frac{20\text{mL}}{1.42\text{g}} * \frac{1000\text{g}}{1\text{Kg}} = 14.08 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \text{P (suelo)} * \text{mg/L P (solución)}$$



**Figura 9.** Espectrofotometría. Muestras coloridas del fósforo extraídas por el método Bray y Kurtz II.

### **(c) Fase de Gabinete**

Los datos obtenidos en cuanto a la cuantificación del fósforo inorgánico total del sedimento, así como de la proporción de los diversos tipos sedimentarios, fueron sometidos a pruebas estadísticas que comprenden comparaciones espaciales y temporales de los datos. Para ello, se corroboró la normalidad de cada conjunto de datos, con la finalidad de decidir si habrían de aplicarse pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas (kolmogorov smirnov y shapiro wilk). Para ello, se utilizaron los paquetes de “Real statistics” de Excel, y el paquete estadístico SPSS versión 25.

## Resultados

### 1. Granulometría

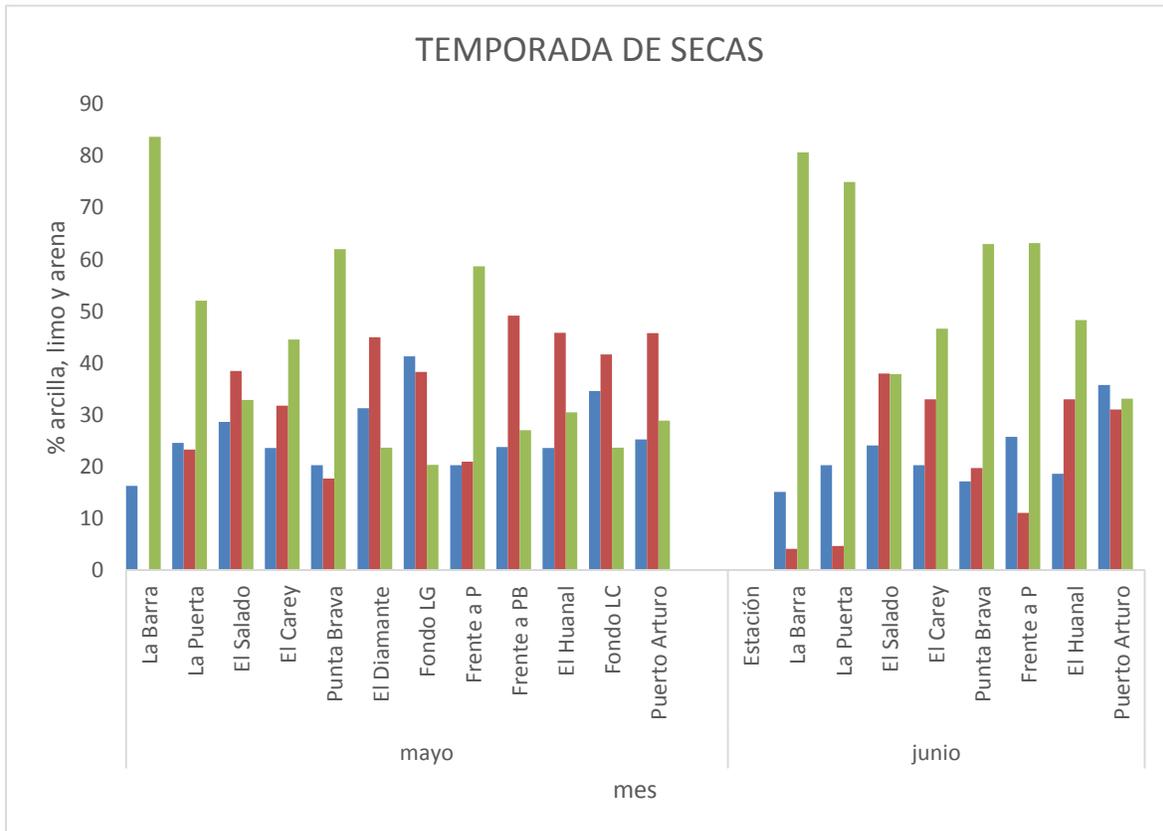
Durante los meses mayo de 2016 a marzo de 2017, que se traducen en temporadas de secas, nortes y lluvias, un total de 72 muestras de sedimento fueron obtenidas del sistema lagunar Grande. Los resultados derivados de la granulometría mostrados en la tabla 1, muestran que los sedimentos presentaron tendencia general a la fracción grande. La clase textural dominante fue representada por texturas; francas, franco arcillo arenosa seguido de franco arcillosas con un 29, 25 y 20% respectivamente. En menor proporción se registraron; franco arenosa, areno francosa, arcillosa y franco limosa. La composición y proporciones de los sedimentos prevalecieron a lo largo de las temporadas mostrando una heterogeneidad notable, probablemente debida a las barreras físicas presentes en el sistema.

**Tabla 1.** Composición espacial y temporal de las clases texturales, en el sistema lagunar costero Grande, por estación de colecta (\*\* ausencia de muestra por dificultades en campo).

Mes Estación	Mayo	Junio	Agosto	Septiembre	Octubre	Febrero	Marzo
La Barra	franco arenoso	areno francosa	areno francosa	arenosa	areno francosa	areno francosa	**
La Puerta	franco arcillo arenosa	franco arcillo arenosa	franco arenosa	franco arenosa	franco arenosa	franco arcillo arenosa	franca
El Salado	franco arcillosa	franca	franca	franca	franca	franco arcillosa	franco arcillosa
El Carey	franca	franca	franca	franca	franco arcillo arenosa	franco arcillo arenosa	franco arcillosa
Punta Brava	franco arcillo arenosa	franco arenosa	franco arcillo arenosa	franco arenosa	franco arcillo arenosa	franco limosa	franco arcillosa
El Diamante	franco arcillosa	**	franca	franco arcillo arenosa	franca	franco arcillosa	franca
Fondo LG	arcillosa	**	franco arcillosa	franco arcillosa	**	franca	arcillosa
Frente a P	franco arcillo arenosa	franco arcillo arenosa	**	**	franco arenosa	franco arcillo arenosa	franco arcillo arenosa
Frente a PB	franca	franca	franco arcillosa	**	franco arcillo arenosa	arcillosa	franco arcillosa
El Huanal	franca	**	franca	franca	**	franco arcillosa	franco arenosa
Fondo LC	franco arcillosa	**	franco arcillo arenosa	franco arcillo arenosa	**	franco arcillo arenosa	**
Puerto Arturo	franca	franco arcillosa	franca	franco limosa	franca	franco arcillo arenosa	franco limosa

## 1.1 Temporada de Secas

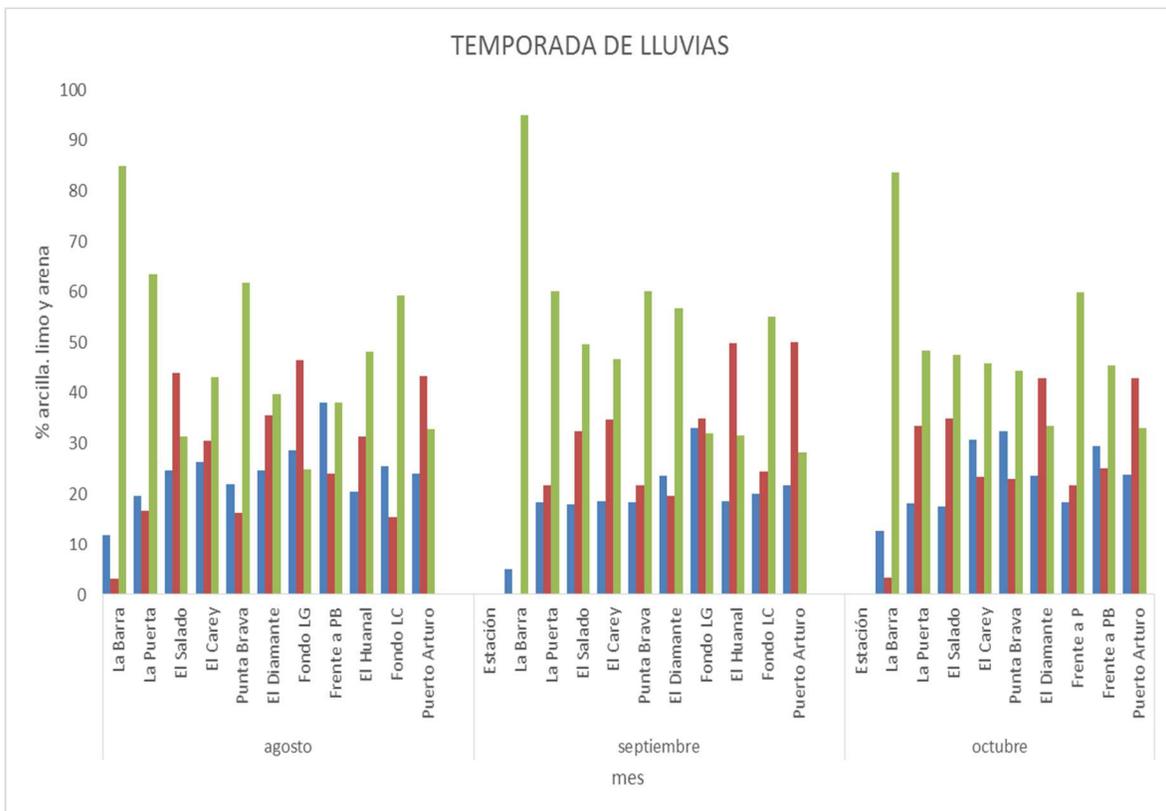
En la temporada de secas, que incluye los meses de mayo y junio de 2016, se colectaron un total de 20 muestras. La tabla 1 señala que durante la temporada en curso, las texturas dominantes fueron; francas (35%), franco arcillo arenosas (25%) y franco arcillosas (20%). En menor proporción resultaron las texturas; areno-francosa (5%), arcillosa (5%) y franco-arenosa (10%). La grafica 1 indica que durante el mes de mayo, la proporción de arenas (40.67%) y limos (33.18%) son relativamente altos. En el caso del mes de junio, las arenas aumentaron su proporción (15.31%), mientras que la de los limos tendieron a una baja (11.34%), al igual que en las arcillas, aun cuando en esta temporada su proporción permanecen dentro del intervalo de 22 a 27%.



**Gráfico 1.** Distribución mensual de las partículas sedimentarias, en cada estación de colecta, durante la temporada de secas.

## 1.2 Temporada de Lluvias

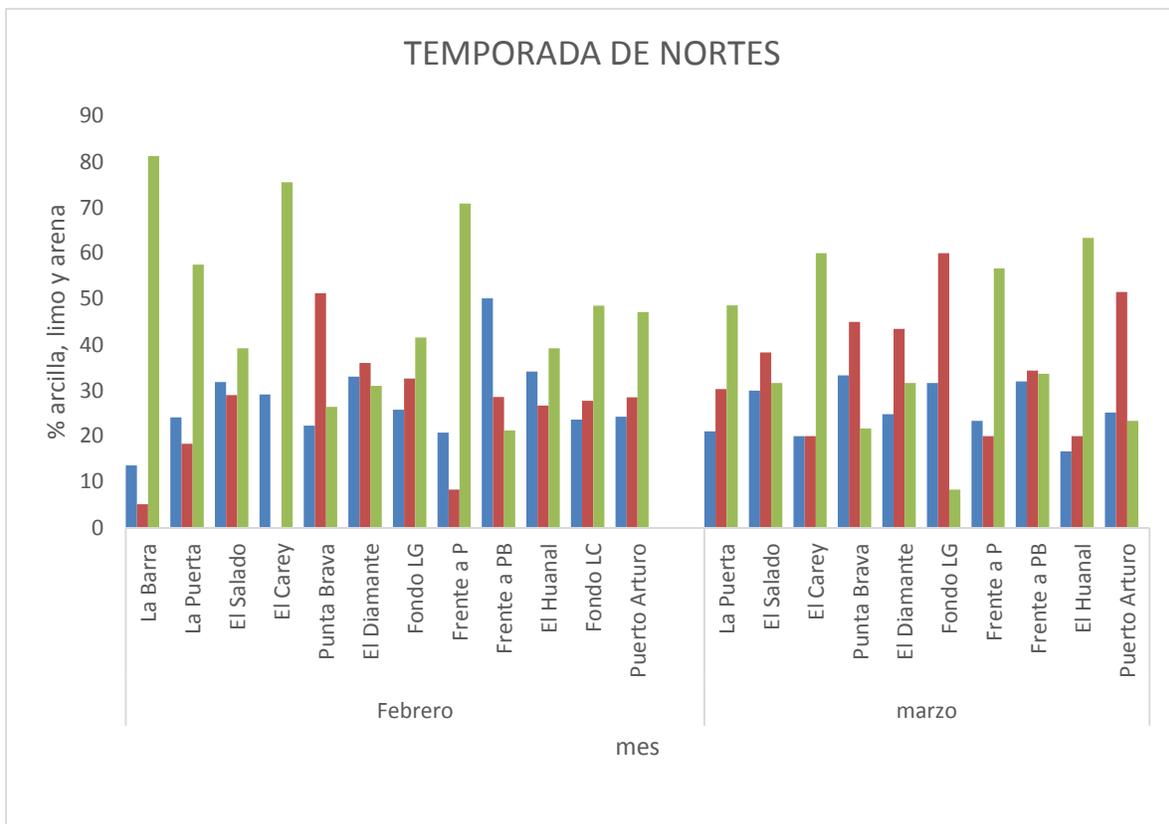
En la temporada de lluvias, que comprende los meses de agosto, septiembre y octubre de 2016, se analizaron un total de 35 muestras. La composición textural según la tabla 1 muestra mayor presencia de texturas; francas (37%) seguido de franco arcillo arenosas (23%) y franco arenosas (17%) respectivamente. La grafica 2 indica que la proporción de arenas presentó un incremento de agosto a septiembre de 47.96% a 51.48%, disminuyendo ligeramente en octubre (49.07%). De la misma manera, ocurrió con los limos, ya que sus proporciones oscilaron entre un 27% y 29%, con un ligero incremento en septiembre. Mientras que aquellas de limos y arenas, disminuyeron su proporción en septiembre (19.52%), manteniéndose casi estables en los meses de octubre (23.01%) y agosto (24.15%).



**Grafico 2.** Distribución mensual de las partículas sedimentarias, en cada estación de colecta, durante la temporada de lluvias.

### 1.3 Temporada de Nortes

En la temporada de nortes, que incluye los meses de febrero y marzo del 2017, se registraron un total de 22 muestras. En ésta, como se expone en la tabla 1 existió mayor proporción de sedimentos con textura franco arcillosa (32%), seguido por franco arcillo arenosa (27%) y franca (14%). En menor proporción destacaron, las areno francosa (5%) y franco arenosa (4%). La grafica 3 manifiesta que en febrero, la mayoría de las muestras presentaron una mayor proporción de arena (48.29%) mientras que arcillas y limos se encontraron dentro de un intervalo de 24.7% a 24.3%. En el mes de marzo la cantidad de limo (36.29%) aumentó; mientras que disminuyó la proporción de las arenas (37.89%), llegando a tener valores similares. Las arcillas permanecieron estables, y solo presentaron una ligera variación (1.94%) entre los meses de febrero y marzo.



**Gráfico 3.** Distribución mensual de las partículas sedimentarias, en cada estación de colecta, durante la temporada de nortes.

## 2. Fósforo Total Inorgánico

Durante la temporada de secas (Gráfico 4) la concentración del fósforo inorgánico total (PTI), presentó variación en el promedio en los meses de mayo y junio,  $\bar{x} \approx 0.026 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$  y  $\bar{x} \approx 0.010 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ , respectivamente. En la temporada de lluvias (agosto a octubre), en el mes de agosto se registró la menor concentración promedio de fósforo inorgánico total ( $\bar{x} \approx 0.0007 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ ), aumentando en los meses de septiembre ( $\bar{x} \approx 0.022 \frac{\text{ppmP}}{\text{kg}}$ ), y octubre ( $\bar{x} \approx 0.020 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ ). En cuanto a los nortes su cifras promedio son las mayores, destacando el mes de marzo ( $\bar{x} \approx 0.034 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ ), por ser el mes con mayor concentración, seguido por febrero ( $\bar{x} \approx 0.027 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ ), debido probablemente a las condiciones de temperatura y viento que propician estados de evaporación y mezcla, con la consecuente remoción de los sedimentos. El viento genera turbulencias dentro de la zona nerítica, y la entrada del agua, derivada de la temporada de lluvias, acarrea una gran cantidad de nutrientes que ingresan al sistema a través de mareas. (Ingall y Jahnke, 1997).

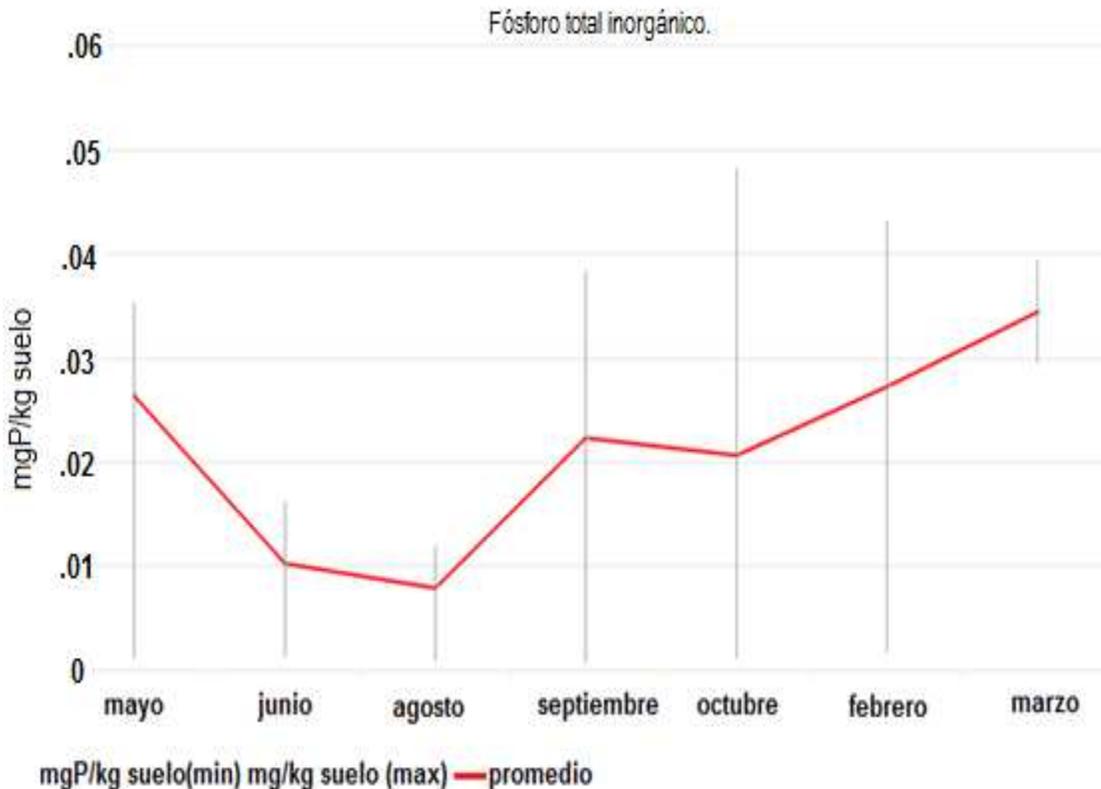


Gráfico 4. Dinámica anual de fósforo total inorgánico.

### 3. Potencial de hidrógeno

Los valores obtenidos en relación con el pH, indican de manera general que el complejo lagunar presenta una tendencia a la alcalinidad (Gráfico 5), dicho efecto podría deberse a la erosión gradual de las masas oceánicas, así como al acarreo de sedimentos arenosos por parte de arroyos o caños, provenientes de cuencas, provocando la acumulación de sales que ingresan al interior del sistema lagunar costero. A lo largo de las temporadas, el pH en el sistema lagunar Grande osciló entre valores de 7 a 8.5, haciéndose, también, presentes valores atípicos que indicaron acidez, por influencia antrópica. Dicha alteración se muestra en las estaciones de recolecta como “El Carey”, donde se registraron valores de pH de 5.5 para el mes de junio, y “La Barra” en el que se registraron valores de 4.4 para el mes de mayo y 5.1 en septiembre. En contraparte, los meses de agosto, octubre, febrero y marzo superan el valor de 8. Por lo que aquellos valores de acidez son considerados como valores atípicos. La prevalencia durante todo el año de valores promedio fue de 7.49. Siguiendo el criterio de De La Lanza (2001), y Gómez (1996), la disposición de pH se encuentra dentro de la normalidad, y podría reflejar condiciones de aguas productivas.

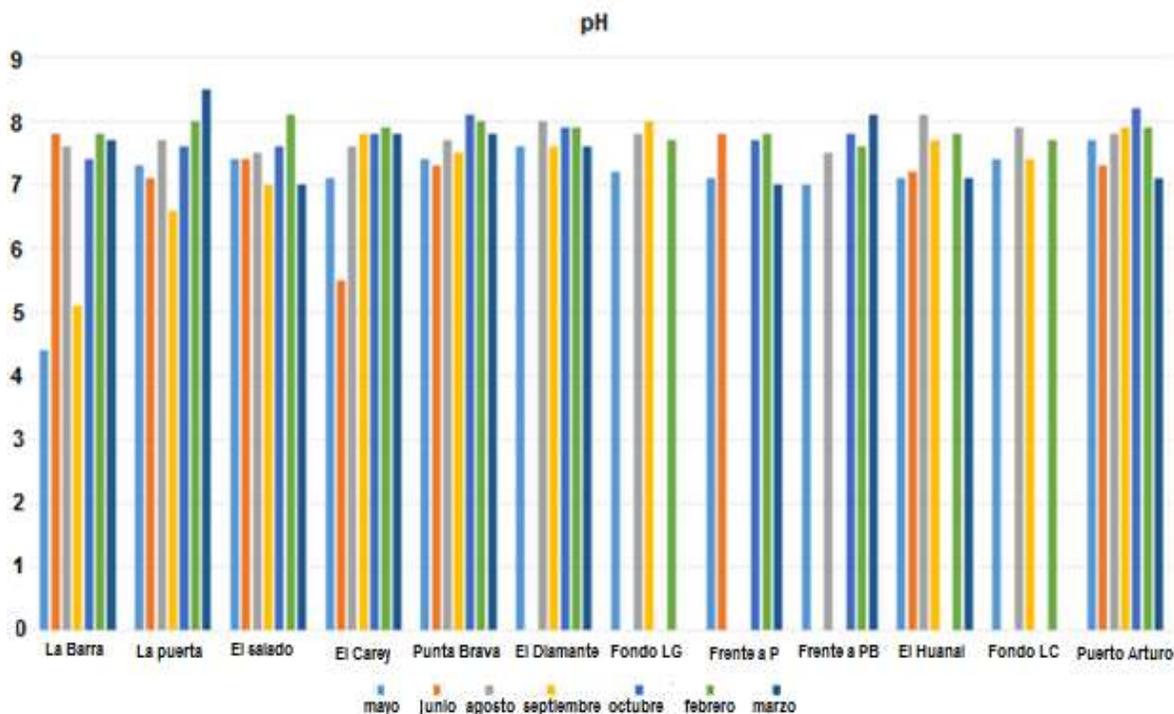
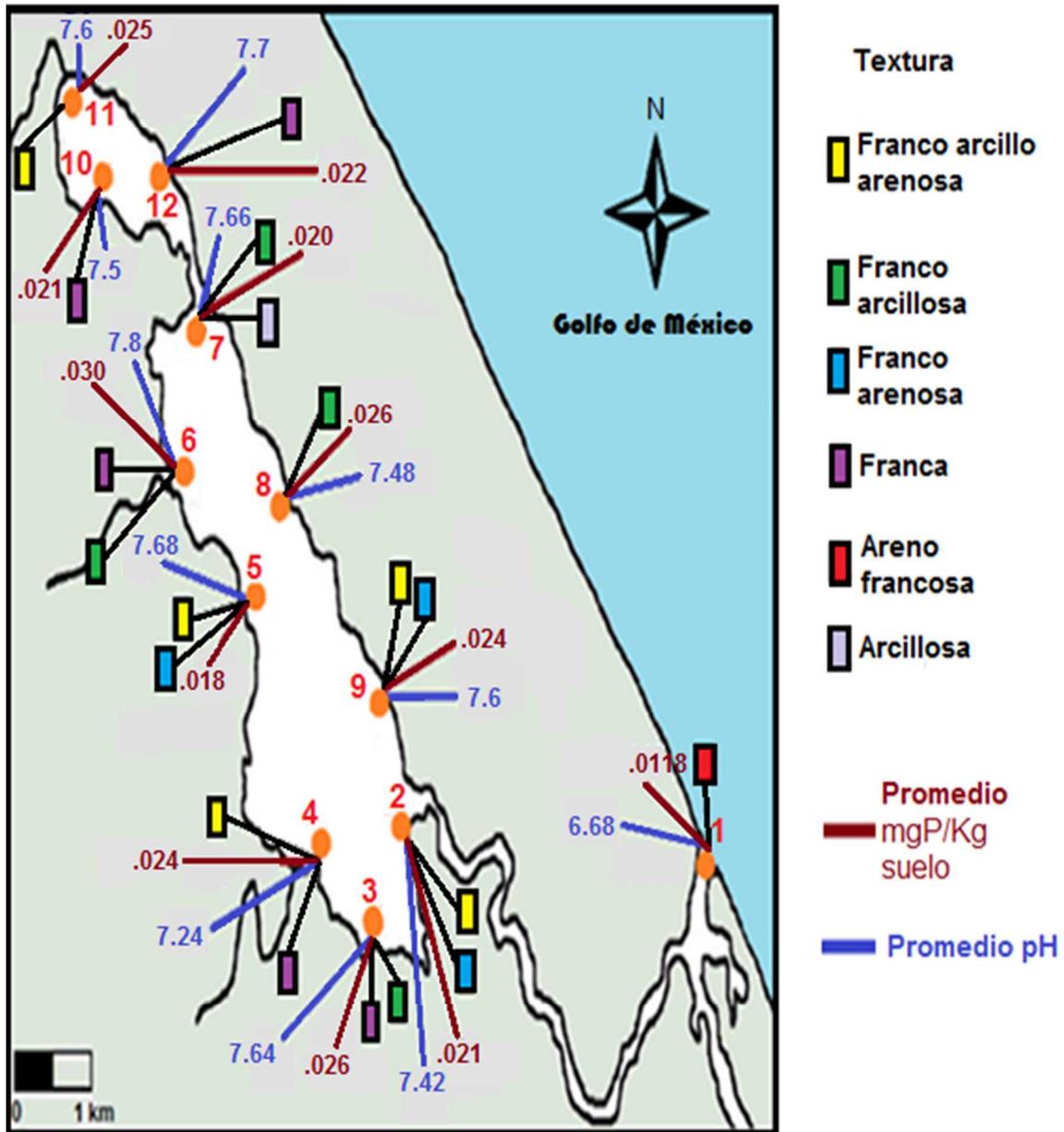


Gráfico 5. Distribución de las concentraciones del pH en el sistema lagunar costero, durante todo el periodo de muestreo.

Valores promedio de fósforo total inorgánico, potencial de hidrogeno y clase textural dominante (periodo 2016-2017).



1. La Barra, 2. La Puerta, 3. El Salado, 4. El Carey, 5. Punta Brava, 6. El diamante, 7. Fondo de Laguna Grande, 8. Frente a Punta Brava. 9 Frente a la Puerta. 10. El Huanal, 11. Fondo de Laguna Chica, 12. Puerto Arturo

Figura 10. Dinámica espacio temporal, de fósforo, clase textural y pH durante el ciclo anual 2016-2017. Mapa elaborado en L-7 P.B UIMIF7

## Discusión

A lo largo de las temporadas la proporción de arcillas, no presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) (Tabla 2); siendo la fracción arenosa la que tuvo mayor dominancia en el cuerpo acuático. Este efecto podría ser adjudicado a la acción de la barrera arenosa al verter su propio material dentro del sistema lagunar. Además, esta barrera tiene la capacidad de retener la mayor parte de energía de olas o mareas, reduciendo de manera considerable la energía al interior del sistema lagunar Grande. El comportamiento que siguió el sistema lagunar en las temporadas no concuerda del todo con lo citado por De Falco *et al.* (2004), ya que durante la temporada de lluvias existe un mayor acarreo de sedimentos finos por las descargas pluviales y fluviales que ocasionan la resuspensión de los mismos, agregando que complementariamente, se produce, un efecto de lavado con la consecuente resuspensión del sedimento. Los resultados difieren con lo descrito por este autor, pues durante la temporada de nortes las arcillas están representadas con un 27%, siendo éste, el valor más elevado con respecto a las temporadas de secas y lluvias. Efecto se probablemente se debe hidrodinámica mareal y/o de corrientes influenciadas por los vientos, que influyen tanto en la distribución espacial como en el transporte de sedimentos.

Debido a que las arenas presentan una alta porosidad y según lo reportado por Núñez Vázquez y Salas (1986) señala que a medida que la textura se hace más gruesa, el nivel de fósforo disponible disminuye. Como consecuencia las partículas gruesas fueron descartadas como elementos de adsorción de fósforo, al igual que los limos, ya que éstos últimos presentan pocas propiedades coloidales. Por lo que, las arcillas toman gran relevancia durante procesos de adsorción, al poseer una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos de los silicatos  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ , se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ , que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando una estructura pseudo hexagonal. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ . Como tal, las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que en gran proporción son el producto final de la meteorización de los silicatos que, en el medio exógeno se hidrolizan. Como consecuencia se presenta, un valor elevado del área superficial activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interactuar con muy diversas sustancias (Galán 1990).

**Tabla 2.** Prueba estadística Kruskal-Wallis de la proporción de arcillas, entre las temporadas de secas, lluvias y nortes.

**Prueba Kruskal-Wallis. Arcillas**

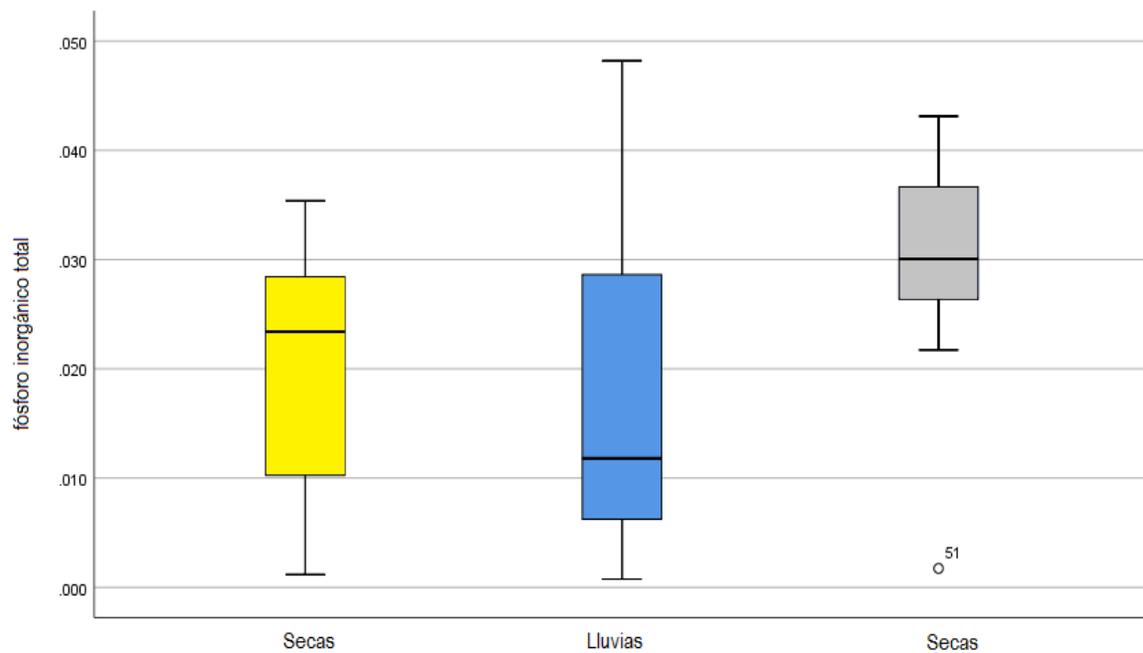
	Nortes	Secas	Lluvias	
Mediana	25	23.715	21.81	
Rango de suma	971	732.5	924.5	
Conteo	22	20	30	72
r <sup>2</sup> /n	42856.4091	26827.8125	28490.0083	98174.2299
H-stat				5.14207745
H-ties				5.14397969
Df				2
P valor				0.0763834
Alfa				0.05
Significancia				no

En cuanto a las concentraciones del fósforo inorgánico total, se determinó diferencia en la temporada de nortes con secas, y aquella de lluvias con nortes como (Tabla 3). La temporada de nortes presenta el valor de media más alta para el fósforo inorgánico total ( $\bar{x} \approx 0.030 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ ). Mientras que el menor valor de media más bajo se presentó en la temporada de lluvias ( $\bar{x} \approx 0.011 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ ). Las fluctuaciones de los valores promedio en las concentraciones del fósforo inorgánico total, están influenciadas por las características climáticas propias de cada temporada. La zona de estudio presenta un clima tropical húmedo, con predominancia de la temporada de nortes, característica por intensos vientos provenientes del norte del Golfo de México. Mientras que, en la temporada de lluvias, el sistema lagunar funciona como una cuenca receptora de la descarga de los arroyos y caños provenientes de las partes altas de la cuenca de Colipa, y ahora, complementada por la descarga directa de los afluentes urbanos locales.

**Tabla 3.** Prueba estadística Kruskal-Wallis, en concentraciones de fósforo inorgánico total durante secas, lluvias y nortes.

**Prueba Kruskal-Wallis**  
**Fósforo total inorgánico**

	secas	lluvias	nortes	
Mediana	0.0234113	0.0117953	0.0300993	
Rango de suma	658.5	839	1130.5	
Conteo	20	30	22	72
r <sup>2</sup> /n	21681.1125	23464.0333	58092.2841	103237.43
H-stat				16.7018948
<b>H-ties</b>				16.7040434
df				2
P valor				0.00023592
Alfa				0.05
Significancia			Si	



**Grafico 6.** Distribución temporal de fósforo inorgánico total.

Durante las temporadas de secas-lluvias y lluvias-nortes, los valores de pH muestran notables diferencias significativas (Tabla 4), indicativas de los cambios constantes de este parámetro. Una de las principales causas que modifican el pH en los sistemas costeros, está dada por el intercambio de CO<sub>2</sub> atmosférico y el agua, que generan ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). La inestabilidad de este compuesto hace que se formen sales, las cuales quedan disueltas en el agua como carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) asociados a iones de carga positiva como el Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y el Ca<sup>++</sup> (Contreras 2002). En presencia de un mayor número de compuestos de carga negativa el pH, en el agua salobre, resulta ligeramente alcalino, con un valor promedio de 8.2 (Broecker 1974). En cambio, el agua de origen continental generalmente posee valores neutros; por lo anterior, se esperaría que los registros de pH natural dentro de la laguna varíen en torno a ese último valor o con una tendencia a la alcalinidad. Además, los fenómenos atmosféricos provocan efectos colaterales sobre el potencial de hidrógeno, aunado a las descargas de afluentes urbanos que de manera inmediata puede llegar acidificar o por el contrario alcalinizar el ambiente. Se debe considerar el efecto provocado por acarreo de materiales a través de aguas epicontinentales, el cual, también podría ser una de las causas principales (Amado *et al.*, 2014).

**Tabla 4.** Prueba estadística Kruskal-Wallis de las concentraciones de pH entre las temporadas de secas, lluvias y nortes

**Prueba Kruskal-Wallis.**  
**pH.**

	Secas	Lluvias	Nortes	
Mediana	7.3	7.7	7.8	
Rango de suma	405.5	1231	991.5	
Conteo	20	30	22	72
r <sup>2</sup> /n	8221.5125	50512.0333	44685.1023	103418.648
H-stat				17.1156349
H-ties				17.2817954
Df				2
P valor				0.00017673
Alfa				0.05
Significancia				Si

- Parámetros ambientales en temporada de seca

Diferencias climáticas entre las temporadas de secas y lluvias, indican la existencia de condiciones ambientales que afectan la concentración del fósforo inorgánico total presente en los sedimentos del sistema. Una de las más importantes es la variación en la profundidad que presenta el sistema. En la temporada de secas, al disminuir el afluente de los arroyos y el aporte por lluvia, el volumen de agua se reduce notablemente, variando a lo largo de la temporada hasta por un metro en su profundidad, ocasionando que la intensidad y fuerza del viento influyan notablemente en la dinámica sedimentaria (Andersen y Ring 1999). Los resultados obtenidos muestran que la concentración de fósforo inorgánico total ocupa el segundo lugar, con respecto a las otras dos temporadas, en orden decreciente con un promedio  $\bar{x} \approx 0.018 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ . Además, se registró un mayor asentamiento entre arcillas y limos, que podría indicar que los fenómenos meteorológicos no son tan intensos como para crear un gran impacto en la sedimentología. En promedio se registraron valores de pH alrededor de 7.1, siendo el más bajo en relación a las demás temporadas, entonces al contar con estudios para conocer concentraciones de otros elementos, se podría deducir que tendría que existir un complejo calcio/arcillas que eventualmente conduciría a la formación de apatita, insoluble en condiciones de pH y potencial redox, correspondientes a sedimentos oxigenados. Esta reacción, aunque es lenta (meses), puede aportar a los sedimentos entre 2 y 5 veces la cantidad de fósforo (Torres 2012; Froelich 1988).

- Parámetros ambientales en temporada de lluvias

La temporada de lluvias comprende los meses de junio a octubre, y al igual que lo documentado por Gómez y Reséndiz (2002), los promedios de arenas durante esta temporada se encontraron en mayor porcentaje, consecuencia de los fenómenos meteorológicos de lluvias y tormentas, y la dinámica mareal, que modifican la dinámica hidrológica y por ende la composición textural al ejercer mayor resuspensión de los sedimentos, otorgándole mayor heterogeneidad al sistema (Psuty et al. 2009). El régimen de inundaciones, en la interfase sedimento agua, puede generar condiciones anóxicas que influyen en la adsorción o desadsorción final del fósforo, al reducirse el  $\text{Fe}^{3+}$  y la consiguiente solubilización de los óxidos-hidróxidos de hierro que conlleva a la liberación de fósforo a la columna de agua, generando la liberación y en consecuencia un empobrecimiento del sedimento. Este efecto también puede producirse por procesos de mezcla (diferencia en los gradientes de concentración) o por bioturbación. Con un valor de  $\bar{x} \approx 0.015 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ , en esta temporada se representa al menor valor del fósforo inorgánico total. Con un pH de  $\bar{x} \approx 7.5$ , valor que podría no estar directamente relacionado,

pues la adsorción del fósforo no siempre está ligado al potencial de hidrógeno, entonces la variación en la concentración como señala Wool *et al.* (2001), a través del tiempo, depende principalmente de la mineralización del fósforo orgánico y de la descomposición del fitoplancton muerto. Estos procesos hacen que dicha concentración aumente en el medio. Por el contrario, el consumo por parte del fitoplancton y la sedimentación del mismo, la disminuyen.

- Parámetros ambientales en temporada de nortes

La temporada de nortes se caracteriza por la presencia frentes fríos y fuertes vientos, que generan intenso transporte eólico de la arena a lo largo y ancho de playas y sistemas costeros (Gómez y Reséndiz 2002; Condie 1994). Por lo que se registra un aumento considerable de nutrientes, al presentarse lo que se conoce como “ascenso de nutrientes”, provenientes de los nutrientes acumulados como resultado de la temporada de lluvias; los cuales al inicio de la temporada de nortes permanecen estables y conforme ésta avanza, el efecto eólico empezaría a influir gradualmente en las concentraciones del fósforo contenido en los sedimentos, como resultado de procesos de descomposición de la materia orgánica (por ejemplo, degradación de hojarasca de manglar) que de manera continua se presentan en el sistema, y de esta forma incrementa las concentraciones del fósforo inorgánico total (Swart y Reyneke 1988; Schoonees y Barwell 1991). En esta temporada, generalmente, la boca de la laguna, que conecta con el mar al sistema lagunar, se cierra debido al arrastre litoral de arena que viaja de norte a sur, incrementando la altura de la barra, además el aporte de agua continental que desemboca al mar es insuficiente para desalojar los sedimentos acumulados. Entonces el enriquecimiento de fósforo total inorgánico, sería consecuencia directa de procesos de remoción y mezcla que ocurre con los sedimentos en la columna de agua. Lo anterior descrito concuerda en parte con los resultados obtenidos, pues durante los meses febrero y marzo, a pesar de que la arena sigue en mayor proporción existió una ligera disminución, haciéndose más notoria en incrementándose las proporciones de arcillas y limos. Este incremento sería propiciado por el efecto que causa el viento sobre la laguna, además cuando la barrera arenosa se cierra, provoca un estado pasivo al interior de la laguna afectando positivamente la suspensión y la redistribución de partículas finas en el sedimento. A grandes rasgos estas situaciones fueron favorecidas, gracias a un pH promedio de 7.7 el cual de manera generalizada sería un valor alto y representativo para la temporada, pues la precipitación del fosforo se da en medios alcalinos y es directamente proporcional a la cantidad de pH presente.

A) Composición Textural, concentración de fósforo total inorgánico y pH en subsistema “La Barra”.

En el subsistema “La Barra”, durante las tres temporadas, la cantidad de arena se mantuvo en proporciones que oscilaron en valores promedio de 88.4%. Mientras que las arcillas y limos se mantuvieron en menores proporciones (Gráfico 7). Esta zona es la conexión entre el ambiente marino y el sistema lagunar, en consecuencia existe un alto nivel de energía, y por la poca profundidad de la barrera arenosa que conforma la boca, al ingresar la corriente marina, por efecto de la marea alta, ésta inmediatamente pierde velocidad, disminuyendo gradualmente la capacidad de carga, y por consiguiente se depositan primero las partículas más pesadas con textura gruesa las cuales soportan más la tracción de las olas, mareas o corrientes marinas. De acuerdo a los valores establecidos en torno al fósforo inorgánico se registraron concentraciones mínimas, las cuales varían dentro de un intervalo de 0.0007 a 0.0017  $\frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ , el efecto de lavado es ocasionado por la carencia de la fracción fina, la cual retiene la mayor parte de fósforo, y aunado a un pH promedio de  $\bar{x} \approx 6.1$ , ocasiona la liberación del fósforo hacia la columna de agua. Durante la temporada de secas, inicialmente, la concentración del fósforo presenta valores relativamente bajos, 0.0011 a 0.0013  $\frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ , y a medida que avanza la temporada, disminuyen gradualmente durante agosto-septiembre, de manera que se puede deducir que la temporada de lluvias alcanzó un máximo durante septiembre-octubre momento en el cual la concentración aumenta indicando una mayor aporte de elementos traza, dicho aumento es gradual alcanzando un máximo en la temporada de nortes.

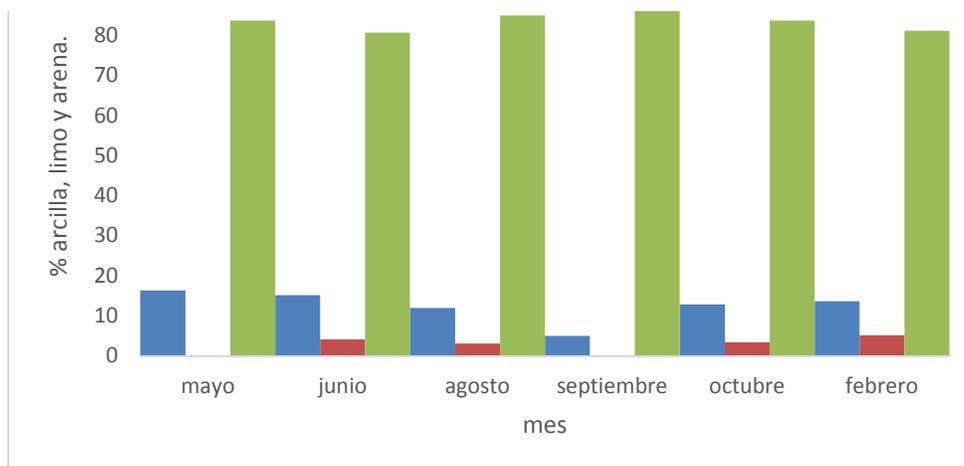
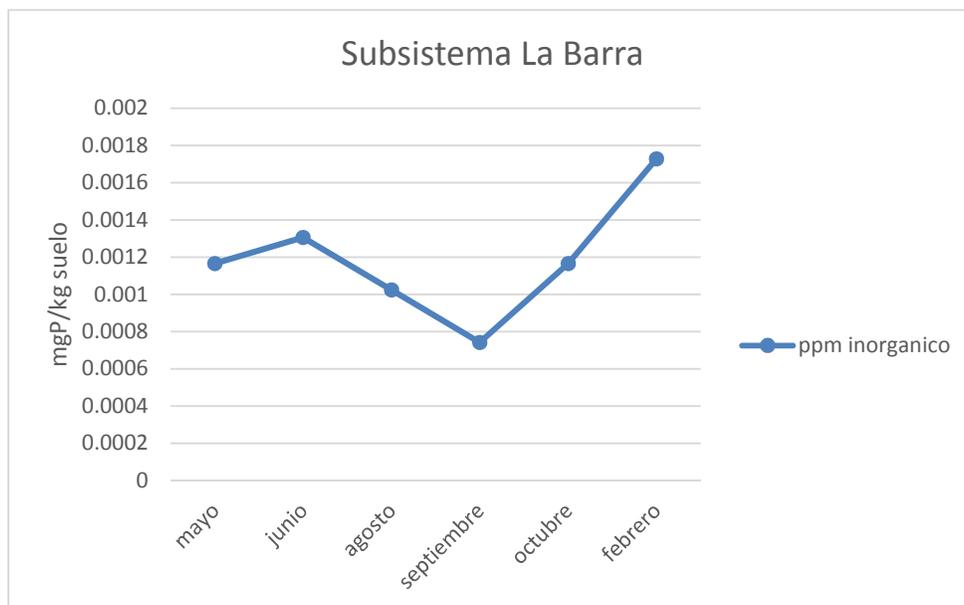


Gráfico 7. Distribución de las partículas sedimentarias en el subsistema “La Barra”, durante el ciclo anual.

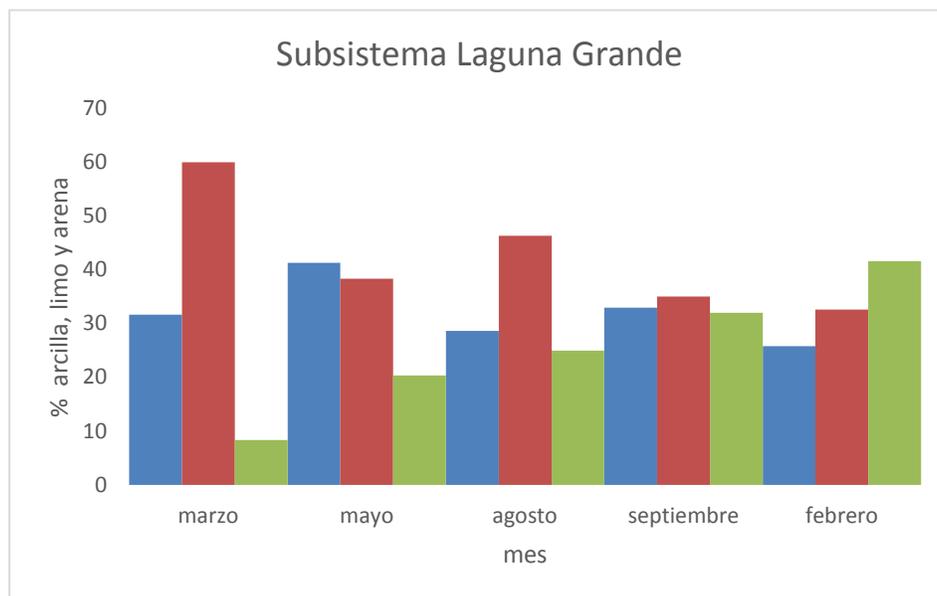


**Gráfico 8.** Dinámica mensual promedio del fósforo total inorgánico en el subsistema “La Barra”.

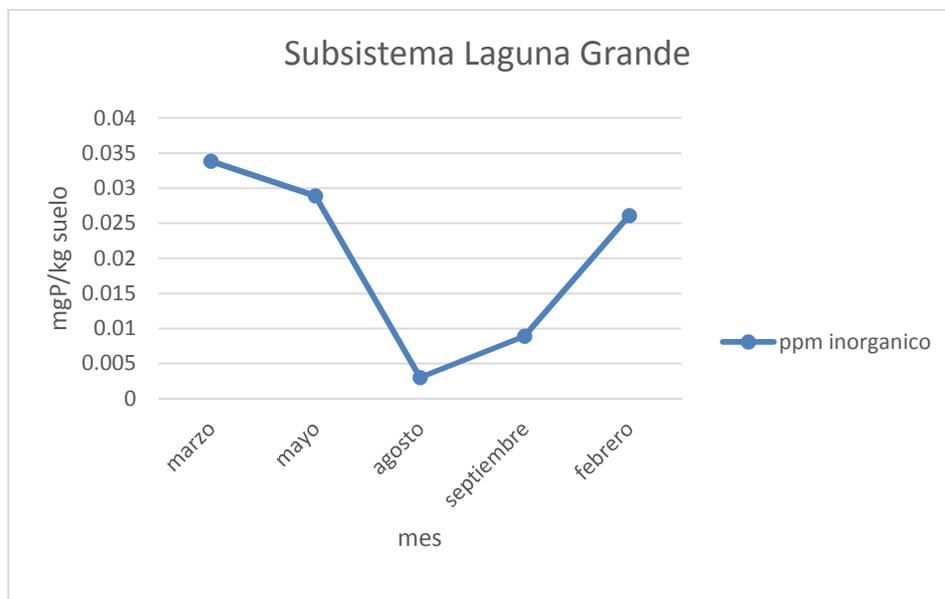
## B) Composición Textural, concentración de fósforo total inorgánico y pH en subsistema “Laguna Grande”

Dentro del sistema lagunar Grande la energía que ingresa es moderada, debido a la barrera con poca profundidad que se encuentra formando la entrada que conecta al mar con el sistema lagunar, así como a la baja en la profundidad del sistema. En consecuencia, en los sedimentos predomina el depósito de texturas arcillosa 32% y limosa 42% (Gráfico 9). La presencia de arenas dentro del sistema lagunar podría atribuirse al desplazamiento de las partículas pesadas, a través de vientos sureños, que son directamente desprendidas por erosión eólica en la boca arenosa del subsistema La Barra y sus alrededores. Durante el mes de mayo (temporada de secas), se presentó de manera definida la acción que tiene las arcillas para adsorber el fósforo inorgánico total, pues ambos, arcillas y fósforo se determinaron en mayor proporción. En esta temporada (secas), el aumento en la temperatura del agua provoca que el potencial de evaporación aumente y consecuentemente disminuya la profundidad. Eventualmente se produce fricción con la velocidad y capacidad de carga, lo que promueve un estado pasivo al interior del sistema, de manera que se deposita con mayor facilidad partículas finas. Durante los meses de agosto-septiembre (temporada de lluvias), con la incorporación de una mayor cantidad de arenas que en temporada de secas, teóricamente, se presenta la pérdida del fósforo inorgánico total; efecto atribuible a la precipitación pluvial, que se refleja en el aporte de los arroyos y caños con diversos materiales terrígenos, introducidos al sistema lagunar. Además, de la resuspensión del fósforo que yacía en las profundidades. En el mes de febrero (temporada de nortes), la proporción de

arenas fue mayor en relación con los demás periodos, indicando que este mes estuvo marcado por una mayor actividad del viento impactando sobre los márgenes; pero surge una anomalía, ya que también la concentración del fósforo inorgánico total es alta en el mes de mayo (temporada de secas), donde es evidente la disminución de arenas, asentándose mayores cantidades de limos seguido de arcillas, lo cual eventualmente generó mayor cantidad de fósforo inorgánico total presente durante este mes. El Gráfico 10, muestra las concentraciones de fósforo total inorgánico del ciclo anual de colectas (Gráfico 10), donde se obtuvieron valores medianamente elevados ( $\bar{x} \approx 0.02 \frac{\text{gP}}{\text{Kg de suelo}}$ ), puede ser consecuencia directa de la interacción de aguas someras con arroyos (El Carey, El Diamante y El Huanal) y los caños, los cuales incorporan sus contenidos de origen antrópico que eventualmente puede sobrecargar el contenido neto de fósforo en el sistema lagunar. De manera global el aumento o disminución es a mayor escala en comparación con el subsistema “La Barra”, durante secas el valor es elevado, y disminuye de manera abrupta en la temporada de lluvias; y a finales de esta última temporada, el fósforo inorgánico total pasa por un incremento hasta llegar a la temporada de nortes, cerrándose de esta manera el ciclo temporal.

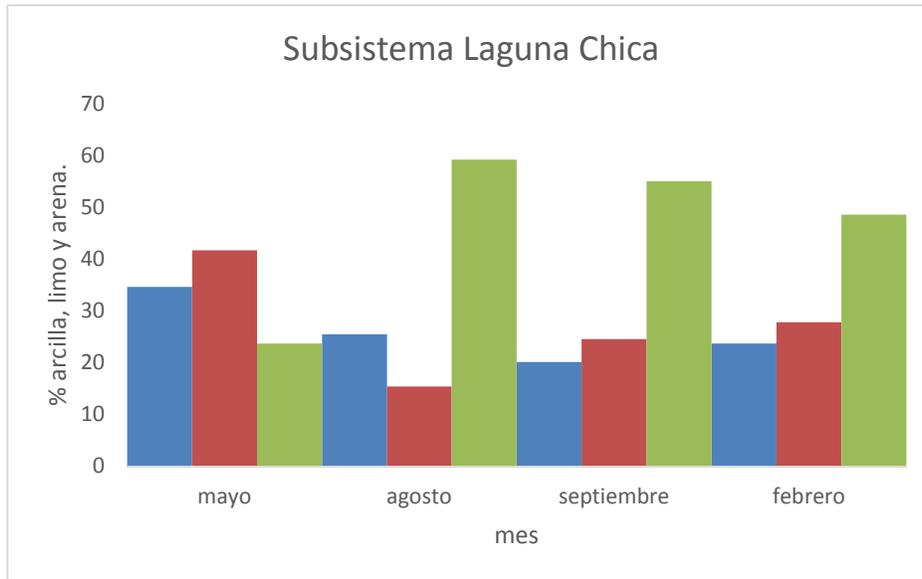


**Gráfico 9.** Distribución de las partículas sedimentarias en el subsistema “Laguna Grande”, durante el ciclo anual.

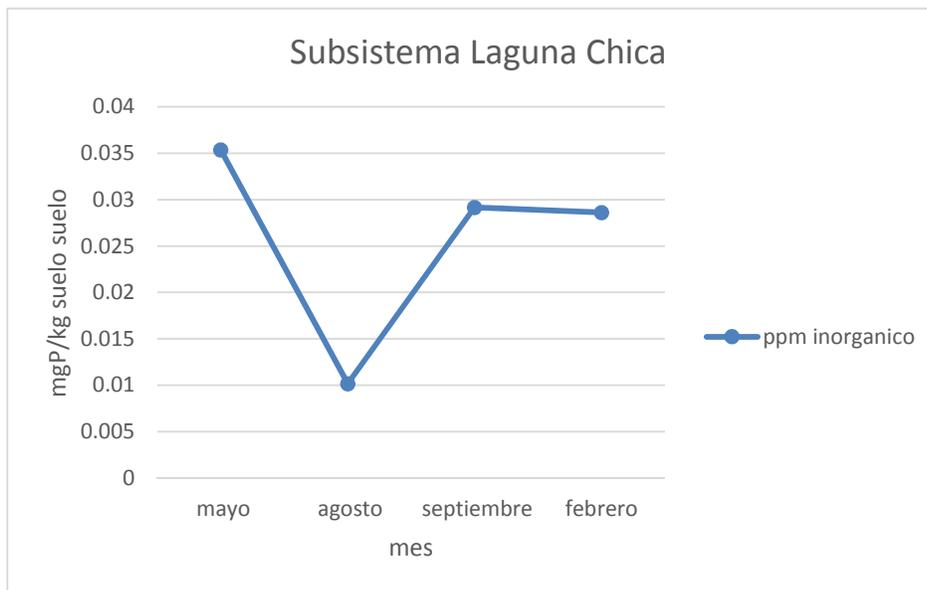


**Gráfico 10.** Dinámica mensual promedio del fósforo total inorgánico en el subsistema “Laguna Grande”.

C) Composición Textural, concentración de fósforo total inorgánico y pH en subsistema “Laguna Chica”  
 El subsistema lagunar “Laguna Chica”, forma de cuenca con área reducida, el resultado sedimentológico concuerda con lo establecido por (COBINABE 2010), registrándose valores promedio de 46.6 % para arenas, 25.9% para arcillas y 27.3% para limos (Gráfico 11). Dichas características reactivan la velocidad con la que llegan las corrientes de flujo y reflujo de la marea, cuando chocan con los márgenes que contienen al subsistema, modificando así la hidrodinámica y aumentando el nivel de energía en esta porción de la laguna, de esta manera no se alcanza a depositar uniformemente los limos y arcillas que se encuentran suspendidas en la columna de agua. Este fenómeno como tal, no acredita los resultados en torno a las concentraciones de fósforo inorgánico total, ya que su ingreso puede ser un efecto secundario de la actividad humana, pues cerca de los márgenes de la estación de recolecta denominada “Puerto Arturo”, en donde se realiza la agricultura de algunos frutos como la sandía (*Citrillus* sp.) y gramíneas como el frijol (*Phaseollus* sp.), incorporándose al cuerpo de agua, compuestos químicos agrícolas, arenas y elementos traza. El fósforo total inorgánico de este subsistema (Gráfico 12), es similar al del subsistema Laguna Grande, discrepando solo en la temporada de nortes, donde se presenta una tendencia hacia la disminución. A pesar de que este subsistema se encuentra situado en un lugar en donde los efectos provocados por oleaje o mareas es menor, el ingreso del fósforo puede estaría influenciado ligeramente por el subsistema Laguna Grande.



**Gráfico 11.** Distribución de las partículas sedimentarias en el subsistema “Laguna Chica” durante el ciclo anual.



**Gráfico 12.** Dinámica mensual promedio del fósforo inorgánico total en el subsistema “Laguna Chica”.

### **Estado Trófico**

Uno de los problemas ecológicos central de la condición del estado trófico de los estuarios en general, es creado por el efecto antrópico. Como lo menciona Hupfer (1995), el problema se correlaciona con la concentración de fósforo en los sedimentos, donde altas concentraciones de fósforo tienen su origen principalmente por el aporte de material alóctono derivado de los escurrimientos epicontinentales locales por medio de la industria, agrícola, así como los asentamientos humanos, aledaños al sistema lagunar costero. Sin embargo, este proceso de eutrofización puede ser también consecuencia directa de la escasa capacidad de retención del fósforo por parte del sedimento. Las concentraciones de fósforo promedio en los sedimentos costeros se encuentran en el rango aproximado de 0.1 a 7 g P- $\text{PO}_4^{3-}$ /kg en peso seco de sedimento.

Las concentraciones de fósforo total sedimentario del presente estudio, resultan relativamente bajas con respecto a los valores observados en otros sedimentos, de cuerpos acuáticos costeros, como lo manifiestan las investigaciones de Bortleston y Lee (1972, 1975), y Bloesch (1977), donde se registran concentraciones de 0.35 a 0.70 gr P- $\text{PO}_4^{3-}$ /kg sedimento. Mientras que el área de estudio se tienen concentraciones que varían de 0.0007 a 0.048 gr P- $\text{PO}_4^{3-}$ /kg de sedimento.

La dinámica espacio temporal de fósforo total inorgánico, está relacionada directamente con la variación de los parámetros medio ambientales que de manera inmediata afectada la disposición de este elemento, y por lo tanto la productividad primaria del complejo lagunar estuarino. Los resultados obtenidos en torno al potencial de hidrógeno, composición textural y fósforo inorgánico total, evidencian una estrecha relación, haciendo a esta última dependiente de la otra. Estudios realizados indican que la porosidad afecta de manera contundente la asimilación de materia orgánica y otros elementos. En este sentido, Fabiano y Danovaro (2004), Heß (2004), y Rullkötter (2006), mencionan que, a un menor tamaño de partícula, menor penetración del oxígeno disuelto, favoreciéndose la acumulación de materia orgánica y viceversa. Las arenas, presentan granos de mayor tamaño en comparación con limos y arcillas, lo cual conllevan a mayores tasas de eliminación de la materia orgánica por descomposición bacteriana. Por ende, para la retención de cualquier nutriente, es esencial la cantidad de partículas finas que constituirá a el sedimento. La existencia de baja porosidad en la asimilación de fósforo, requiere la presencia arcillas, pues al estar constituidas por minerales amorfos, bajo condiciones ácidas se enlaza al  $\text{Al}^{3+}$ , o al  $\text{Fe}^{3+}$ ; y en un medio alcalino la unión se lleva a cabo por la existencia carbonatos de calcio y magnesio (Ogrinc y Faganeli 2006).

## Conclusión

- El sistema lagunar-costero Grande, se encuentra estructurado en mayor proporción por arenas. Se presentaron ocho clases texturales, de las cuales tres dominaron a lo largo del ciclo anual: franca (29%), franco arcillo arenosa (25%) y franco arcillosa (20%). En menor proporción se encuentran las clases franco arenoso (11%), arcillosa (4%), franco limosa (4%), areno francosa (3%) y arenosa (1%). La barra presento una textura dominante franca. En Laguna Grande las texturas dominantes son; franco arcillo arenosa, franco arcillosa y franca. En Laguna chica se hizo notoria la presencia de texturas francas.
- La concentración del fósforo inorgánico total, durante el ciclo de colectas, presentaron una variación de 0.00074 a  $0.0481 \frac{\text{gP}}{\text{Kg de suelo}}$ .
- De acuerdo con los valores establecidos por los tres subsistemas que conforman Laguna Grande, durante la temporada de secas, La Barra, presentó concentraciones diferentes significativamente a Laguna Grande y Chica. En la temporada de lluvia esta discrepancia solo se presenta en la relación La Barra y Laguna Grande. Por lo que se concluye que el subsistema La Barra presenta un comportamiento independiente del resto de los subsistemas. Durante el ciclo anual La Barra registro en promedio  $0.018 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$ , Laguna grande  $0.023 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$  y Laguna chica  $0.022 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}}$  respectivamente.
- El valor mayor promedio en la concentración del fósforo inorgánico total, corresponde a la temporada de nortes fue de  $(x \approx 0.030 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}})$ , seguido de la temporada de secas  $(x \approx .019 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}})$ , y la temporada de lluvias presenta los menores valores  $(x \approx 0.016 \frac{\text{mgP}}{\text{Kg de suelo}})$ . Estas variaciones en las concentraciones del fósforo inorgánico total se acentuaron para la temporada de nortes, ya que difiere significativamente del resto de las temporadas.
- De acuerdo al criterio de Janus y Vollenweider (1981), y según los valores promedio del fósforo inorgánico total, se puede citar que el sistema lagunar Grande se encuentra en un estado ligeramente eutrofizado.

## Bibliografía

- Amado L., A. Ayala-Pérez, O. Vasco-Villa, y A. Sosa-López. 2014. Evaluación de las asociaciones de peces dominantes influenciados por el ciclo nictimeral y la variación temporal en la Reserva de la Biosfera los Petenes, Campeche, México. Área 2. Biología y Química. Ciencia VIAT. A (1):13-43.
- Andersen O.F. y P. Ring. 1999. Comparison of phosphorus released from littoral and profound sediments in a shallow, eutrophic lake. *Hydrobiologia*. 408/409: 175–183.
- Arenas V. y G. De La Lanza. 1990. El metabolismo como determinante de intercambio de nutrientes en sedimentos ricos en materia orgánica en una laguna costera. *Ciencias Marinas*, 16 (3):45-62.
- Babor J.A. y J. Aznárez-Ibarzá. 1977. Química general moderna Ed. Época, S.A., México. 387-398 pp.
- Bak R.P.M. y G. Nieuwland. 1992. Responses of benthic heterotrophic nanoflagellates to settlement of organic matter under experimental conditions. *Neth. Inst. Sea Res.*, 40:35-38.
- Barry R. 1980. The definition of sandy beaches in relation to exposure: a simple rating system. *S. Afr. J. Sci.* 76: pp.137-138.
- Black, C.A., 1968 . Soil-plant relationships . John Wiley & Sons Inc., N.Y., 792 pp.
- Bloesch J. 1977. Sedimentation rates and sediments cores in two Swiss lakes of different trophic state. *In: Interactions between sediments and freshwater* (H.L. Golterman, ed.): 65-71. Junk. The Hague.
- Bloomfield M.M. 1993. Química de los organismos vivos 1ª ed. Ed. Limusa, México. 502-504 pp.
- Boon P.I. y S. Cain. 1988. Nitrogen cycling in salt-marsh and mangrove sediments at Western Port, Victoria. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 39:607-623.
- Bortleson G.C. y G.F. Lee. 1972. Recent sedimentary of Lake Mendota. *Environmental*, 6:799-808.
- Bortleson G.C. y G.F. Lee. 1974. Phosphorus, iron and manganese distribution in sediment cores of six Wisconsin lakes. *Limnol. Oceanog.* 19: 794-801.
- Bostrom B., J.M. Andersen, S. Fleischer, y M. Jansson. 1988. Exchange of phosphours across the sediment–water interface. *Hydrobiology*, 170, 229-244.
- Broecker W.S. 1974. *Chemical oceanography*. Hartcutt Brace J. Inc. 214 pp
- Brown T. y E.H. Lemay. 1988. *Chemistry the Central Science* 4ª ed. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs. New Jersey pp. 785-789.
- CEPAL 2002. La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. División de Recursos Naturales. 63 pp.
- Chávez L., R. Rocha, y R. Ramírez. 2005. Cambios en los ensamblajes de peces del sistema lagunar Alvarado (SLA), Veracruz, México. *Revista Digital Universitaria*; 6(7):3. ISSN: 1067-6079.
- COBINABE. 2010. Generación y transporte de sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo. Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. Recuperado de:
- Condie S. Formation and stability of shelf break fronts. *J. Geophys. Res.*, 98 (C7):12405–12416, 1994.
- Contreras F. 2000. Las lagunas costeras mexicanas y su importancia para la biodiversidad. México. 20-128.

- Contreras F. 2002. Los humedales costeros mexicanos. Capítulo 4. En: F.J. Abarca y M. Herzig (eds.). Manual para el manejo y la conservación de los humedales de México. Tercera Edición. Publicación especial bajo colaboración de la Dirección General de Vida Silvestre-SEMARNAT, Arizona Game and Fish Department, North American Wetland Conservation Act, U.S. Fish and Wildlife Service, Convención Ramsar, U.S. State Department, Ducks Unlimited of Mexico-A.C., Pronatura Noreste, Canadian Wildlife Service y Society of Wetlands Scientists. Phoenix, Arizona, EE.UU.
- Dame R., T. Chrzanowski, K. Bildstein, B. Kjerive, H. McKellar, D. Nelson, J. Spurrier, S. Stancyk, H. Stevenson, J. Vernberg y R. Zingmark (1986). The outwelling hypothesis and North Inlet, South Carolina. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 33: 217-229.
- De Falco G., P. Magni, L.M. Terasvuori, y G. Matteucci. 2004. Sediment grain size and organic carbon distribution in the Cabras Lagoon (Sardinia, Western Mediterranean). *Chem. and Ecol.* 20 (Suppl. 1):367-377.
- De La Lanza E.G. 2001. Características físico-químicas de los mares de México. Instituto de Geografía. UNAM, Plaza y Valdés editores de México.
- De La Lanza, E.G. 1994. Química. *In: De La Lanza E.G. y C.C. Martínez. Lagunas costeras y el litoral mexicano. 1ª edición. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 72 p.*
- DeAngelis D.L., P.J. Mulholland, A.V. Palumbo, A.D. Steinman, M.A. Huston, and J.W. Elwood. 1989. Nutrient dynamics and food-web stability. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 20: 71-95.
- Fabiano M., R. Danovaro, y S. Fraschetti. 1995. A three-year time series of elemental and biochemical composition of organic matter in subtidal sandy sediments of the Ligurian Sea (northwestern Mediterranean). *Continental Shelf Research.* 15 (11/12). [1453-1469].
- Farías L., L.A. Chuecas, y M.A. Salamanca. 1996. Effect of coastal upwelling on nitrogen regeneration from sediments and ammonium supply to the water column in Conception Bay, Chile. *Est. Coast. Shelf. Sci.*, 43:137-155.
- Farías, L., M.A. Salamanca, y L.A. Chuecas. 1994. Variaciones estacionales del flujo de partículas y contenido de materia orgánica a la interfase agua-sedimento en Bahía Concepción, Chile central. *Cienc.Tec. Mar. CONA*, 17:15-31.
- Fourqurean J.W., R.D. Jones, y J.C. Zieman. 1993. Processes influencing water column nutrient characteristics and phosphorus limitation of phytoplankton biomass *in: Florida Bay, FL, USA: Interferences from spatial distributions. Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 36: 295-314.
- Froelich P.N. 1988. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: a primer on the phosphate buffer mechanism. *Limnol. Oceanogr.*, 33: 649-668.
- Gachter R. y J.S. Mayer. 1993. The role of microorganisms in mobilization and fixation of phosphorus in sediments. *Hydrobiologia*, 253, 103-121.
- Galán H.E. 1990. "Arcillas". *In: Recursos Minerales de España. Coord. J. García Guinea y J. Martínez Frías. Textos Universitarios (C.S.I.C.) 15. pp23-25.*
- García E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen, México, D.F.

- García, Galvis J. y M.I. Ballesteros. 2006. Evaluación de los parámetros de calidad para la determinación de fósforo disponible en suelos. Disponible en:
- GCBV-VI. 2005. Genetics and microbiology research group. Disponible en [http://www.unavarra.es/genmic/cursomicrobiología general/ciclosbiogeoquímicos.htm](http://www.unavarra.es/genmic/cursomicrobiología%20general/ciclosbiogeoquímicos.htm)
- Gómez A. 1996. Causas de la fertilidad marina en el nororiente de Venezuela. *Interciencia* 21: 140-146
- Gómez, Ramírez M., e I.N. Reséndiz-Espinosa. 2002. Seguimiento de nortes en el litoral del Golfo de México en la temporada 1999-2000. *Revista Geográfica* 131: 5-19.
- Google. (s.f.). (Mapa de México, Veracruz en Google maps). Recuperado el 20 de octubre, 2018, de <https://www.google.com/maps/@20.0708078,-96.6651213,11816m/data=!3m1!1e3>
- Gunkel G. 2003. Limnología de un lago tropical de alta montaña, en Ecuador: Características de los sedimentos y tasas de sedimentación. *Rev. Biol. Trop.*, 51(2): 381-390.
- Hargra V.E.N.T. 1980. Factors affecting the flux of organic matter to sediments in a marine bay In: TENOR E, R.K. and COULL, B. e. (Eds.), *Marine Benthic Dynamics*, 243 -264. University of South Carolina Press.
- HEß M. 2004. Los sustratos de fondos arenosos. In: Hofrichter, R. (Editor). *El Mar Mediterráneo. Parte I*. [384-403].
- Hipsey M.R., J.R. Romero, J.P. Antenucci, y D. Hamilton. 2006. "Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v2", v2.3 Science Manual, University of Western Australia. [http://www.oas.org/DSD/WaterResources/projects/Bermejo/Publications/Generacion0Transportede20sedimento senlacuencadelRioBermejo.pdf](http://www.oas.org/DSD/WaterResources/projects/Bermejo/Publications/Generacion0Transportede20sedimento%20enlacuencadelRioBermejo.pdf).
- Hupfer M. 1995. Bindungsformen und Mobilität des Phosphors in Gewässersedimenten. In C. Steinberg, H. Bernhard & H. Klapper (eds). "Angewandte Limnologie". Ecomed, Landsberg, IV-3-2: 1-22.
- Ingall E. y H. Jahnke. 1997. Influence of water column anoxia on the elemental fractionation of carbon and phosphorus during sediment diagenesis. *Mar. Geol.* 139:212-229.
- Janus L.L. y R.A. Vollenweider. 1981. The OECD Cooperative Programme on Eutrophication: Summary Report - Canadian Contribution. Inland Waters Directorate Scientific Series No. 131, Ministerio del Medio Ambiente de Canada, Burlington, Ontario, Canadá.
- Jensen, H.S., P.B. Mortensen, F.O. Andersen, E. Rasmussen, y A. Jensen. 1995. Phosphorus cycling in coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark. *Limnol. Oceanogr.* 40(5): 908-917.
- Keizer P.D., B.T. Hargrave, y D.C. Gordon. 1989. Sediment-water exchange of dissolved nutrients at an intertidal site in the upper reaches of the Bay of Fundy. *Estuaries*, 12 (1): 1-12.
- Lankford R.R. 1977. Coastal lagoons of Mexico. Their origin and classification. In: M. Wiley (ed.), *Estuarine processes*. Nueva York: Academic Press, 182-215 pp.
- Law C.S., A.P. Rees y N.J.P. Owens. 1991. Temporal variability of denitrification in estuarine sediments. *Est. Coast. Shelf. Sci.*, 33:37-56.
- Lickens G. E. (Ed.). 1972. Nutrients and eutrophication. *Limnol. Oceanogr. Pub. Esp.* 1: 378 p.

- Lohse L., J.F.P. Malschaert, C.P. Slomp, W. Helder, y W. Van Raaphorst. 1993. Nitrogen cycling in North Sea sediments: interaction of denitrification and nitrification in offshore and coastal areas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 101: 283-296.
- López P. 2004. Spatial distribution of sedimentary P pools in a Mediterranean coastal lagoon "Albufera d' esGrau" (Minorca Island, Spain). *Mar. Geol.*, 203, 161-176.
- Margalef R. 1983. *Limnología*. Barcelona. Ed. Omega. 1010 p
- Melgar, Ricardo (1998). "Nuevas herramientas y conceptos tradicionales en el diagnóstico de fertilidad de suelos". XVI
- Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- McLachlan A. 1983. The Ecology of Sandy Beaches in the Eastern Cape, South Africa. In: McLachlan A., Erasmus T. (eds) *Sandy Beaches as Ecosystems*. Developments in Hydrobiology, vol 19. Springer, Dordrecht
- Naumann E. 1930. Einführung in die Bodenkunde der Seen. Die Binnengewässer IX. E. Schweizerbart, Stuttgart. Págs. 129-138 en: Esteves, F. 1983. Levels of phosphate, calcium, magnesium and organic matter in the sediments of some brazilian reservoirs and implications for the metabolism of the ecosystems. *Archiv für Hydrobiologie* 96
- Nixon S.W. 1980. Between coastal marshes and coastal waters-a review of twenty years of speculation and research on the role of salt marshes in estuarine productivity and water chemistry. In: P. Hamilton and K. B. MacDonald (eds.), *Estuarine and Wetland Processes*. Plenum Publ. Corp., New York: 437-525.
- Nixon S.W., S.L. Granger, I.D. Taylor, P.W. Johnson, y B.A. Buckley. 1994. Subtidal volume fluxes, nutrient inputs and the brown tide - an alternate hypothesis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 39: 303-312.
- Núñez Vázquez, F. y H.P. Salas, 1986. Evaluación de niveles de disponibilidad de fósforo en la región central de Córdoba. *Rev. Agron. Manir* . 2(2):34-39.
- Parsons T.R., M. Takahashi, y B. Hargrave. 1977. *Biological Oceanographic*. 2nd. Edition. Pergamon Press. Oxford.
- Peluso M.L. 2011. Evaluación de efectos biológicos y biodisponibilidad de contaminantes en sedimentos del río de la plata y afluentes. Doctorado. Centro de Investigaciones del Medio Ambiente, CIMA, Departamento de Química, Facultad De Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Exactas.
- Pérez B. L. 1999. Concentración, distribución y fraccionamiento geoquímico del fósforo en sedimentos de dos lagunas costeras del noroeste de México. Tesis de Maestría. (Oceanografía Química)- UNAM-Colegio de Ciencias y Humanidades-Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado. 67p.
- Postma H. 1969. Chemistry of coastal lagoons, p. 421-430 In A. C. Ayala & F. B. Pheger (Eds.). *Lagunas costeras*. Un Simposio. UNAM/UNESCO., Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Psuty N.P., M.L. Martínez, J. López-Portillo, T.M. Silveira, J.G. García-Franco y N.A. Rodríguez. 2009. Interaction of alongshore sediment transport and habitat conditions at Laguna La Mancha, Veracruz, Mexico. *Journal of Coastal Conservation* 12: 77-87.
- Raaphorst, van W., H.T. Kloosterhuis, A. Cramer, y K.J.M. Bakker. 1990. Nutrient early diagenesis in the sandy sediments of the Dogger Bank area, North Sea: Pore water results. *Neth. Jour. of Sea Res.*, 26 (1):25-52.

- Raaphorst, van W., T. Kloosterhuis, E.M. Berghuis, A.J.M. Gieles, J.F.P. Malschaert, y G.J.vanNoort. 1992. Nitrogen cycling in two types of sediments of the Southern North Sea (Frisian Front, Broad Fourteens): field data and mesocosms results. *Neth. Jour. of Sea Res.*, 28 (4):293-316.
- Rosas H. 2001. Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya. 330 pp
- Rullkötter J. 2006. Organic matter: The driving force for early diagenesis. In Schulz, H. D., y Y M. Zabel (Editores). *Marine Geochemistry*. [125-162].
- Sadzawka R.A, M.A. Carrasco-R., R. Grez-Z., M.L. Mora-G., H. Flores-P., y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis de suelos recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N° 34, Santiago, Chile, 164 p.
- Salvador, Ferreras F. 2006. Hidrodinámica de lagunas costeras (Apuntes de texto de posgrado de las postrimerías del siglo XX). México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Sánchez, Carrillo S. y M. Álvarez-Cobelas. 2001. Nutrient dynamics and eutrophication patterns in a semi-arid wetland: the effects of fluctuating hydrology. *Water, Air and Soil Pollution*. 131: 97-118
- Sandoval, Estada M. y E. Zagal. 2008. M. Manejo de suelos en zonas áridas. (Eds.). Estructura y agregación en los suelos. Universidad de Concepción. Chillán, Chile. p118.
- Santoyo, R. H. 1994. Fitoplancton y productividad. *In: De La Lanza E. G. y Martínez, C. C. 1994. Lagunas costeras y el litoral mexicano. 1ª edición. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 24 p.*
- Santschi P., P. Höhener, G. Benoit, y M.B. Brink. 1990. Chemical processes at the sediment-water interface. *Mar. Chem.*, 30:269-315.
- Schoonees J.S. y L. Barwell. 1991. Waenhuiskrans: Sediment budget and reactivation of a sediment pathway. *En: C. Nicholas, N.C. Kraus, K.J. Gingerich y D.L. Kriebel (Eds.). Coastal Sediments. Proceedings of a Specialty Conference on Quantitative Approaches to Coastal Sediment Processes. American Society of Civil Engineers, Estados Unidos de América. Pp. 2277-2291.*
- Swart D.H. y P.G. Reyneke. 1988. The role of drift sands at Waenhuiskrans, South Africa. *Journal of Coastal Research (Special Issue) 3: 97-102.*
- Teague K.G., C.J. Madden, y J.W. Day. 1988. Sediment-water oxygen and nutrient fluxes in a river-dominated estuary. *Estuaries*, 11(1):1-9.
- Torres, F.J.L. 2012. Flujo de nutrientes en la interfase agua-sedimento del sistema acuático tropical: lago de Maracaibo. República bolivariana de Venezuela. Universidad del Zulia. Facultad Experimental de Ciencias. División de Estudios para Graduados. Doctorado en Química. 177pp.
- Valdés D. y E. Real. 1994. Flujos de amonio, nitrito, nitrato y fosfato a través de la interfase sedimento-agua en una laguna costera tropical. *Ciencias Marinas*, 20(1):65-80.
- Vidal M. 1994. Phosphate dynamics tied to sediment disturbances in Alfacs Bay (NW Mediterranean). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 110: 211-221.
- Wetzel R.G. 1975. *Limnology* ed. Saunders College Pub. USA. 458 pp.
- Wetzel R.G. 1981. *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona. 679 pp.

- Wool T.A., Ambrose R.B., Martin J.L., Comer E.A. 2001. "Water quality analysis simulation program (WASP)", US Environmental Protection Agency, Atlanta, GA, 652 pp.
- Zambrano R., C. Romero, M. Robledo, J. Bautista, O. Najera y L. González. 2005. Niveles de contaminación por metales pesados en sedimentos y peces de la Presa Aguamilpa, Nayarit. Universidad Autónoma de Nayarit. México. 6 pp.