



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DETERMINACIÓN DE PLOMO EN
Thalassia testudinum
DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
QUÍMICA FARMACÉUTICA BIÓLOGA
P R E S E N T A :
BLANCA ROSA BONILLA HEREDIA



MÉXICO, D.F.

AÑO 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente Prof. Silvia de Jesús Mendoza Arellano

Vocal Prof. José Alberto Alarcón Díaz

Secretario Prof. Ana María Martínez Vázquez

1er. Suplente Prof. Elba Rojas Escudero

2º. Suplente Prof. Marcos Flores Alamo

Sitio en donde se desarrolló el tema:

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

Nombre del asesor del tema:

DRA. ANA MARÍA MARTÍNEZ VÁZQUEZ

Nombre del sustentante:

BLANCA ROSA BONILLA HEREDIA

AGRADECIMIENTOS

- ❖ Expreso mi sincero agradecimiento a cada uno de los miembros del jurado por sus valiosos comentarios, sugerencias y observaciones para mejorar esta tesis: QFB Silvia Mendoza, Dr. Alberto Alarcón, Dra. Ana Martínez, Dr. Marcos Flores y M. en C. Elba Rojas.
- ❖ Agradezco a la DGAPA por el apoyo financiero otorgado a través del proyecto PAPIIT clave IN-202506.
- ❖ A CONACYT, por la beca proporcionada durante la realización de este trabajo.
- ❖ A la CONANP y Francisco Remolinas, director del APFF Yum Balam.
- ❖ A la Dra. Rubicelia Vargas, por sus acertadas observaciones y oportunos consejos.
- ❖ Al Lic. Marco Antonio Sánchez por su ayuda en el formato y la presentación de esta tesis.
- ❖ Por último, mi más grande agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme orgullosamente formar parte de su comunidad a través del Colegio de Ciencias y Humanidades, la Facultad de Química, El Cepario de la FQ, El Instituto de Investigaciones en Materiales y la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Estaré eternamente agradecida con la UNAM porque no sólo me dio la oportunidad de formarme profesionalmente, también me proporcionó todos los elementos para ser una mejor persona.

DEDICATORIA

Hoy, 28 de Mayo de 2009, escribo esta dedicatoria tratando de reconocer a todos aquellos que han sido piezas fundamentales en mi historia.

Quiero dedicarte con toda mi admiración este trabajo a ti **MAMÁ**: Por todo lo que me has dado en la vida, por tu esfuerzo, por tu valor, por tu coraje, por ser mi compañera, mi confidente, un hombro para llorar, por ser maravillosa.

Con el corazón en la mano esto va también para ti **PAPÁ**. Por los muchos años que me costó comprenderte: Perdóname Papá... Te quiero mucho.

A mi hermano **OSCAR**: Por el cariño infinito que te tengo y que siempre te tendré. Por los buenisimos momentos que hemos compartido, las risas, el llanto, las peleas, los secretos y la complicidad. Aprovecho para decirte que tienes en tus manos la maravillosa oportunidad de vivir: No la desaproveches! Yo te voy a adorar por siempre.

A **RAÚL Y PEPIS**, porque las buenas pláticas, los jalones de orejas, y el cariño que me han demostrado, han contribuido enormemente a que disfrute de cada uno de los momentos de mi vida. También a **OLIVIA, MARÍA Y MARIBEL**, por todo su apoyo. Somos una gran familia, sólo nos falta formar un buen equipo. Gracias a todos ustedes por estar a mi lado. Estoy orgullosa de la familia que me tocó.

A mis primos: **CRIS Y ALAN**. Por las magnificas sorpresas que aun les faltan por vivir.

Sin más palabras dedico mi trabajo a los HERMANOS que la vida me dio: **ROMPE, ENANO, AMADOR, BRUCE Y HUNGA**.

A mis mejores amigos: **REYNA, GÜERO, DIEGO, TORO, BASO, HOJITA, DANIEL Y FABIOLA**. Por todos aquellos instantes maravillosos que hemos pasado juntos. No tengo palabras para agradecer a cada uno de ustedes el ser como son y todo lo que me han dado.

A la Sra. **Fabiola Sepúlveda**, de quien he acumulado una deuda impagable de cariño y favores: muchas gracias por confiar en mí.

A **Carmelita Gamma**, por abrirme las puertas de su divertido corazón.

A mis "primis": **Katia, Txayo** y a mi amiga **Kari**, por todo lo que me hacen reír, aún en los peores momentos.

A todos los que compartimos el agradable trabajo con la Dra. Ana Martínez: **Pilar** (que juntas hemos construido una divertida amistad. Hoy te amenazo con no dejarte ir de mi vida porque me caes muy bien), **Job** (amigo: me caes super!), **Xam y Fran** (aunque no podamos vernos a menudo les tengo muchísimo aprecio).

A la **Dra. Rubi Vargas**, por su amistad sincera, su confianza y su comprensión.

A la Dra. **Ana Martínez**. Ana eres un excelente ejemplo tanto profesional como personal. Agradezco toda tu confianza en mí. Gracias por ser mi asesora. Te admiro mucho.

A mis amigos: **Inés Almaguer, Rocío Espino, y Javier Calderón y Carolina Rocha.**

Al Cepario de la Facultad de Química, Al **QFB Alejandro Camacho, QFB Antonieta Silva, QFB Martha Giles, Laura Ortiz y a las "Lupitas"**. Gracias por aceptarme en su equipo de trabajo y por regalarme su tiempo y su amistad.

Agradezco al Sr. Luis Marín por toda la confianza, amabilidad y buen trato hacia mi persona, pero sobre todo, por tener un hijo (el mayor) tan guapo.

A mis colegas: **Marvin, Angie Pumar, Carlo Iván, José Galván, Juan Carlos Ruíz, Sandra Juárez, Rorro Gutiérrez, Pablo Argott, Violeta, Arturo, Juanito, Gaby Contreras, Jeanette Maqueda, Marceñoño y Myriam Márquez.** Gracias por enseñarme a sonreír entre vasos de precipitados y cambios de pH.

A **KALI**: por tu amor tierno y sincero. Terminamos la carrera!!

A los niños, por ser la alegría de la casa: **Goy, Fae, titos, Beige, kiwi y Choi.**

Por último, quiero dedicar esta tesis al ángel de mi vida:

- *Por nuestra historia increíble y maravillosa;
- *Por los mas de diez años de amarnos, cerca o lejos...
- *Por las buenas y divertidas anécdotas que vivimos juntos. Sabes? Eres uno de los mejores recuerdos de mi adolescencia;
- *Por los malos y malísimos momentos que hemos compartido;
- *Porque lo mejor de nuestra historia aún esta por venir;
- *Porque LA VIDA NOS QUIERE JUNTOS, TANTO QUE SIEMPRE VUELVE A UNIRNOS EN LAS SITUACIONES MÁS INVEROSÍMILES;
- *PORQUE CREES EN MI Y PORQUE CREO EN TI, CON LOS OJOS CERRADOS;
- *Porque eres el sueño de mi vida y desde que te conozco he pensado en ti cada día;
- *Porque rescataste a la Goy;
- *Porque me apoyas en cada paso y en cada decisión;
- *Por nuestro proyecto de vida;
- *Porque me complementas, sin ti yo no sería lo que soy...
- *Podría darte mil razones más, pero tal vez la más importante sea muy pero muy simple, y es algo que durante todos estos años has hecho que crezca cada día, y es que:

Te AMO CON TODO MI CORAZON, todas mis células, el espacio intersticial y todos y cada uno de mis átomos...

TE amo IVAN.

*A mi AGÜE
Por tus maravillosos 100 años de vida.*

A mis abuelos: Rubén Heredia y Albina Téllez,
Que me enseñaron que hay pocos placeres tan grandes como leer un libro.

A mi amigo Sergio Rodríguez Franco: donde quiera que estés...

INDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
METALES PESADOS Y SU TOXICIDAD	3
PLOMO	6
Fuentes naturales de plomo.....	7
Principales usos del plomo.....	9
Rutas de exposición y contaminación por plomo.....	10
El plomo en el cuerpo humano.....	12
Toxicidad del plomo.....	14
Antecedentes históricos del envenenamiento por plomo...	20
¿QUÉ SON LOS BIOINDICADORES?	22
<i>Thalassia testudinum</i> y su importancia como bioindicador...	23
ZONA DE ESTUDIO	25
La Península de Yucatán.....	25
Estado de Campeche.....	26
Estado de Yucatán.....	27
Estado de Quintana Roo.....	29
ANTECEDENTES	32
OBJETIVOS	34
HIPÓTESIS	35
MATERIALES Y MÉTODOS	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
CONCLUSIONES	84
ANEXO I. Tablas de datos reportados	87
ANEXO II. Tratamiento de las muestras y Espectroscopia de Absorción Atómica	92
REFERENCIAS	99

RESUMEN

La contaminación es un problema que aqueja a la población mundial. En particular la contaminación por metales pesados proviene de actividades antropogénicas que provocan cambios en la distribución normal de los elementos en la naturaleza. Las aguas residuales, junto con la mala disposición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que provienen de actividades comunes como el turismo, provocan que la concentración de metales pesados varíe significativamente en los ecosistemas alterando el equilibrio ecológico.

La importancia de los metales pesados como contaminantes se debe principalmente a las graves alteraciones que causan en la salud y a su alta persistencia en el ambiente, además de que poseen otras características interesantes entre las que se destaca su resistencia a la degradación química y biológica. El riesgo de los metales pesados para los ecosistemas y para la salud depende de su biodisponibilidad, por lo que es muy importante evitar que los metales pesados lleguen a la cadena trófica.

Para determinar la presencia de metales pesados en el ambiente se utilizan bioindicadores, que son organismos que pueden acumular los contaminantes sin presentar alteraciones en sus funciones biológicas. En este proyecto se utiliza un pasto marino llamado *Thalassia testudinum*, que en México se encuentra distribuido a lo largo de las costas del Caribe y el Golfo de México. Es una especie que debido a su capacidad para acumular metales pesados sin aparentemente alterar sus funciones biológicas, es útil para indicar variaciones ambientales.

Este trabajo presenta un análisis cuantitativo de plomo por Espectroscopia de Absorción Atómica en muestras de *Thalassia testudinum* colectadas en las siguientes zonas de la Península de Yucatán: Campeche y Petenes en el estado de Campeche; Chelem, Celestún y Dzilam en el estado de Yucatán; Holbox, Contoy, Isla Mujeres, Chacmochuc, Punta Cancún, Punta Nizúc, Nichupté y Bojórquez en el estado de Quintana Roo. El objetivo es determinar el grado de contaminación por plomo en estas zonas y tratar de determinar sus posibles fuentes.

INTRODUCCIÓN

Una consecuencia invariable de la evolución social y económica de los seres humanos es la modificación en la distribución de los elementos en la naturaleza. La gran actividad comercial e industrial, y el desarrollo de tecnologías que benefician en cierta forma el desarrollo humano, han provocado el incremento y la generación de sustancias tóxicas que son emitidas al ambiente. Según la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente la contaminación se define como “la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes que causa desequilibrio ecológico”; entendiendo como contaminante a cualquier sustancia ajena, presente en un sistema natural en una concentración más elevada de lo normal por causa de actividades antropogénicas directas o indirectas (Castillo, 2004).

Los contaminantes llegan a los sistemas acuáticos por diferentes rutas, entre las que podemos mencionar las descargas industriales, los desechos procedentes de la agricultura y las actividades urbanas, y aquellos que son transportados por el aire para posteriormente depositarse en el agua (Valitutto, *et al*, 2006).

La contaminación en el agua se presenta principalmente por dos tipos de agentes:

*biológicos: se refiere a la presencia de bacterias u otros organismos vivos inicialmente no presentes en el ecosistema;

*químicos: entre cuyos contaminantes principales podemos destacar a los hidrocarburos aromáticos policíclicos, los pesticidas y los metales pesados (Lewis, *et al*, 2007).

El estudio de los metales pesados como contaminantes tiene gran importancia debido a su distribución, su toxicidad y su persistencia. Aunque algunos de ellos son esenciales para el metabolismo de los organismos, su incremento causa alteraciones en la salud.

Este estudio se enfoca a la contaminación química del agua por metales pesados; particularmente, se tratará el caso del plomo.

METALES PESADOS Y SU TOXICIDAD

Los metales pesados son elementos químicos que poseen densidades superiores a 5 g/cm^3 (Adriano, 2001), y cuyo peso molecular está entre 63.55 y 200.59 g/mol. Es importante destacar que dentro de esta clasificación también pueden encontrarse no metales o metaloides con propiedades químicas diferentes a los metales pesados (Volke, *et al*, 2005). Debido a esto, lo correcto sería llamarlos “metales traza”, ya que en el ambiente suelen estar en concentraciones muy pequeñas, del orden de partes por millón (ppm) ó partes por billón (ppb); sin embargo, al menos en el ámbito ecológico, el término “metales pesados” es más utilizado que el término “metales traza”. Las fuentes naturales de este tipo de compuestos son los depósitos minerales y las emanaciones volcánicas, y pueden estar presentes de forma natural o bien en ambientes ecológicamente alterados (Adriano, 2001).

Los elementos traza de mayor importancia en la contaminación de los ambientes acuáticos son los siguientes: plata, arsénico, cromo, cadmio, cobalto, cobre, manganeso, níquel, zinc, antimonio, mercurio y plomo. Debido a su toxicidad y a la bioacumulación que presentan a lo largo de la cadena trófica marina, es fundamental el estudio del mercurio y el plomo (Páez-Osuna, 1999).

Los metales pesados se clasifican con base en su efecto en los seres vivos en dos grupos:

a) metales esenciales: aquéllos cuya presencia es indispensable para llevar a cabo las funciones vitales y cuyo efecto en el organismo no puede ser sustituido por otro elemento. Es importante mencionar que aunque sean considerados como esenciales, un aumento desmedido en las concentraciones presentes en un organismo puede causar alteraciones en las funciones biológicas. Como ejemplos podemos citar el hierro, el cobre, el zinc y el manganeso (Cervantes, 1999).

b) metales tóxicos: aquéllos cuya presencia ocasiona la pérdida del equilibrio homeostático del organismo, además de que no presentan ninguna actividad fisiológica benéfica y por lo tanto representan un peligro para el desarrollo de los organismos vivos. Entre los metales tóxicos de mayor importancia encontramos el cadmio, el mercurio, el cromo y el plomo.

La causa de toxicidad de los metales pesados se puede analizar estudiando sus propiedades electrónicas y de reactividad. Si consideramos la configuración electrónica de los metales de transición, sus cationes tienen desocupado el último orbital "s" y por lo tanto pueden aceptar un par de electrones (ácidos blandos de Lewis); esta propiedad les permite enlazarse con bases blandas, como por ejemplo los restos de cisteína de las proteínas (Lavoisier, 2006), lo cual puede tener condiciones fatales porque esto puede impedir la síntesis de proteínas o bien, si se trata de una enzima, impedir su actividad. Cuando los cationes de los metales tóxicos se enlazan a cadenas de carbono, pueden aumentar su biodisponibilidad logrando introducirse a las células de la misma forma en que lo hacen los metales esenciales como el calcio (Cervantes, 1999).

En este punto es importante definir el término biodisponibilidad. En farmacología, la biodisponibilidad se define como la fracción de la dosis administrada de un fármaco (por ejemplo, por vía oral), entre la dosis que llega a la circulación sistémica. En ecología de ambientes marinos se define como la fracción del contaminante en el agua y en el sedimento que está disponible para la bioacumulación (Adriano, 2001), entendiendo por bioacumulación a la acumulación del contaminante en el organismo por todas las rutas posibles. La biodisponibilidad de un metal para el ser humano es definida como la fracción que es soluble en el ambiente gastrointestinal y que por lo tanto está disponible para la absorción (Poggio, 2008).

La biodisponibilidad de las sustancias está altamente relacionada con la solubilidad y la volatilidad. Diversos factores como los cambios de pH, la

temperatura, la salinidad y la concentración de óxidos, carbonatos y compuestos orgánicos en el agua, afectan las propiedades de los metales provocando que sean absorbidos más fácilmente por los organismos. Si una sustancia presenta alta solubilidad en agua y también es volátil, tiene muchas probabilidades de ser incorporada a las células (Arai, *et al*, 2007).

Si se presentan las condiciones adecuadas, los metales presentes en el ambiente pueden estar biodisponibles y por lo tanto ser absorbidos y acumulados. Cuando se llega a una concentración que inhibe la actividad metabólica y reduce el crecimiento del organismo, se dice que se ha alcanzado la concentración tóxica. Esta concentración es diferente para cada metal y para cada organismo. Es importante comentar que para afirmar que se ha llegado a la concentración tóxica no es necesaria la muerte del individuo (Cervantes, 1999).

Una vez que se ha alcanzado la concentración tóxica pueden presentarse diversos efectos adversos. Entre las principales causas de la toxicidad de los metales pesados podemos señalar las siguientes (Noriega, 2001):

- alteraciones bioquímicas;
- inhibición de los mecanismos de transporte celular;
- inhibición de la actividad de metales esenciales;
- alteraciones en el DNA;
- inhibición de la fosforilación oxidativa;
- reducción en la velocidad de la mitosis.

Ante esta situación, los organismos han desarrollado diversos mecanismos para minimizar los efectos adversos de los metales, entre los que podemos mencionar los siguientes (Cervantes, 1999):

- expulsión activa;
- secuestro del metal por los organelos;

- acción quelante por proteínas o péptidos;
- biotransformación (redox);
- unión del metal a la pared celular y a la membrana plasmática.

En el caso de las plantas, se presenta otro mecanismo de protección ante la exposición a metales pesados llamado evasión. La evasión consiste en impedir que se capte el metal excesivamente, evitando así, llegar a la concentración tóxica (Cervantes, 1999).

La captación de metales en las plantas puede darse mediante un proceso activo o pasivo (Páez-Osuna, *et al*, 2000). Al disminuir el pH, las raíces absorben las sustancias presentes en el suelo; éstas se almacenan en la raíz o son enviadas al tallo. En las hojas, la absorción se presenta de manera pasiva desde el aire, o bien, si se encuentra en el agua, desde ésta hacia los tejidos.

Uno de los metales pesados más tóxicos es el plomo, objeto de estudio de este trabajo. A continuación se presentan las características más importantes de este metal que están relacionadas con este trabajo de tesis.

PLOMO

El plomo pertenece a la familia IVA de la tabla periódica. En general, los elementos de esta familia forman compuestos con estados de oxidación 2+ y 4+; sin embargo, en el caso del plomo el estado de oxidación 2+ es el más estable. Esto se debe a que la configuración electrónica de valencia del plomo es $6s^26p^2$ y tiende a perder sólo los electrones del orbital 6p para formar Pb^{2+} . Es un metal color gris azulado o plateado muy maleable y muy denso. Es relativamente soluble en agua en presencia de nitratos, sales de amonio y anhídrido carbónico. Es muy resistente a la corrosión. En la siguiente tabla se presentan sus características fisicoquímicas:

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del Plomo

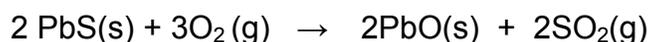
Número Atómico	82
Masa Atómica	207.2 g
Densidad	11.4 g/cm ³ a 20 ° C
Punto de Fusión	327.5 ° C
Punto de Ebullición	1740 ° C
Configuración electrónica	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²
Electronegatividad	1.9
Potencial Estándar de reducción Pb ²⁺ (ac) + 2 e ⁻ → Pb (s)	-0.13 V
1ª. Energía de ionización	716 kJ/mol
2ª. Energía de ionización	1451 kJ/mol

Ocupa el lugar 36 en abundancia en la corteza terrestre. Posee 4 isótopos naturales que se enlistan en relación a su porcentaje de abundancia: Pb²⁰⁸, Pb²⁰⁷, Pb²⁰⁶ y Pb²⁰⁴.

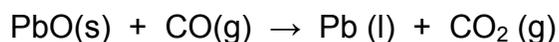
Fuentes naturales de plomo

En la naturaleza existen más de 200 minerales de plomo. Los más abundantes son la Galena (PbS), la Cerusita (PbCO₃) y la Analesita (PbSO₄). De menor importancia encontramos también a la piromorfita [Pb₅(PO₄)₃Cl] y la mimetesita [Pb₅(AsO₄)₃Cl]. La galena es la principal fuente de plomo. Esta se encuentra asociada con diferentes metales como el zinc, y en menor cantidad con cobre, hierro y cadmio (Arcega, 2006).

El plomo metálico se obtiene por el calentamiento del sulfuro de plomo (galena) en presencia de aire:



El óxido de plomo se somete a una reducción química con coque en un horno:



El plomo así obtenido se encuentra contaminado con diferentes metales (Cu, Ag, Zn, por mencionar algunos), pero es purificado en etapas posteriores del proceso por diferencias en los puntos de fusión y en la solubilidad (Arcega, 2006).

Los depósitos minerales, la erosión del suelo y las emanaciones volcánicas son las fuentes naturales de plomo. Las menas de galena, analgesita y cerusita contienen además de plomo otros metales como el Cu, Ag, Au, Zn, As y Sb. Generalmente las fundidoras buscan purificar a los otros metales y el plomo es obtenido como escoria en estos procesos (Arcega, 2006).

Las fuentes naturales de plomo emiten al ambiente cerca de 200 000 toneladas anuales de este metal entre las emanaciones volcánicas, la erosión del suelo y el desgaste de los depósitos minerales (Zecua, 2007).

México se encuentra entre los principales productores de plomo. Las fundidoras tienen como subproducto a este metal. Los depósitos de plomo se extienden en casi todo el territorio nacional, concentrándose en la región centro-norte, tal como lo muestra la Figura 1 (Sánchez, 2007).

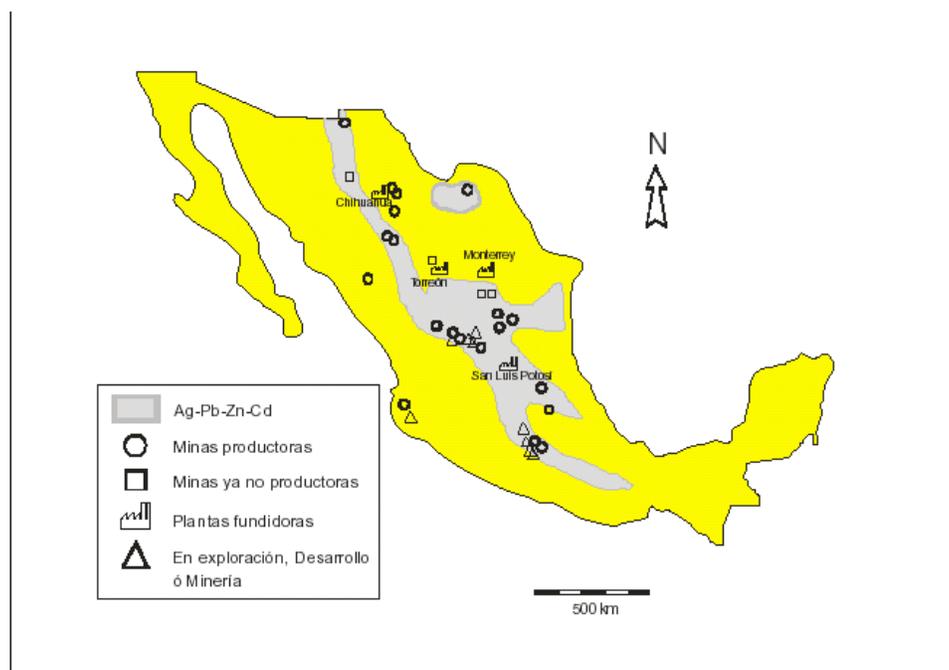


Figura 1. Minas de plomo en México y complejos metalúrgicos
(Sánchez, 2007)

Principales usos del plomo

A lo largo de la historia el plomo ha tenido diversos usos. Se ha utilizado para realizar adornos y en productos cosméticos para blanquear el rostro. Los egipcios lo utilizaron para la elaboración de figuras y amuletos. Se sabe que el acetato de plomo era utilizado como edulcorante en los vinos, debido a su sabor dulce agradable. En Grecia se utilizaba en el vidriado de la cerámica en recipientes usados para el consumo de alimentos y bebidas (Aranguren, 1999). En la época prehispánica también fue utilizado para la elaboración de joyas y artículos de cerámica vidriados (Sánchez, 2007).

En la era moderna se han dado diferentes usos al plomo. Se ha utilizado en la construcción, en la fabricación de tuberías, en el vidriado de utensilios de barro y de cerámica, en la elaboración de juguetes, en la fundición de metales y hasta en protectores de mamilas para niños (Aranguren, 1999). Todo esto se realizó antes de conocer los efectos tóxicos del plomo.

Actualmente el plomo se utiliza en la fabricación de acumuladores, de pigmentos, de insecticidas, de reactivos químicos, de soldaduras, de cubiertas para proteger los rayos X, de explosivos y de baterías de automóviles (EPA, 2006).

Su principal uso fue como aditivo en la industria del petróleo, particularmente en las gasolinas y las pinturas (EPA, 2006); además de emplearse en algunas actividades derivadas de la fundición. En las gasolinas se utilizó el tetrametilo de plomo y el tetraetilo de plomo para aumentar el octanaje. Esto provocó una enorme contaminación. Se calcula que en México se emplearon alrededor de 541000 toneladas de plomo en las gasolinas entre los años 1940 y 1997 (Arcega, 2006). A partir de 1997 se utilizan gasolinas sin este metal, y el octanaje se controla con hidrocarburos de cadena ramificada; sin embargo, los efectos de haber emitido tanto plomo aún pueden verse reflejados en la salud de la población.

La Norma Oficial Mexicana NOM-199-SSA1-2000 establece que el nivel máximo permisible de plomo en sangre de seres humanos es de 10 µg/dL. Un estudio realizado en niños entre los años 1982 y 1986 arrojó resultados alarmantes: el 80% de los niños tuvo una concentración de plomo por encima de los 10 µg/dL. La concentración máxima reportada fue de 25 µg/dL. El principal determinante de los niveles de plomo fue el lugar de residencia: aquellos niños que vivían cerca de grandes avenidas o calles concurridas presentaron niveles más elevados que aquellos cuya cercanía a emisiones automotrices era menor (Cebrian, *et al*, 1994). Habrá que esperar el resultado de estudios posteriores para saber los efectos del cambio en la composición de las gasolinas mexicanas.

En el sector industrial, el uso del plomo se concentra en la fundición del hierro, la plata y el acero; en la generación de energía a través de la combustión del carbón y el aceite; en las aleaciones de plomo; y en los materiales para soldaduras y las plantas de baterías (EPA, 2006).

Debido a estos usos es que las principales causas de contaminación ambiental por plomo han sido las emisiones provocadas por los automóviles, la producción de las pinturas, la solubilización del plomo presente en algunas estructuras y las actividades mineras.

Rutas de exposición y contaminación por plomo

La exposición a metales puede ocurrir por diversas vías, dependiendo del medio ambiente en que se habite. En el caso del plomo, las emisiones de este metal en el aire contribuyen al incremento de sus niveles en agua y suelos. Es por este motivo que la contaminación del aire es la ruta de exposición más importante (EPA, 2006).

El mal manejo del plomo como residuo en la industria minera puede ocasionar la acumulación en su entorno ya que puede ser absorbido por el suelo, volatilizarse o

movilizarse por las aguas superficiales o subterráneas (Zecúa, 2007). Tanto si es volatilizado como si es utilizado como aditivo en la industria, el plomo llega a la atmósfera y es transportado mediante dos mecanismos principalmente (EPA, 2006):

-deposición seca: es el proceso mediante el cual los contaminantes son removidos de la atmósfera en ausencia de precipitación;

-deposición húmeda: las partículas en el aire son arrastradas por la precipitación y removidas de la atmósfera.

Una vez que el plomo es transportado (ya sea por deposición húmeda o seca), llega a diferentes lugares como los alimentos, los suelos, las pieles de los animales y el agua (EPA, 2006). En la Figura 2 se ilustra la forma en que las personas entran en contacto con el plomo.

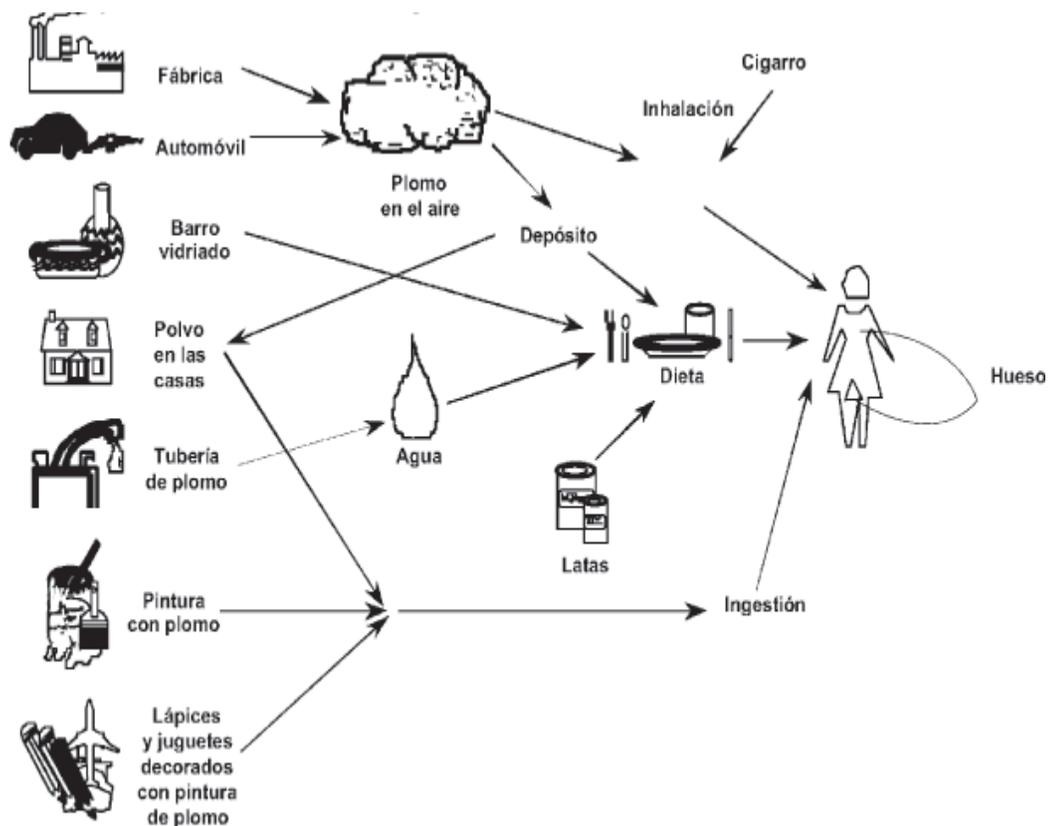


Figura 2. Formas de exposición de los seres humanos a los compuestos de plomo

(Romieu, 2003)

Como se muestra en la Figura 2, las fábricas y las emanaciones automotrices permiten que el plomo llegue al aire que respiramos. Si el plomo procedente de las emanaciones se deposita, es probable que sea ingerido en la comida. El plomo presente en los alimentos puede deberse a la preparación de éstos con agua contaminada, a que los productos vegetales o animales la han absorbido o a que se han preparado en utensilios de cerámica o barro vidriado que contienen plomo. Se estima que en 1990 se ingerían a través de los alimentos alrededor de 50µg de plomo diariamente en Estados Unidos (EPA, 2006).

Si el plomo en el aire llega al suelo, éste puede ser absorbido por los organismos presentes en el ecosistema, o bien, suspenderse nuevamente y llegar a la atmósfera. Se han observado casos en que los niños ingieren el plomo de los suelos contaminados al llevarse los dedos a la boca. La presencia de plomo en el agua es el resultado de los mecanismos de deposición ya mencionados. En el caso del agua potable, el plomo puede presentarse como consecuencia de la corrosión de las tuberías elaboradas con este metal y sus soldaduras (EPA, 2006).

De igual manera puede haber una exposición a compuestos de plomo mediante la utilización de pinturas o de juguetes que se encuentran elaborados con plomo. En los juguetes la exposición presenta al llevar éstos a la boca, pero también por el contacto del juguete con la piel. En el caso de las pinturas se ha observado que los habitantes de las viviendas pintadas con colorantes que contienen plomo presentan los síntomas típicos de la intoxicación crónica.

El plomo en el cuerpo humano

El plomo puede absorberse principalmente por dos vías: oral (gastrointestinal) e inhalatoria (respiratoria), aunque también puede presentarse absorción cutánea.

Por vía oral, la absorción varía con la edad. Se ha encontrado que los adultos absorben del 10 al 15 % del plomo ingerido mientras que los niños absorben el 40% (Goodman & Gilman, 2003). Otros autores afirman que los niños y las

mujeres embarazadas pueden absorber alrededor del 50 % del plomo que ingieren (Adriano, 2001), (Friberg, *et al*, 1990).

Aunque se conoce poco del transporte de plomo por la mucosa gastrointestinal, se piensa que éste puede competir con el calcio por un mecanismo de transporte común. Esto se deduce porque cuando se administra calcio en dosis similares a las del plomo, la absorción de plomo disminuye de un 10% a un 60 %. También se ha observado que individuos con dietas ricas en calcio, leche, hierro y vitamina D disminuyen la absorción del plomo en la mucosa gástrica (Adriano, 2001), (Friberg, *et al*, 1990), (Goodman & Gilman, 2003).

Una vez que el plomo es absorbido alrededor del 99% se une a la hemoglobina de los eritrocitos y sólo del 1 al 3 % está disponible para ser transportado hacia otros tejidos, principalmente tejidos blandos como riñones, hígado y cerebro, aunque gradualmente va acumulándose en el tejido óseo y en el cabello. Alrededor del 99% del plomo circulante quedará depositado en huesos y dientes. El plomo compite por el calcio para depositarse en los huesos, pero lo hace en forma de fosfato de plomo III, almacenándose en la hidroxiapatita (Doadrio, 2006), (Friberg, *et al*, 1990), (Goodman & Gilman, 2003). Un estudio realizado en la Ciudad de México en el año 2001 cuantificó la presencia de plomo en dientes, encontrando concentraciones desde 1.08 hasta 14.21 ppm. En un estudio realizado en 1990 (cuando aún se utilizaban gasolinas con plomo) se cuantificaron hasta 118.8 ppm (Espinoza, 2001). Esto prueba la importancia del uso de las gasolinas sin plomo.

La excreción del plomo se da principalmente por los riñones y el tracto biliar. Como la mayoría del plomo se encuentra unido a eritrocitos, es poco el plomo que se filtra por los riñones. También se excreta por el sudor, el pelo, las uñas, la leche materna y puede transmitirse al feto a través de la placenta (Adriano, 2001).

El tiempo de vida media de eliminación del plomo nos indica el tiempo que tarda en excretarse la mitad de la concentración de plomo presente en los tejidos. Para darnos una idea de la permanencia del plomo en el cuerpo, es interesante conocer

su vida media de eliminación en cada uno de los tejidos: en eritrocitos es de 25 a 60 días, en tejido blando de 40 días y en aproximadamente seis meses se logra un “equilibrio” en el que la ingestión de plomo es proporcional a su excreción y por tanto la concentración en tejidos permanece constante (Goodman & Gilman, 2003). En huesos el tiempo de vida media de eliminación del plomo es de 25 a 30 años (Adriano, 2001).

Toxicidad del plomo

La intoxicación por compuestos de plomo puede presentarse de manera crónica o aguda, siendo esta última, muy poco frecuente.

Intoxicación aguda

La intoxicación aguda se da por la ingestión de compuestos de plomo solubles, o por la inhalación de vapores orgánicos. Se manifiesta con dolor abdominal, sed, sabor metálico, vómito de aspecto lácteo por la presencia de cloruro de plomo y heces fecales de color negro por la formación de sulfuro de plomo. Cuando la absorción de plomo es muy rápida genera deshidratación excesiva y puede causar síndrome de choque. Sus efectos en el Sistema Nervioso Central van desde dolor y debilidad muscular hasta paresias (parálisis incompletas) por la irritación del nervio vago. En ocasiones puede presentarse anemia y hemoglobinuria intensa. Las personas intoxicadas pueden morir en uno o dos días, pero si logran vivir probablemente manifiesten los síntomas de la intoxicación crónica (Friberg, *et al*, 1990), (Goodman & Gilman, 2003).

Intoxicación Crónica

Es conocida como saturnismo o plumbismo y sus efectos se manifiestan en los diferentes tejidos que se enlistan a continuación:

a) *Efectos sobre el Sistema Nervioso Central (SNC)*. Se denomina encefalopatía saturnina y es más frecuente en niños que en adultos. En etapas tempranas causa torpeza, vértigo, ataxia, caídas, cefalgia, insomnio, irritabilidad e

inquietud. Al evolucionar la enfermedad se presenta confusión, convulsiones, vómito “en proyectil” y perturbaciones visuales. En niños, valores sanguíneos de 5 a 10µg/dL causan deterioro de las funciones mentales (EPA, 2006). Esto se manifiesta en la falta de percepción sensorial (lo que impide el aprendizaje), pérdida de las capacidades motoras e incluso del habla (Ellenhorn, *et al*, 1997), (Goodman & Gilman, 2003).

La reducción en la función mental se debe a que el plomo inhibe las fosforilaciones oxidativas y la 5-hidroxitriptofano-descarboxilasa, lo que reduce la concentración de serotonina en el cerebro (Lauwerys, 1994).

b) Efectos Neuromusculares: Se conoce también como parálisis saturnina y se manifiesta por debilidad muscular y fatiga. En las etapas finales de la enfermedad se presenta una parálisis completa que afecta a los grupos musculares más activos como los dedos, antebrazos y músculos extraoculares (Goodman & Gilman, 2003).

c) Efectos Hematológicos: Concentraciones en sangre desde a 20 a 80 µg de plomo/dL causan anemia. Los eritrocitos acumulan ácido ribonucleico como consecuencia de la inhibición de la enzima pirimidina-5'-nucleotidasa (UMP hidrolasa), así que al microscopio se observan moteados (Goodman & Gilman, 2003). La UMP hidrolasa cataliza la desfosforilación de ribonucleósidos monofosfato de pirimidina a sus correspondientes nucleósidos. La anemia también puede producirse por el acortamiento de vida de los eritrocitos o por la inhibición de la síntesis de hem (WHO, 1996). El plomo interfiere con la actividad de varias enzimas involucradas en la biosíntesis de hem en varios puntos como lo muestra la siguiente figura:

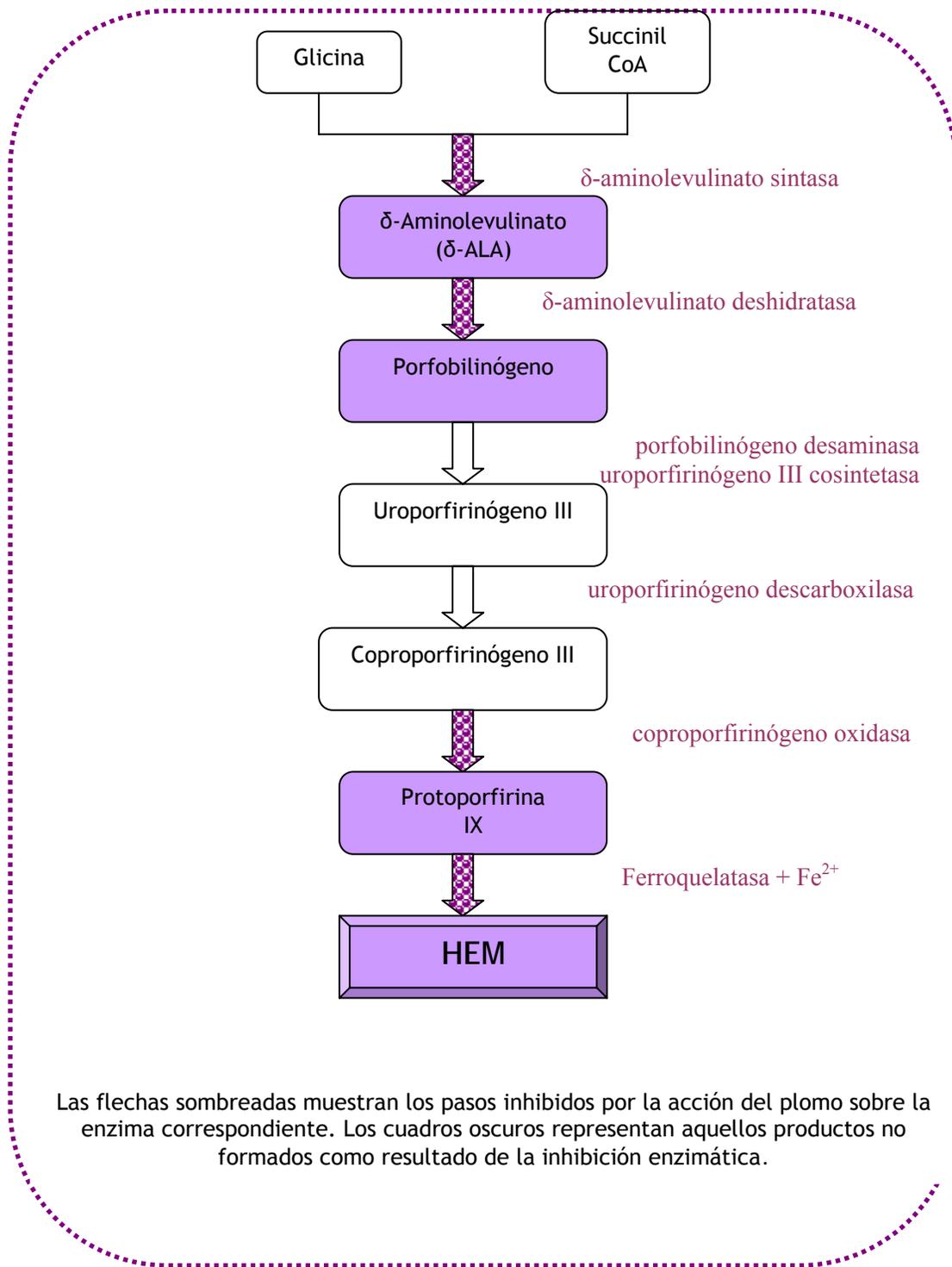


Figura 3. Biosíntesis de Hem y su inhibición por compuestos de plomo

Como puede observarse en la Figura 3, los compuestos de plomo inhiben a la δ -aminolevulinato deshidratasa (δ ALAD), que cataliza la síntesis de porfobilinógeno, un precursor de la hemoglobina (Schmitt, *et al*, 2002). Dado que se disminuye la concentración de hem, se provoca una reacción de incremento de la δ -aminolevulinato sintasa, provocando la acumulación de δ -aminolevulinato, que es una neurotoxina (WHO, 1996); el hem regula la síntesis de la δ -aminolevulinato sintasa por retroinhibición (Goodman & Gilman, 2003). El plomo también inhibe la actividad de la ferroquelatasa, que al igual que la δ ALAD, es dependiente de sulfhidrilo (Goodman & Gilman, 2003); se piensa que el plomo, al tener características ácidas, puede unirse a sulfhidrilo inactivándolo (EPA, 2006). La inhibición de la ferroquelatasa provoca la acumulación de protoporfirina eritrocitaria (protoporfirina IX).

d) Efectos Gastrointestinales: El plomo afecta el músculo liso del intestino causando anorexia, molestias musculares, espasmo intestinal o “cólico saturnino”. Los músculos abdominales en la región del ombligo se observan rígidos (Goodman & Gilman, 2003). Si la exposición se da por periodos prolongados puede causar la muerte (Ellenhorn, *et al*, 1997).

e) Efectos Renales: se manifiesta con un trastorno tubular reversible, o bien, con una neuropatía irreversible (Goodman & Gilman, 2003). El daño a los riñones es causado por la aparición de complejos plomo-proteína en células epiteliales del tubo proximal, que son excretados en la orina (WHO, 1996). Estos efectos se dan a concentraciones en sangre de 40 -80 $\mu\text{g/dL}$.

f) Efectos en Tejido óseo: El plomo sustituye al calcio y es almacenado en huesos y dientes de animales, comprometiéndolos a la exposición crónica (EPA, 2006). Se manifiesta con la aparición de líneas negras características en las articulaciones de los huesos de crecimiento rápido, como son los de brazos y piernas (Domínguez, *et al*, 2001), como se muestra en la Figura 4:

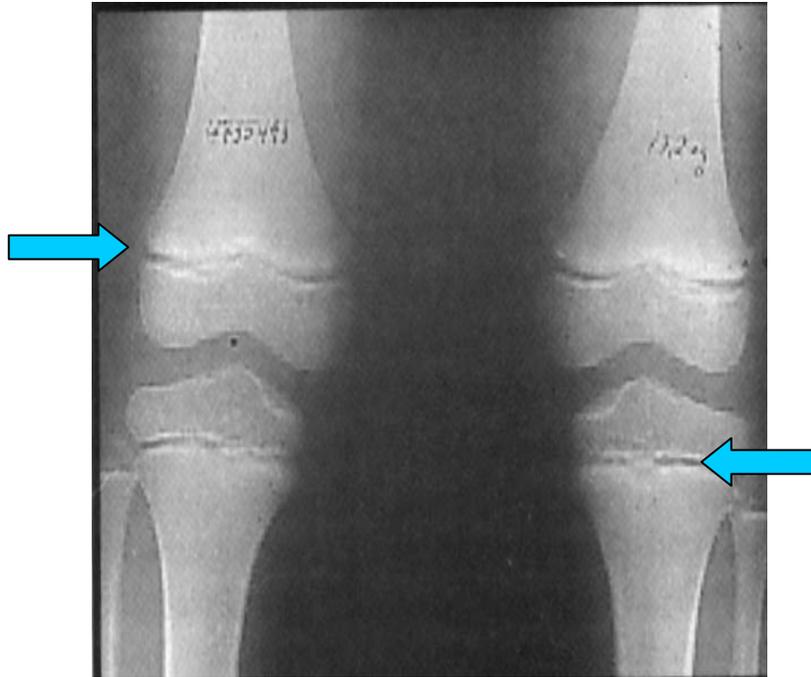


Figura 4. Acumulación de plomo en huesos de un niño de 12 años con concentraciones sanguíneas de 25.7 μg de Pb/dL

(Domínguez, *et al*, 2001)

El plomo interfiere con el metabolismo del calcio al inhibir al precursor de la vitamina D, el 1, 25-dihidroxicolecalciferol (WHO, 1996). También se han observado efectos de activación sobre la proteína C cinasa, la cual es dependiente de calcio (Bressler, *et al*, 1999). Los efectos sobre el metabolismo del calcio pueden provocar pérdida de peso, osteoporosis y caries dental.

g) Efectos cardiovasculares: incluyen un incremento en la presión arterial y en el riesgo de accidentes cerebro-vasculares (EPA, 2006), (Friberg, *et al*, 1990), (WHO, 1996).

h) Efectos endócrinos: Puede presentarse hipospermia (menor número de espermatozoides), daño testicular (aunque la exposición no produce esterilidad) y elevación de los niveles de corticosterona (EPA, 2006).

En general, las personas con saturnismo presentan los siguientes signos: palidez de los labios, aspecto de envejecimiento prematuro y tono cenizo de la piel. Es

común la aparición de la “línea saturnina” en el borde gingival (Figura 5), que es un línea negra consecuencia del depósito del sulfato de plomo (Goodman & Gilman, 2003).



Figura 5. Línea Saturnina

El diagnóstico de la intoxicación se realiza mediante la cuantificación de δ -aminolevulinato y protoporfirina en orina; cuantificación de protoporfirina eritrocitaria libre en sangre y por último, con la medición de plomo en sangre.

Los efectos tóxicos del plomo estarán en relación con su concentración en sangre. La Tabla 2 correlaciona los valores de plomo en sangre con sus efectos adversos (Doadrio, 2006), (Goodman & Gilman, 2003):

Concentración de plomo en sangre ($\mu\text{g}/\text{dL}$)	Efectos en la salud	Tipo de población
10	Efectos neurológicos, baja de las funciones cerebrales y capacidad de concentración.	Niños
≥ 40	Anemia, nefropatías.	Niños
50	Anemia, nefropatías, hipospermia.	Adultos
50-60	Efectos neurológicos severos, encefalopatía, cólicos.	Niños
60-70	Encefalopatías, anemia.	Adultos
80	Encefalopatías severas	Niños
100	Muerte	Niños

Tabla 2. Relación de efectos tóxicos con la concentración de plomo en sangre

En la siguiente tabla se presentan los valores criterio de concentración de plomo en sangre para la población mexicana, según la Norma Oficial Mexicana NOM-199-SSA1-2000:

Tipo de población	Valor criterio (mg de Pb/ dL de sangre)
Niños, mujeres embarazadas y en periodo de lactancia	10
Población expuesta No ocupacionalmente	25

Tabla 3. Valores criterio de concentración de plomo en sangre para la población mexicana (NOM-199-SSA1-2000)

Es importante mencionar que el valor criterio es aquella concentración a la cual se piensa que pueden desarrollarse efectos clínicos adversos; y por lo tanto es necesario empezar con el tratamiento.

El tratamiento del saturnismo en general es con quelantes como el edetato cálcico de sodio (Ca_2Na_2 EDTA), el dimercaprol, la D-penicilamina y el succímer (ácido 2,3-dimercaptosuccínico, DMSA). Estos quelantes secuestran al plomo formando productos solubles en agua que pueden excretarse en la orina (Ellenhorn, *et al*, 1997), (Goodman & Gilman, 2003).

Antecedentes históricos del envenenamiento por plomo

-La intoxicación por plomo fue común entre los romanos por el uso del plomo en pipas y almacenes de vino (Tong, *et al*, 2000). Los egipcios lo utilizaron como veneno con fines homicidas (Aranguren, 1999). El primer caso de intoxicación por exposición ocupacional se reportó en el año 370 d. C. (Tong, *et al*, 2000).

-Francois Citois describió el “cólico de poiton” en 1617, cuyos síntomas se asemejan mucho al cólico saturnino. Se piensa que la contaminación se provocó por el desarrollo de actividades mineras (Aranguren, 1999). En los siglos XVIII y XIX también se reportaron casos de una enfermedad reportada como “gota saturnina”.

-La pica de arcilla era una práctica común entre los esclavos africanos en América colonial. Entre ellos se presentaba una enfermedad conocida como “cachexia africana” que se caracterizaba por lentitud, edema, palidez, sangre acuosa y anemia (Aranguren, 1999).

-En la bahía de Santo Amaro (Brasil) opera una gran fundidora de plomo desde 1960. En 1984 se midieron los niveles de plomo sanguíneo en niños que vivían cerca de la fundidora, encontrándose en promedio una concentración de 59.16 µg/dL (Cebrian, 1994).

-En 1976 se realizó un estudio para evaluar el contenido de plomo en cabello en diferentes regiones de México, encontrándose que habitantes de zonas urbanas (México y Puebla) tenían concentraciones entre 12 y 18 ppm, que están dentro de los valores de referencia, mientras que habitantes de Torreón (donde se encontraba una de las fundidoras más importantes de plomo) reportaron valores de hasta 55 ppm (Cebrian, 1994).

-En los años ochentas México fue el quinto productor mundial de loza vidriada. Los talleres de elaboración tienen hornos de baja temperatura y el vidriado es realizado con una mezcla de sílice-óxido de plomo. Un estudio realizado en 1983 reportó valores de concentración sanguínea de plomo muy por encima de lo normal en los trabajadores de estos talleres, además de que se observaron efectos neurológicos adversos en los niños habitantes de las comunidades cercanas (Cebrian, 1994).

¿QUÉ SON LOS BIOINDICADORES?

Los bioindicadores son organismos que pueden acumular compuestos en sus tejidos, lo que permite que sean analizados para cuantificar la concentración del compuesto en el hábitat (Favero, *et al*, 2002). También son conocidos como biomonitores debido a que permiten el monitoreo de condiciones ambientales. Estas especies permiten determinar con precisión el impacto de las actividades antropogénicas causantes de las alteraciones ambientales (Ferrat, *et al*, 2003).

Un buen bioindicador debe cumplir las siguientes características (Brix, *et al*, 1983), (Bojorge, 2006), (Castillo, *et al*, 2004):

- a) su colecta debe ser fácil;
- b) ser un organismo sedentario;
- c) tener un tamaño adecuado;
- d) ser abundante en el área de estudio;
- e) ser fácil de identificar en el área;
- f) tener capacidad para acumular el contaminante;
- g) deben de ser resistentes a cambios de calidad en el ambiente y
- h) su evaluación cuantitativa debe ser sencilla con el fin de poder hacer comparaciones.

En el caso de los metales pesados en cuerpos acuáticos se han realizado estudios utilizando como bioindicadores diferentes especies marinas como algas, mejillones, peces, camarones (Locatelli *et al*, 1999), corales, ostras, y plantas marinas (Martínez, 2007). Algunos ejemplos de plantas marinas utilizadas como bioindicadores son la lechuga de mar (*Ulva lactuca*), *Posidonea oceánica*, *Zostera marina*, *Halodule wrightii*, y la hierba de la tortuga (*Thalassia testudinum*).

Thalassia testudinum y su importancia como bioindicador

Thalassia testudinum (Figura 6) es una angiosperma marina (pasto con flores) abundante en el mar Caribe y el Golfo de México (Hemminga, *et al*, 2000). Es conocida también como “hierba de la tortuga” debido a que ésta es su principal depredador.



Figura 6. Praderas de *Thalassia testudinum*

El crecimiento y la distribución de las praderas de *T. testudinum* depende de factores como la temperatura, la salinidad, la composición de los sedimentos y la atenuación de la luz debido a la turbidez y a la profundidad (Enriquez, *et al*, 2005), (Tussenbroek, *et al*, 2006).

La morfología de *T. testudinum* puede verse en la Figura 7; posee un sistema masivo de raíces, lo que le permite penetrar en varios tipos de sustratos (sedimentos) y extenderse ampliamente (Kuo, *et al*, 2006). El rizoma crece de manera horizontal y a partir de éste crecen raíces y rizomas verticales. Esta característica permite diferenciar a *T. testudinum* de otras especies de pastos marinos. Las hojas nacen a partir de los rizomas verticales, son planas, miden de 4 a 12 mm y pueden llegar a crecer hasta 1 metro de altura (García-Ríos, 1990).

Se estima que el periodo de crecimiento de las hojas es de dos a tres meses (Tussenbroek, *et al*, 2006).

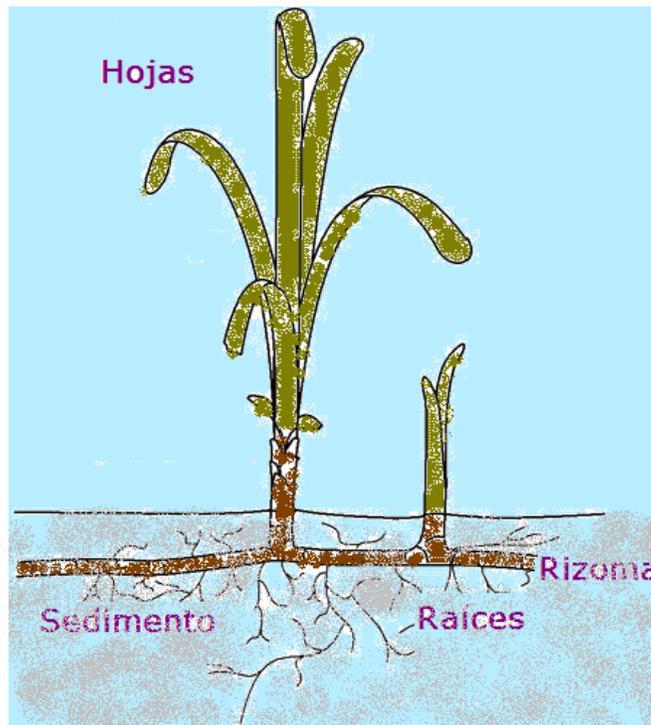


Figura 7. Morfología de *Thalassia testudinum*

Las praderas de *Thalassia testudinum* tienen importancia ecológica, ya que sirven de alimento a diferentes especies y estabilizan los sedimentos ayudando a evitar la erosión de las costas y el fondo submarino (García-Ríos, 1990), (Lewis, *et al*, 2007). En general, los pastos marinos pueden acumular una gran cantidad de elementos por lo que son comúnmente utilizados como indicadores de la contaminación marina (Marín-Guirao, *et al*, 2005).

Estudios previos realizados en pastos marinos muestran que tienen la capacidad para acumular metales pesados. Uno de los primeros estudios fue realizado por Montgomery y Price en 1979. Ellos midieron la captación de metales en muestras de diferentes tejidos de *Thalassia testudinum*, encontrando que se presenta una mayor absorción del plomo en hojas que en raíces (Montgomery, *et al*, 1979). Otro estudio es el realizado por Nienhuis en 1986, en el que se cuantificó cadmio, zinc, cobre y plomo en pastos marinos. Estos datos no fueron empleados en este trabajo porque se utilizaron otros más precisos y recientes.

ZONA DE ESTUDIO

La Península de Yucatán

La Península de Yucatán se encuentra en el sureste de la República Mexicana en las siguientes coordenadas geográficas: 17°, 49' y 21°, 36' Norte; 86°, 45' y 91°, 20' Oeste. Está rodeada por el Golfo de México y el Mar Caribe (Doehring, *et al*, 1974) y comprende a los estados de Quintana Roo, Yucatán y Campeche y una muy pequeña porción de Tabasco (Estrada-Loera, 1991).



Figura 8. Mapa de la República Mexicana con división política

Esta región se caracteriza por estar formada de rocas compuestas por carbonatos (rocas calcáreas), lo que facilita la existencia de fracturas y fisuras por donde se filtra rápidamente el agua y por tanto la hace muy vulnerable a la contaminación (Pérez, *et al*, 2004). La composición de rocas calcáreas también provoca que no existan corrientes superficiales, y sí una gran cantidad de ríos subterráneos de baja profundidad que pueden ser fácilmente contaminados (Pérez, *et al*, 2004). A continuación se hará una breve descripción de las zonas que se estudiaron en este trabajo.

Estado de Campeche

El Estado de Campeche se encuentra en las siguientes coordenadas geográficas: 20°51' Norte, 17°49' Sur de latitud Norte, 89°09' Este, y 92°28' de longitud oeste. Campeche colinda con el Golfo de México y el estado de Yucatán en el lado norte, al sur con Guatemala y Tabasco, al este con Quintana Roo y Belice y al oeste con Tabasco y el Golfo de México (INEGI, 2000). El clima es tropical y tiene una temperatura promedio de 26° C, aunque puede llegar a alcanzar los 36° C. Las lluvias se presentan principalmente en época de verano (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

El suelo de Campeche está formado por carbonatos de calcio y magnesio. No existen yacimientos de minerales metálicos; sólo minas de yeso, grava, arena y piedra caliza. Es importante mencionar que en el municipio de Carmen se encuentra el complejo Ku-Maloob-Zaap, un yacimiento petrolero destacable por su producción a nivel mundial. Además de la explotación de petróleo existen otras actividades económicas en el estado como son la pesca, la industria de la construcción, la agricultura, la ganadería y el turismo (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

Algo que es importante considerar es que el alcantarillado y las plantas de tratamiento de aguas del estado son deficientes. La mayoría de las aguas de desecho son descargadas a los mantos acuíferos a través de fosas, principalmente en la Ciudad del Carmen y en la Ciudad de Campeche (CENECAM, 2006).

En el estado de Campeche se eligieron dos zonas para realizar el diagnóstico: la Reserva de la Biosfera "Petenes" y un punto muy cercano a la Ciudad de Campeche.

Petenes. Una Reserva de la Biósfera

Se localiza al norte del estado, con el límite político de Yucatán y el Golfo de México en los Municipios de Calkiní, Hecelchakán, Tenabo y Campeche. Fue declarada en el año de 1996 como Zona Especial de Protección de Flora y Fauna Silvestre y Acuática debido a su representatividad como ecosistema no alterado (Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de Campeche, 2008). Esta zona tiene una gran diversidad ecológica. Se han identificado alrededor de 473 especies vegetales y 449 especies animales dentro de las que hay especies endémicas y amenazadas.

En Petenes no existen ríos. Debido a la naturaleza cárstica de la región, el agua de lluvia y de condensación logran atravesar el suelo originando ríos subterráneos que se van haciendo menos superficiales en su cercanía con la costa (Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de Campeche, 2008).

La Ciudad de Campeche

Campeche es la capital del estado, por lo que tiene la mayor influencia antropogénica. En Campeche se encuentran muchas industrias, entre las que podemos destacar: la termoeléctrica de Lerma, el ingenio la Joya y Coca-Cola y la industria más importante que es la petrolera Ku-Maloob-Zaap (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

Estado de Yucatán

El Estado de Yucatán se encuentra en las siguientes coordenadas geográficas: al Norte 21°36', Sur 19°32' de latitud Norte; Este 87°32', al Oeste 90°25' de longitud oeste. Presenta colindancia al Norte con el Golfo de México; al Este con Quintana Roo; al Sur con Quintana Roo y Campeche y al oeste con Campeche y el Golfo de México (INEGI, 2000).

El estado se caracteriza por la presencia de cuerpos acuáticos subterráneos que desembocan en los mares. Es debido a estos bellos manantiales subterráneos que el estado posee gran actividad turística.

El clima es cálido sub-húmedo, con temperaturas de hasta 27.7° C; con lluvias en verano y al final de la primavera. La principal actividad económica del estado es el turismo, aunque también se realizan agricultura, ganadería y pesca (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005). El diagnóstico de la contaminación se realizará en el Área Natural Protegida de Celestún, la zona de Dzilam y la playa de Chelem.

Celestún. Área Natural Protegida

Se encuentra a 90 Kilómetros de la Ciudad de Mérida. Limita al sur con la Reserva de la Biosfera "Los Petenes" y al norte con la Reserva Estatal de "El Palmar".

La importancia ecológica de Celestún radica en que es la zona de alimentación y descanso de muchas especies de aves migratorias, incluyendo al flamenco rosa (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

Las aguas de Celestún son altamente salinas. En esta zona no hay corrientes superficiales de agua pero sí muchos cuerpos acuáticos subterráneos. El agua de lluvia se filtra por el sustrato calcáreo por lo que hay gran cantidad de cenotes y lagunas. El drenaje freático de Celestún pertenece a la vertiente noroccidental que se inicia en Dzilam de Bravo (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

Chelem

Chelem es un pequeño puerto pesquero ubicado muy cerca de Puerto Progreso. Tiene poca afluencia turística y su actividad económica más importante es la pesca.

Dzilam

Está ubicado en la región litoral norte del estado. Carece de ríos superficiales, pero sí posee abundantes cuerpos de agua subterráneos. Debido a que posee diversas zonas arqueológicas, es una importante zona de atracción turística (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

Estado de Quintana Roo

Quintana Roo se encuentra en las siguientes coordenadas geográficas: Norte 21° 35', Sur 17° 49' de latitud Norte; al Este 86° 42', al Oeste 89° 25' de longitud Oeste. Este estado colinda con Yucatán, el Golfo de México; el Mar Caribe; la Bahía de Chetumal, Belice, Guatemala; Campeche y Yucatán. Su extensión territorial incluye las islas de Cozumel, Isla Mujeres, Holbox, Isla Blanca, Contoy, entre las más importantes. (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

El clima que prevalece es tropical, con una temperatura promedio de 26°C y lluvias en verano. Sólo se presenta un río superficial (Río Hondo). El resto de la hidrografía corresponde a aguas subterráneas (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

Dada la belleza de sus playas y cenotes, la principal actividad económica es el turismo. La mayor parte de los servicios turísticos y hoteleros se encuentra en Cancún, seguido de Cozumel, Playa del Carmen y a lo largo de la Riviera Maya (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

La actividad turística en este estado representa la tercera parte de las divisas mexicanas (INEGI, 2007). Tal cantidad de afluencia turística ha incrementado la generación de residuos en el estado. Se sabe que en año 2006 se produjeron más de 6 millones de toneladas de basura, para las que sólo se cuenta con aproximadamente 60 hectáreas de tiraderos (basureros) y 22 hectáreas de rellenos sanitarios (INEGI, 2007).

En este estado se utilizan para el estudio muestras obtenidas en Holbox, Contoy, Isla Mujeres, Chacmochuc, Punta Cancún, Punta Nizúc, Nichupté y Bojórquez.

Holbox

Holbox es una isla que se encuentra en la punta norte de la Península de Yucatán. Su extensión es de 34 Km y tiene 1198 habitantes (INEGI, 2007). Esta isla posee gran biodiversidad y belleza, por lo que forma parte del Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam. La Isla de Holbox se encuentra aislada de la comunidad de Chiquilá por la Laguna de Yalahau.

La infraestructura de Holbox es limitada aunque es una zona turística importante. Los únicos medios de transporte en la isla son las motocicletas y los carros de golf y cuenta con sólo un tiradero de basura a cielo abierto que desemboca directamente en la Laguna de Yalahau, lo que podría generar contaminación en la zona.

El diagnóstico de la contaminación en la Isla Holbox se realizará cuantificando el plomo de muestras de *Thalassia testudinum* colectadas en la Laguna de Yalahau.

Isla Contoy

La Isla Contoy, se conoce también como Isla Pájaros, se localiza al norte de Isla Mujeres. Se llega a la isla por medio de pequeños yates turísticos o embarcaciones de pesca que parten de Isla Mujeres, Puerto Juárez o Cancún.

Contoy no tiene cuerpos de agua dulce, pero presenta una gran facilidad de filtración del agua de lluvia al subsuelo, conduciéndola hacia el mar. Se considera que existe un buen drenaje superficial hacia las lagunas interiores y hacia el mar (INE, 1997).

Isla Mujeres

Es un centro turístico importante. La comunicación hacia la isla es marítima y aérea. La economía de la isla está basada principalmente en la pesca ribereña y

en el turismo, aunque existe la agricultura, la apicultura y la minería de materiales calcáreos (INE, 1997).

Chacmochuc

Esta laguna es parte del sistema de Isla Mujeres. La importancia de su evaluación ecológica reside en que se piensa que puede estar afectada por los rellenos sanitarios costeros.

Punta Cancún

Cancún, es la ciudad de mayor crecimiento demográfico del país (26% de crecimiento anual). En Cancún las dos actividades económicas principales son el turismo y la pesca (INE, 1997). Es importante realizar un diagnóstico de la contaminación en Cancún porque esta ciudad es el complejo turístico más importante del país.

Nichupté

El Sistema Lagunar de Nichupté fue declarado un Área Natural Protegida debido a sus manglares y a que es el hogar de una gran diversidad de especies. También es una zona de gran afluencia turística.

Bojórquez

Es una de las lagunas que integran el Sistema Lagunar Nichupté. En Bojórquez existen muchas corrientes de agua subterránea y una amplia área de drenaje. Es importante la evaluación de la contaminación en la Laguna Bojórquez porque se encuentra afectado por las descargas de aguas residuales (González, 1992).

Punta Nizúc

Esta zona es de afluencia turística porque se encuentra muy cerca de la zona hotelera de Cancún, por lo que se piensa que también puede estar afectada por los residuos generados en este centro turístico.

ANTECEDENTES

Existen estudios previos realizados en *Thalassia testudinum* que han registrado la captación de plomo en este pasto marino. A continuación se presenta una breve descripción de los resultados reportados en estos estudios y la Tabla 4 muestra los niveles de plomo encontrados en estos trabajos.

En el año 2001, Noriega estudió la concentración de metales pesados en muestras de *Thalassia testudinum* del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), que es una zona contaminada. Whelan, *et al*, en el año 2005, determinaron la cantidad de metales pesados en sedimentos y muestras de *Thalassia testudinum* de Laguna Madre en Texas. Esta zona, aunque tiene influencia antropogénica, no se considera como un sitio contaminado. Por otra parte Valdespino, en el año 2005, estudió la concentración de plomo en *Thalassia testudinum* de la Laguna de Yalahau, Quintana Roo; concluyendo que se trataba de un sitio no contaminado. Por último, es importante mencionar el estudio realizado por Lewis en Florida en el año 2007, en el que analiza la concentración de metales pesados en dos tipos de pastos marinos: *Halodule wrightii* y *Thalassia testudinum*. El estudio reporta los valores promedio que se muestran en la Tabla 4 y concluye que se trata de sitios no contaminados.

Año	Autor	HOJAS ppm de plomo	RAÍCES ppm de plomo	Diagnóstico
2001	Noriega	8.7	7.5	Zona Contaminada
2005	Whelan <i>et al</i>	1.2	1.2	Zona NO contaminada
2005	Valdespino	7.0	6.0	Zona NO contaminada
2007	Lewis <i>et al</i>	7.3	1.3	Zona NO contaminada

Tabla 4. Concentración de plomo en muestras de *T. testudinum* reportada en estudios previos
Las partes sombreadas indican los niveles que serán considerados como valores de referencia en este trabajo

En el presente trabajo se realizará la cuantificación de plomo en hojas de *Thalassia testudinum* de las zonas de la Península de Yucatán antes descritas. Para realizar el diagnóstico de la contaminación se utilizarán como referencia los valores reportados por Noriega para sitios contaminados (ver Tabla 4).

Dado que también se cuantificará la presencia de plomo en la Laguna de Yalahau, se realizará una comparación con el estudio realizado por Valdespino en el año 2005, con el fin de observar la evolución de la contaminación en este sitio.

OBJETIVOS

General:

Realizar un estudio de la presencia de plomo en diferentes zonas de la Península de Yucatán utilizando como bioindicador un pasto marino llamado *Thalassia testudinum*.

Particulares:

- ✓ Determinar la concentración de plomo en diferentes zonas de la Península de Yucatán con el fin de conocer el grado de contaminación.
- ✓ Correlacionar la concentración de plomo encontrada con las características de cada región para tratar de determinar las posibles fuentes de contaminación.
- ✓ Realizar un análisis de la contaminación de forma temporal, anual, espacial, regional y local.
- ✓ Analizar los niveles de plomo en épocas de lluvias y secas para determinar la influencia de las precipitaciones y las escurrentías en el grado de contaminación.
- ✓ Comparar la concentración de plomo en los distintos estados con el fin de determinar cual es el Estado de la Península de Yucatán más contaminado.
- ✓ Identificar cuáles son las zonas que presentan la mayor contaminación por plomo en cada uno de los estados.
- ✓ Identificar los posibles “puntos rojos” de contaminación por plomo en la Península de Yucatán.

HIPÓTESIS

- ❖ Al ser un metal no esencial, la presencia de plomo en muestras de *Thalassia testudinum* es indicativa de contaminación ambiental.
- ❖ Debido a la falta de yacimientos metálicos en la Península de Yucatán, la presencia de plomo en el ambiente marino sólo puede provenir de actividades humanas; por lo tanto, la contaminación ambiental será mayor en zonas de alta influencia antropogénica. Se espera encontrar una mayor concentración de plomo en sitios donde existen industrias, ciudades y puntos de descarga de aguas residuales. Con esta misma lógica podemos decir que las zonas de menor influencia antropogénica presentarán menores niveles de plomo, por lo que se espera encontrar la concentración más baja en las Áreas Naturales Protegidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diagnóstico referente a la concentración de plomo en la Península de Yucatán se realizó mediante el análisis en muestras de hojas de *Thalassia testudinum*, colectadas en diferentes visitas realizadas en los tres estados de la Península. La fecha de las colectas se decidió conforme a dos épocas: lluvias (junio-octubre) y secas (enero-febrero) con el objeto de observar la influencia de la precipitación y las escurrentías en los niveles de contaminación.

En la recolección de muestras de *Thalassia testudinum*, algunos sitios de colecta se georeferenciaron con un sistema de posicionamiento satelital. La Tabla 5 presenta la ubicación de los sitios de colecta en cada estado. La recolección de las muestras es relativamente fácil ya que la mayoría de las praderas de *T. testudinum* se encuentran a menos de un metro de profundidad; sin embargo, en algunos sitios fue necesario bucear para extraer las plantas. Se consideran áreas de colecta grandes (aproximadamente de 4 metros cuadrados) para asegurar la representatividad de las muestras. En cada sitio se recolectaron aproximadamente 50 g de muestra de manera manual, procurando extraer la planta desde el rizoma. No se utilizaron instrumentos para la extracción para evitar contaminar más las muestras. Las plantas extraídas se separaron en hojas y raíces y se lavaron con agua de la zona hasta la completa eliminación de los sedimentos. Las hojas fueron raspadas con las uñas para la eliminación de las epífitas. Ya limpias, las muestras se almacenaron en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas y selladas. Al terminar la recolección, todas las muestras se secaron al sol y se almacenaron en bolsas de papel estraza para trasladarlas al laboratorio en la Ciudad de México.

La cuantificación de plomo en las muestras de *T. testudinum* se realizó en el laboratorio de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química de la UNAM, por la técnica analítica Espectroscopía de Absorción Atómica. La descripción del tratamiento de las muestras así como el fundamento de la técnica se incluye en el Anexo II de esta tesis.

Estado	Lugar	Sitio	Coordenadas	
Campeche	Campeche	-	19°51.631´N	90°31.424´W
	Petenes	-	20°39.421´N	90°27.826´W
Yucatán	Dzilam	-	21°24.783´N	89°07.354´W
	Chelem	-	21°16.078´N	89°41.419´W
	Celestún	-	NR	
Quintana Roo	Holbox	1 (Isla Pasión)	21°30.997´N	87°23.525´W
		2 (Basurero)	21°30.255´N	87°23.525´W
		3 (Boya Recalada)	21°29.890´N	87°22.208´W
		4 (Isla Pájaros)	21°31.044´N	87°19.248´W
		5 (Punta Catalán)	21°60.427´N	87°17.576´W
		6 (Cetro Laguna)	21°29.291´N	87°15.776´W
		7 (Yalikin)	21°26.351´N	87°11.174´W
		8 (Río Bomba)	21°25.847´N	87°13.745´W
	Contoy	1 (Faro)	21°29.953´N	86°43.756´W
		2 (Lagunita)	NR	
		3 (Punta sur)	NR	
	Isla Mujeres	-	NR	
	Chacmochuc	-	21°23.766´N	86°49.340´W
	Punta Cancún	-	21°08.327´N	86°44.754´W
	Nichupté	-	NR	
	Bojórquez	-	NR	
	Punta Nizúc	-	NR	

Tabla 5. Localización de los sitios de colecta en los Estados de la Península de Yucatán

NOTA: NR = No Referenciado

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados estos se presentan en forma de gráficas. Los datos de origen se encuentran en el Anexo 1 del presente documento.

Para determinar si la concentración encontrada en cada sitio representa a zonas contaminadas se utilizará como valor de referencia el reportado por Noriega en el 2001. Estos resultados corresponden a la evaluación de muestras de *Thalassia testudinum* del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV). En ese trabajo se determinó que el SAV es una zona contaminada y el valor de concentración de plomo en hojas que se reporta es de **8.7 ppm** ($\mu\text{g/g}$).

Aunque se realizó la colecta de muestras de hojas y raíces, en este análisis sólo se reporta la concentración de plomo en hojas porque el objetivo es analizar la concentración de plomo en el momento de la colecta. El análisis de hojas es útil porque se sabe que las hojas tienen un periodo de vida de tres meses (Tussenbroek *et al*, 2006) y por lo tanto reflejan la concentración de plomo en la fecha de la colecta y lo ocurrido durante los tres meses anteriores a ese momento. Las raíces, sin embargo, contienen cantidades acumuladas a lo largo del tiempo. Es muy difícil determinar la edad de las raíces ya que se tiene que encontrar la punta de crecimiento y a partir de ahí estimar el tiempo de vida. Cuando se colectan las raíces es casi imposible encontrar la punta porque están enterradas. De las muestras de raíces que colectamos no sabemos la edad, por lo que es preferible basar este estudio en los resultados obtenidos en hojas. También es importante decir que, tal como lo reportan otros trabajos (Montgomery, *et al*, 1979; Brix, *et al*, 1983; Valdespino, 2005; Lavoisier, 2006), en los resultados de las muestras que se analizaron en este proyecto siempre se observaron niveles mayores de plomo en hojas que en raíces. Montgomery *et al*, (1979) y Rosas (2006) argumentan que se encuentra concentración más alta en hojas debido a que los tejidos fotosintéticos están mayormente expuestos a las especies

biodisponibles de plomo, además de que poseen más restos proteínicos que permiten que este metal pueda absorberse. Dado que las hojas siempre presentan concentraciones más altas que las raíces, con este análisis tendremos los límites máximos de plomo que se encuentran en cada zona, por lo que el estudio en estos tejidos es suficiente para realizar un diagnóstico de contaminación.

En las gráficas elaboradas para hacer el análisis se reporta la concentración de plomo en muestras de hojas de *Thalassia testudinum* colectadas en distintas etapas. La concentración de plomo está expresada en μg de plomo por gramo de muestra seca (ppm). Los resultados se analizan de cinco formas distintas: temporal, anual, espacial, regional y local.

El **análisis temporal** se enfoca en determinar los cambios en la concentración de plomo a través del tiempo. Esto nos permite tener un diagnóstico sobre la forma en que evoluciona la presencia de plomo en la región. Para esto se utilizan las muestras provenientes de un mismo lugar, colectadas durante el mismo mes pero en diferente año. Es importante que las muestras se recojan en el mismo mes porque así podemos suponer que la planta se encuentra en la misma etapa de crecimiento y bajo condiciones ambientales similares.

Con el **análisis anual** se puede reconocer la influencia de las lluvias en los niveles de contaminación. Para esto se utilizan las muestras colectadas en el mismo lugar pero en diferentes meses del año (que representan a las épocas de lluvias y secas). Con este análisis se puede tratar de correlacionar la contaminación por plomo con el aumento en las escurrentías debido a las lluvias.

El **análisis espacial** tiene como objetivo comparar los niveles de plomo en los distintos estados de la península. Para esto se compara la concentración encontrada en muestras colectadas en el mismo periodo (mes y año), pero en distintas regiones de la península. Así se garantiza que están bajo las mismas

condiciones ambientales. Con esto tenemos una idea general de la contaminación por plomo en los distintos estados de la Península de Yucatán.

En estos tres tipos análisis (temporal, anual y espacial), se utiliza el promedio de la concentración de plomo encontrada en hojas para reconocer la presencia de plomo en la región bajo diferentes contextos: primero, en distintos años (análisis temporal); después, bajo la influencia de las lluvias (análisis anual) y por último en los diferentes estados para determinar el lugar más afectado por la presencia de plomo (análisis espacial).

El **análisis regional** tiene como finalidad encontrar las zonas que presentan los mayores niveles de plomo en los estados. Para esto se analizan los resultados de concentración de plomo en muestras de hojas colectadas en diferentes regiones de cada estado, durante una misma fecha de colecta.

El **análisis local** se realiza con el fin de encontrar las posibles fuentes puntuales de contaminación o “**puntos rojos**”, que definiremos en este trabajo como *aquellos sitios en donde se encuentra la concentración más elevada del contaminante*, y que por lo tanto indican una fuente local o regional de contaminación. Este análisis local se realizó analizando la concentración de plomo en las muestras colectadas en cada lugar y en cada sitio del que se conoce su ubicación precisa.

Los datos correspondientes a las distintas colectas que se realizaron se resumen en la Tabla 6 que se presenta a continuación.

En la Tabla 6 se observa que para evaluar lo que ocurre con la concentración de plomo a través del tiempo (análisis temporal) sólo puede utilizarse la concentración promedio de Holbox en enero de 2006 y enero de 2007. Con estas muestras podemos analizar el cambio en las condiciones del lugar con diferencia de un año. Como se colectaron en el mismo mes (pero de distintos años), se asume que se encuentran bajo condiciones ambientales similares.

Año	2004	2005	2006	2007
Enero			Quintana Roo: Holbox	Quintana Roo: Holbox Contoy Punta Cancún Punta Nizúc
Junio	Quintana Roo: Holbox			
Agosto			Campeche: Campeche Petenes Yucatán: Celestún Dzilam Chelem Quintana Roo: Holbox Contoy Isla Mujeres Chacmochuc Punta Cancún Punta Nizúc Nichupté Bojórquez	
Octubre		Quintana Roo: Holbox		

Tabla 6. Fechas y lugares de colecta

El estudio de la variación anual sólo puede hacerse para Holbox porque es el único lugar para el que se tienen los datos necesarios. Esto permite realizar un seguimiento de la concentración de plomo en diferentes épocas del año. Para este análisis utilizaremos el promedio de la concentración de plomo en hojas colectadas en junio de 2004, octubre de 2005, enero de 2006, agosto de 2006 y enero de 2007.

El análisis espacial se realiza con el promedio de la concentración de plomo de los diferentes lugares de cada estado en los que se realizó la colecta de agosto de 2006, porque tal como se ve en la Tabla 6, sólo en esta fecha se tomaron muestras de los tres estados. Este análisis permite determinar cuál es el estado de la península más contaminado al momento de la colecta.

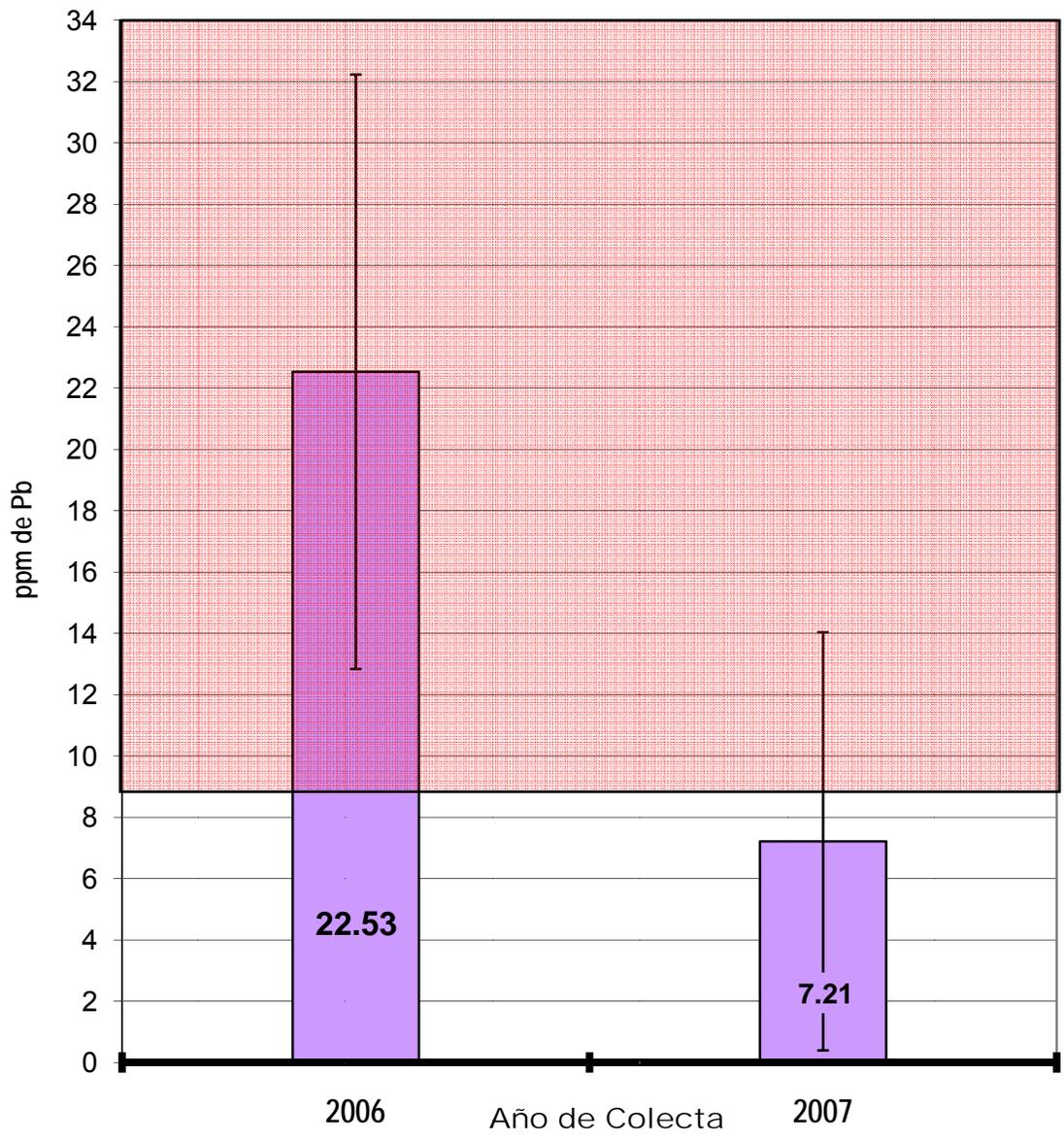
El análisis regional se realizó considerando los datos de concentración promedio de plomo en cada lugar de Campeche, Petenes y Quintana Roo para la colecta de agosto de 2006.

Por último, el análisis local pretende localizar los posibles puntos rojos de contaminación. Se realizó con el estudio de la concentración de plomo en cada sitio de Holbox y en cada sitio de Contoy para cada fecha de colecta posible. Más adelante se detallarán los lugares de cada colecta.

ANÁLISIS TEMPORAL

En la Gráfica 1 se muestran los resultados para el análisis temporal. Se consideran las colectas realizadas en Holbox en enero de 2006 y enero de 2007, ya que corresponden al mismo lugar y al mismo mes, y por lo tanto podemos asumir que estaban en condiciones ambientales similares. Esta gráfica permite observar el cambio en los niveles de plomo a través de los años. En la gráfica se reporta en el eje de las ordenadas el año de la colecta, mientras que en el de las abscisas se reporta la concentración de plomo en partes por millón ($\mu\text{g/g}$). Los valores dentro de las columnas representan el valor de la concentración y las barras en las columnas indican la desviación estándar, colocada con la finalidad de observar la dispersión en los datos.

HOLBOX
 (Enero 2006, Enero 2007)
 Variación temporal de la concentración promedio de plomo en hojas



Gráfica 1. Variación temporal de la concentración de plomo

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)
 Las barras en las columnas indican la desviación estándar

Dado que la concentración que observamos refleja lo acontecido tres meses antes (Tussenbroek *et al*, 2006), los resultados de enero de 2006 representan la concentración de plomo a partir del mes de octubre de 2005 y hasta enero de 2006, que fue cuando se extrajeron las hojas. Es importante analizar los eventos meteorológicos que ocurrieron en esa época, porque se sabe que el transporte de plomo se lleva a cabo principalmente por el mecanismo de deposición húmeda (EPA, 2006), y por lo mismo cualquier fenómeno que incremente las precipitaciones o las escurrentías es determinante en la cantidad de plomo acumulado.

Octubre del año 2005 fue crítico para la Península de Yucatán, ya que el Huracán Wilma golpeó directamente la costa de Quintana Roo el día 21, manteniéndose activo por más de 60 horas. Esto ocasionó daños en la infraestructura y en los ecosistemas (CONANP, 2006). El Huracán Wilma impactó sobre la población de Puerto Morelos con vientos máximos de 220 Km/h y rachas de 270 Km/h, lo que provocó un aumento en las precipitaciones de la península (CONAGUA, 2006). Como la deposición húmeda es el principal mecanismo de acarreo de plomo de un lugar a otro, se espera que uno de los efectos del huracán sea el de aumentar la cantidad de contaminantes en la zona. En las muestras colectadas en enero de 2006 se ven reflejados los efectos del huracán con un importante aumento en la concentración de plomo. Esto se observa en la Gráfica 1, ya que los niveles de plomo en el año 2006 son casi tres veces más altos que en el 2007. Los niveles de plomo correspondientes a esta fecha están muy por encima de los reportados por Noriega en el 2001 (8.7 ppm), lo que muestra que es una zona considerada como contaminada.

En la Gráfica 1 también se observa una disminución importante de los niveles de plomo en hojas del año 2007. Las muestras colectadas en enero de 2007 reflejan lo ocurrido en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2006, y el mes de enero de 2007. La disminución en la cantidad de plomo en el año 2007 puede explicarse si se considera que en épocas en las que no se presentan huracanes

no hay tanto transporte de materia de un sitio a otro, por lo que se espera que la concentración de plomo en el sitio disminuya cuando no hay eventos ambientales tan violentos. Es importante notar que la concentración en hojas del año 2007 está por debajo del nivel que Noriega reporta para zonas consideradas contaminadas; sin embargo, los niveles de plomo son altos y preocupantes porque no existen fuentes naturales de plomo en esta región y probablemente la presencia de este metal se debe a un mal manejo de residuos (por ejemplo, acumuladores, pigmentos, baterías automotrices, o de aquellos productos derivados del petróleo). Por esta razón es muy importante la realización de otras colectas, con la finalidad de contar con un monitoreo permanente de la zona.

Como conclusión a este análisis temporal puede decirse que:

-Los altos niveles de plomo en Holbox en el año 2006 pueden ser atribuidos a un aumento drástico en el transporte de materia causado por el Huracán Wilma en octubre de 2005.

-En el año 2007 se observa una disminución en los niveles de plomo, pero éstos son preocupantes porque en la zona no existen fuentes naturales del metal; así que el plomo encontrado probablemente refleja un problema de mal manejo de residuos.

VARIACIÓN ANUAL

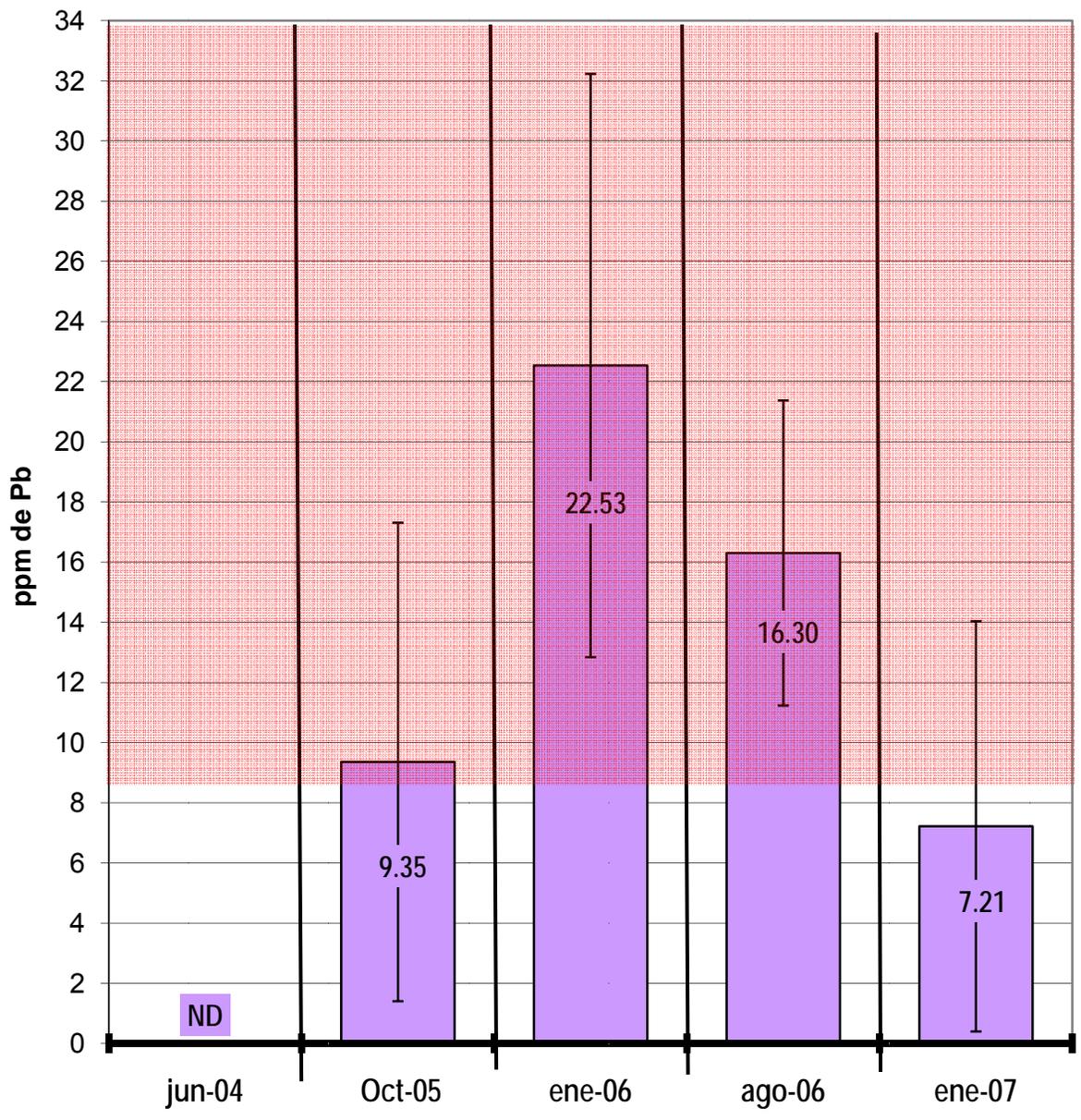
Holbox es la zona que ha sido objeto de estudio en todas las colectas porque es precisamente en este sitio donde surgió el proyecto de evaluar la contaminación por metales pesados (Valdespino, 2005; Ruiz, 2005; Rosas, 2006; Lavoisier, 2006; Solís, *et al* 2007; Nohpal, 2007; Martínez, 2007). En esta zona se realiza el análisis de variación anual.

Los resultados se reportan en la Gráfica 2. En el eje de las ordenadas se reporta el mes y el año en que se llevó a cabo la colecta, mientras que en el de las abscisas se reporta la concentración de plomo en partes por millón ($\mu\text{g/g}$). Los números en las columnas indican el valor de la concentración de plomo en esa muestra. Observando la concentración de plomo en hojas en la Gráfica 2, es notable ver que al comenzar las colectas en el año 2004 no se detectaba plomo en la isla de Holbox; sin embargo, en el mes de octubre de 2005 comienza a observarse un aumento en la concentración, que se agudiza mucho más en el mes de enero de 2006. Nuevamente es útil recordar que el periodo de crecimiento de las hojas de *T. testudinum* es de tres meses, por lo tanto la concentración encontrada en hojas refleja en realidad lo ocurrido durante los tres meses antes de su colecta (Tussenbroek *et al*, 2006). Dada esta situación, las colectas realizadas en el mes de junio reflejan lo ocurrido en los meses de marzo, abril y mayo; agosto indica lo ocurrido en los meses de mayo, junio y julio; la colecta de octubre representa lo ocurrido en julio, agosto y septiembre; y la de enero representa la concentración en octubre, noviembre y diciembre del año anterior.

El incremento de la concentración de plomo en hojas de los años 2004 a 2005 puede explicarse por la gran cantidad de lluvias ocurridas en los meses de julio a octubre de 2005, ya que uno de los mecanismos de transporte de plomo es la deposición húmeda. Esto quiere decir que las partículas de plomo son arrastradas por las lluvias de diferentes sitios de la isla y del Estado de Quintana Roo, y dada la naturaleza cárstica del suelo y la presencia de ríos subterráneos pueden llegar hasta la zona de Holbox.

Los niveles más altos en hojas se encuentran en enero de 2006. Como se explicó anteriormente en el análisis temporal esto se debe al aumento en las precipitaciones debido al huracán Wilma.

HOLBOX
Variación de la concentración promedio de plomo en hojas



Gráfica 2. Evolución de la concentración de plomo en Holbox de los años 2004-2007

Notas: *ND= No Detectable

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)
 Las barras en las columnas indican la desviación estándar

Para agosto de ese mismo año se observa una disminución en la concentración de plomo. Esto es porque agosto representa lo ocurrido en los meses de mayo, junio y julio (época más seca). La disminución en la cantidad de plomo en hojas puede explicarse porque también hay una disminución en las precipitaciones y en las escurrientías en esta época. Dado que el principal mecanismo de transporte de plomo es la deposición húmeda (EPA, 2006), la cantidad de plomo transportado es menor al disminuir las precipitaciones, por lo cual las hojas de *T. testudinum* que se encuentran en esta época están menos expuestas al plomo que aquéllas que se encontraban en el momento del huracán Wilma (las hojas que absorbieron el plomo movilizado por el huracán ya se cayeron). Esto explica que se presenten concentraciones menores que las encontradas en los primeros meses del año 2006. Sin la presencia de huracanes se estima que hay una menor movilización de contaminantes y podríamos suponer que la concentración de plomo encontrada sólo refleja el aporte generado por fuentes cercanas, como los desechos producidos en el Estado de Quintana Roo.

En enero de 2007 se presenta una disminución en los niveles de plomo. Esto se explica porque al no presentarse eventos ambientales drásticos (como los huracanes), la movilización de este metal se ve disminuida y podríamos pensar que el plomo encontrado en Holbox en esta fecha se debe a un mal manejo de residuos en la zona.

En este punto es importante también mencionar el trabajo inicial dentro de este proyecto, que fue realizado por Valdespino en la Isla de Holbox en los primeros meses del año 2005. En este trabajo se reportan concentraciones de plomo iguales a 7.0 µg/g en muestras de hojas analizadas por PIXE (emisión de rayos X inducida por partículas). Dado que estas muestras no fueron analizadas por la técnica que se utiliza en este trabajo, no se incluyeron como parte de los resultados de esta tesis y sólo las utilizamos para realizar la comparación. Al comparar los resultados de Valdespino con los encontrados en esta tesis, puede pensarse que la contaminación por plomo se presenta de manera gradual; sin

embargo, un fenómeno natural como el huracán Wilma provoca que la concentración aumente drásticamente. Para corroborar que en efecto hay un aumento gradual, salvo en condiciones ambientales drásticas en las que se presenta un aumento brusco, se tiene que continuar con los monitoreos en las zonas. Para concluir con este análisis anual es importante mencionar lo siguiente:

-El aumento en los niveles de plomo de junio de 2004 a octubre de 2005 se explica por el aumento en las precipitaciones en los meses de julio a octubre de 2005, porque el principal mecanismo de movilización del plomo es la deposición húmeda, por lo que al aumentar las precipitaciones, aumenta el transporte del metal, lo que se ve reflejado en un aumento en la concentración de plomo.

-La mayor concentración de plomo se presenta en enero de 2006, lo que es atribuido al aumento en las precipitaciones a causa del Huracán Wilma ocurrido en octubre de 2005.

-Agosto de 2006 refleja lo ocurrido en una época de secas en la que la movilización de plomo es menor ante la ausencia de precipitaciones; por lo tanto se presentan niveles de plomo menores que en la colecta de enero de ese mismo año.

-Los niveles de plomo en enero de 2007 probablemente reflejan un problema de mal manejo de residuos en la zona, porque los resultados de esta colecta reflejan lo ocurrido en una época de ausencia de precipitaciones y por lo tanto, de menor transporte de plomo desde otros puntos del estado.

-La comparación de los resultados encontrados en este estudio con los reportados en trabajos anteriores indican que la contaminación por plomo en Holbox se ha presentado de manera gradual.

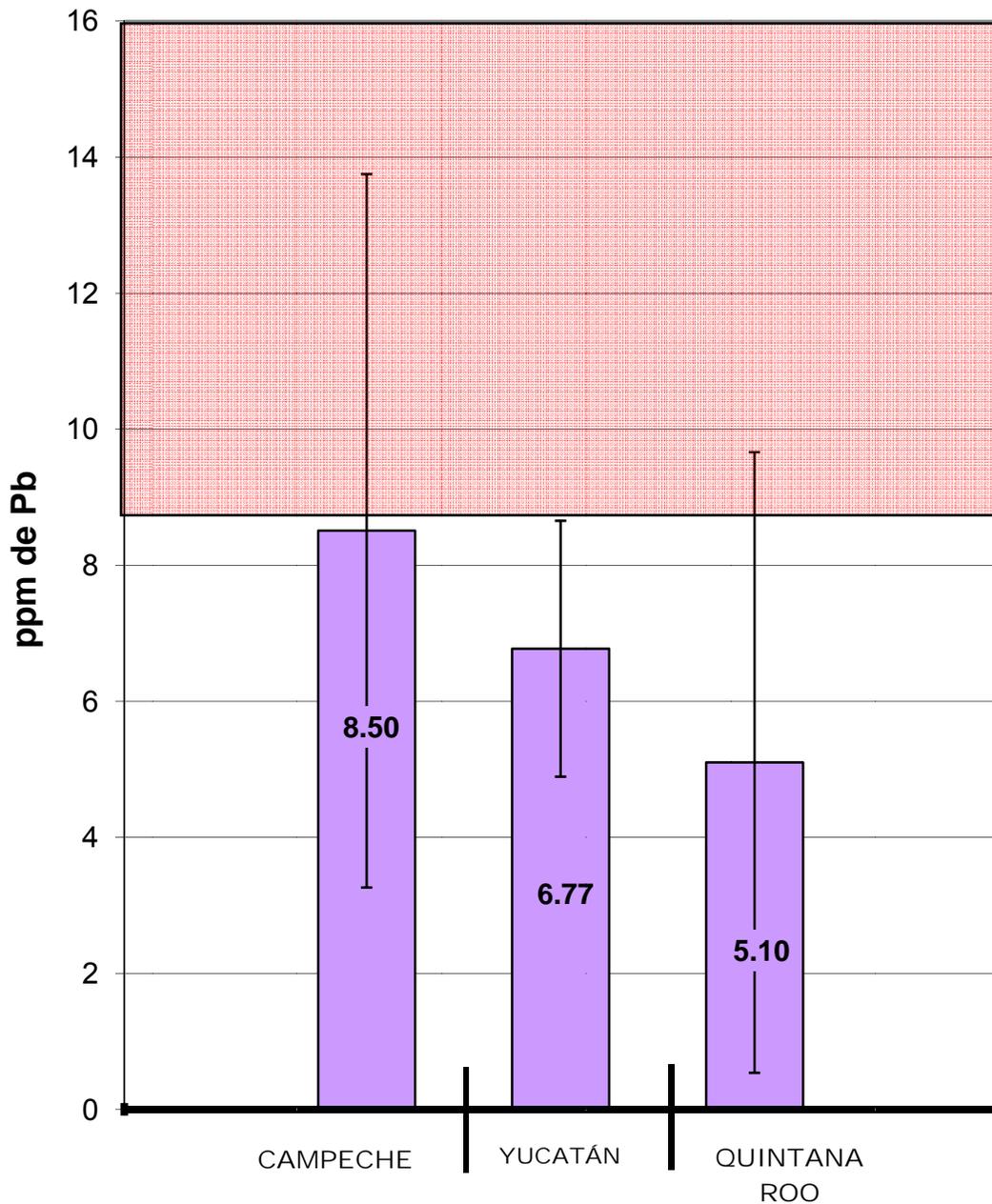
ANÁLISIS ESPACIAL

En la Gráfica 3 se reporta la concentración promedio de plomo presente en las muestras colectadas en agosto de 2006 en los tres estados de la Península de Yucatán. En el eje de las ordenadas se indica el Estado del que provienen las muestras; en el eje de las abscisas, la concentración de plomo en partes por millón ($\mu\text{g/g}$). Las columnas representan la concentración de plomo en hojas. Los números dentro de las columnas representan el valor de la concentración promedio. También se incluye la desviación estándar con la finalidad de observar la dispersión de los datos. Todas las muestras se colectaron en el mes de agosto de 2006.

La Gráfica 3 muestra que el estado más contaminado por la presencia de plomo es Campeche, seguido por Yucatán y por último Quintana Roo. La contaminación en Campeche podría explicarse por la presencia de la petrolera Ku-Maloob-Zaap, que se encuentra muy cerca de uno de los sitios de colecta en este estado. También es importante la presencia de industrias en la zona y la cercanía con los complejos petroleros del Golfo de México. Si se compara la concentración de plomo en hojas en Campeche (8.50 ppm) con las reportadas por Noriega en el 2001 en el Sistema Arrecifal Veracruzano (8.7 ppm), se observa que la concentración de plomo en este estado se encuentra muy próxima al valor límite para zonas contaminadas, por lo que se concluye que es una zona posiblemente contaminada. Al tener prácticamente el mismo valor que el SAV, se podría pensar que estos valores reflejan la contaminación en el Golfo de México.

Los sitios donde se llevó a cabo la colecta en el Estado de Yucatán corresponden a Áreas Naturales Protegidas (con excepción de Chelem, que es un lugar cercano al puerto). La concentración de plomo aquí es menor que la encontrada en Campeche, debido a que Yucatán solamente podría estar afectado por las descargas domésticas y algunas actividades relacionadas con el turismo (como la pesca, y el comercio ambulante). Las actividades petroleras aparentemente no afectan este estado.

PENÍNSULA DE YUCATÁN
(Agosto 2006)
Concentración promedio de plomo en hojas colectadas en los Estados



Gráfica 3. Concentración de plomo en hojas de *T. testudinum* de la Península de Yucatán

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)

Las barras en las columnas indican la desviación estándar

En Quintana Roo se observan los niveles de plomo más bajos de toda la Península de Yucatán. Esto se explica porque, al igual que Yucatán, la contaminación se genera por el mal manejo de los residuos, las descargas domésticas y algunas actividades relacionadas con el turismo. Aparentemente hay menos contaminación en Quintana Roo que en Yucatán porque también hay menos gente (1,135,309 habitantes según INEGI, comparada con Yucatán, que tiene 1,818,948 habitantes). Además, en 2007 se colectaron 611,000 toneladas de basura en Quintana Roo, mientras que en Yucatán se colectaron 1,916,000 toneladas de basura (INEGI, 2007). Estas cifras indican que en el Estado de Quintana Roo hay menos gente y se producen menos desechos por persona, lo que puede explicar que se genere menos contaminación.

Por último es interesante discutir la dispersión que se observa en los resultados de la Gráfica 3. Esta Gráfica muestra que los tres estados presentan una elevada dispersión en la concentración promedio de plomo. Esto se debe a que en cada estado hay lugares en donde las hojas colectadas tienen mayores cantidades de plomo, con lo que la concentración promedio aumenta y también la dispersión de los datos. Esto hace interesante y fundamental realizar un análisis regional, analizando la concentración promedio en cada lugar con el fin de ubicar las zonas más contaminadas en cada estado.

Como conclusión a este análisis espacial podemos decir dos cosas:

- La concentración de plomo en muestras de Yucatán indica que es importante prestar atención en el manejo de desechos.

- Los niveles de plomo en muestras de hojas de *T. testudinum* de Campeche indican que este estado se encuentra contaminado por plomo, y que además, la evaluación de la concentración de plomo en el estado permite monitorear de manera indirecta la contaminación por plomo del Golfo de México porque presenta niveles similares a los reportados para el SAV (Noriega, 2001).

ANÁLISIS REGIONAL

La finalidad de este análisis es determinar el lugar donde se encuentra la mayor cantidad de plomo en cada estado de la Península de Yucatán. Para esto utilizaremos los resultados de la colecta de 2006, porque es en esta fecha en la que se tomaron muestras de *Thalassia testudinum* en los tres estados.

Comenzaremos este análisis observando el comportamiento de Campeche.

Estado de Campeche

En el Estado de Campeche se realizó la colecta en dos sitios: “Petenes” y “Campeche”. Las coordenadas de estos sitios se mencionan en la Tabla 7 y en la Figura 9 se muestra la ubicación de estos sitios en un mapa del Estado.

Lugar	Coordenadas	
Campeche	19°51.631 ´N	90°31.424 ´W
Petenes	20°39.421 ´N	90°27.826 ´W

Tabla 7. Localización de los lugares de colecta en Campeche



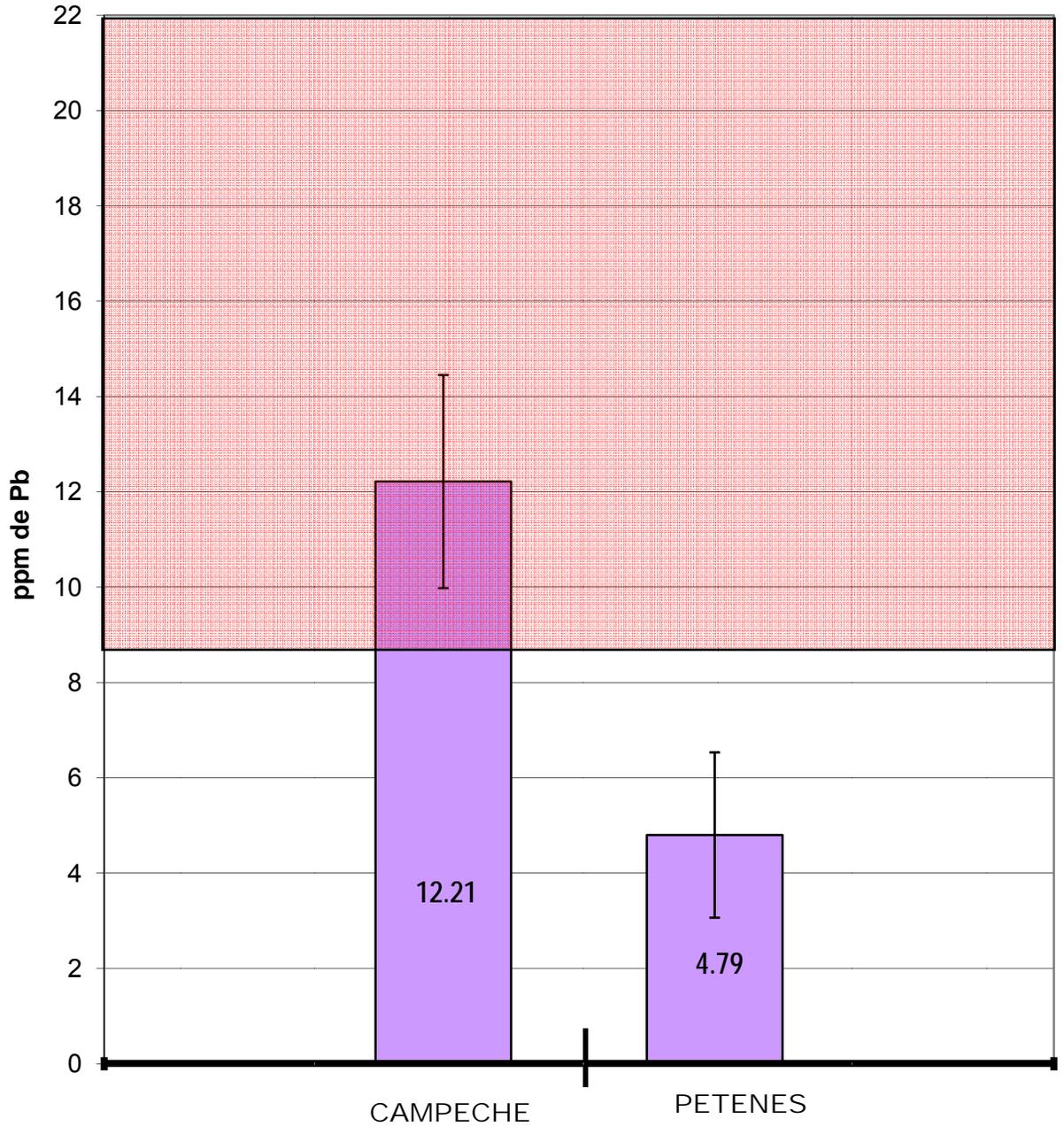
Figura 9. Ubicación de los lugares de colecta en el Estado de Campeche

Los resultados de concentración de plomo en hojas de los lugares de colecta en Campeche se reportan en la Gráfica 4, en la que se presenta el sitio de colecta en el eje de las abscisas y la concentración de plomo en $\mu\text{g/g}$ en el eje de las ordenadas. Los números dentro de las columnas indican la concentración de plomo en partes por millón ($\mu\text{g/g}$) para cada sitio. Las barras en las columnas representan la desviación estándar que indica la dispersión en los datos, ya que se promedió la concentración de plomo cuantificada en varias muestras del mismo lugar.

Al observar la Gráfica 4 es evidente que los niveles más altos de plomo en el estado se encuentran en la zona de “Campeche”. Al comparar la concentración de plomo en este lugar con la utilizada como referencia para zonas contaminadas (Noriega, 2001) se observa que la cantidad de plomo en Campeche es superior, lo que indica que se encuentra contaminada por plomo. Para tener una posible explicación de las fuentes de contaminación en el estado es importante analizar las industrias que hay en el lugar.

Campeche cuenta con el 90% de las instalaciones para la extracción y procesamiento del petróleo crudo y gas natural de Suroeste (García-Cuellar *et al*, 2004), por lo que puede pensarse que la contaminación por plomo en hojas de *T. testudinum* de Campeche se debe a la intensa actividad de la industria petrolera en el estado. La zona de colecta “Campeche” se encuentra ubicada cerca de Ciudad del Carmen y la zona petrolera de Cantarell, pero se encuentra mucho más cerca del complejo petrolero Ku-Maloob-Zaap . La ubicación de estos centros petroleros se muestra en la Figura 10.

CAMPECHE
(Agosto 2006)
Concentración promedio de plomo en hojas de los lugares de colecta



Gráfica 4. Niveles de plomo en muestras de hojas del Estado de Campeche

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)
Las barras en las columnas indican la desviación estándar

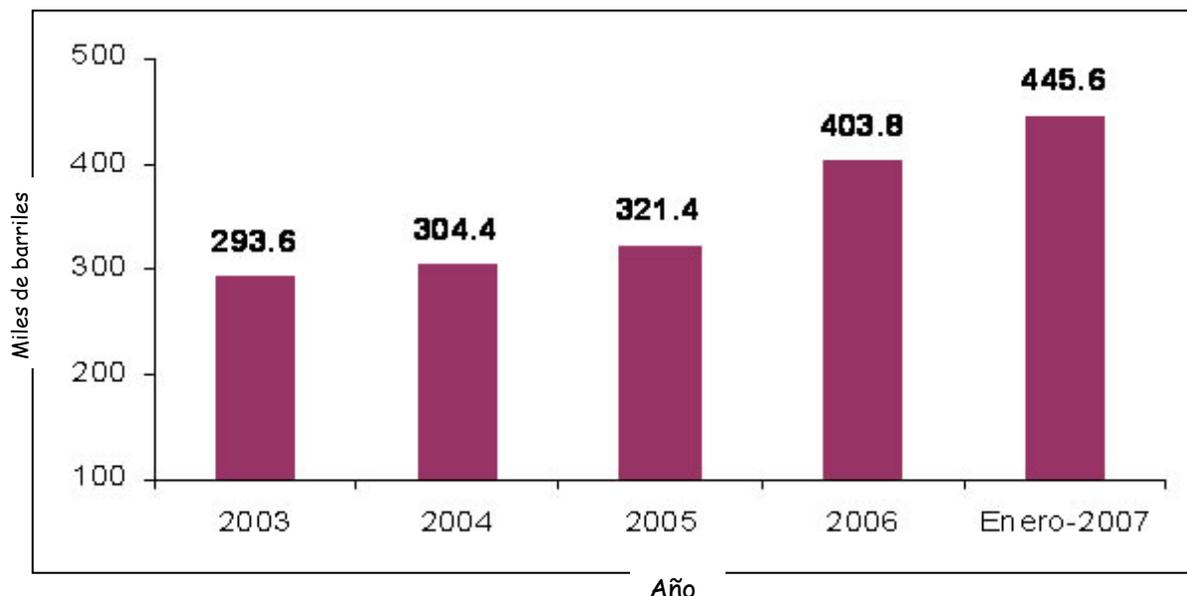


Figura 10. Ubicación del complejo Ku-Maloob-Zaap
(PetroQuiMex, 2007)

Los campos Ku-Maloob-Zaap aportan aproximadamente el 15 por ciento de la producción de petróleo nacional, lo que los convierte en el segundo complejo petrolero más importante de Petróleos Mexicanos, precedido por Cantarell (PEMEX, 2007)¹. En 2007 estos campos alcanzaron una producción de 496 mil barriles por día, superando los niveles máximos de producción nacional (PEMEX, 2007). A través de los años este complejo ha incrementado su producción. La Gráfica 5 muestra el aumento en la producción de petróleo en los campos Ku-Maloob-Zaap a través del tiempo.

¹ El 20 de febrero de 2009, la producción de petróleo en los campos Ku-Maloob-Zaap superó a la producción de Cantarell; con lo que Ku-Maloob-Zaap se convirtió en el principal productor de petróleo en México.
FUENTE: Periódico "El Universal". Viernes 20 de Febrero de 2009.

Gráfica 5. Producción de crudo en el Complejo Ku-Maloob-Zaap
(PEMEX, 2007)



En esta gráfica se observa un aumento significativo en la explotación de petróleo en este complejo, en un intervalo corto de tiempo. Aunque esto es económicamente favorable, ambientalmente puede ser desastroso porque una consecuencia del crecimiento de la industria petrolera es un aumento en la contaminación del ecosistema debido a sus procesos de exploración, extracción, transporte y almacenamiento (García-Cuellar *et al*, 2004). El plomo (entre otros metales pesados), es uno de los contaminantes emitidos por las refinerías al realizar procesos de combustión en hornos y calderas. Ante esta situación, es útil comparar los valores encontrados en este trabajo (12.21 ppm) con aquellos reportados por Noriega en el 2001 para el SAV (8.7 ppm), que es una zona que también está afectada por la industria petrolera. En esta comparación se encuentra que Campeche está 1.4 veces más contaminado por plomo que el SAV. Asociando esto al crecimiento de la industria petrolera en Campeche (Gráfica 5), se observa que a partir del año 2003 la producción de petróleo en la zona se ha incrementado 1.5 veces. Este crecimiento en la producción de petróleo es prácticamente el mismo que el aumento en los niveles de plomo, lo que indica que podrían estar correlacionados. Para poder comprobar la relación entre la industria

petrolera y la contaminación por plomo es necesario el monitoreo constante de la zona.

En la Gráfica 4 se observa también que el nivel de plomo en Petenes es mucho más pequeño que para la zona de Campeche, y comparado con el de Noriega (2001) no representa una zona contaminada. Esto se explica porque Petenes se encuentra dentro de la Reserva de la Biosfera “Los Petenes”, por lo cual se espera que tenga poca influencia antropogénica.

Como conclusión a este análisis de Campeche podemos resaltar lo siguiente:

-Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que la industria petrolera puede ser la principal fuente de contaminación por plomo en la zona de Campeche.

-Un incremento en la producción de petróleo se puede ver reflejado en un aumento similar en la concentración de plomo en la zona.

-Petenes es la zona que presenta menor concentración de plomo en el Estado porque al ser una Reserva de la Biosfera tiene poca influencia antropogénica.

Estado de Yucatán

En Yucatán se eligieron tres lugares para la colecta de *T. testudinum*. La localización de estos lugares se menciona en la Tabla 8 y la Figura 11 permite visualizar la ubicación de las zonas de colecta en un mapa del estado.

Lugar	Coordenadas	
Dzilam	21°24.783 ´N	89°07.354 ´W
Chelem	21°16.078 ´N	89°41.419 ´W
Celestún	NR*	

Tabla 8. Localización de los lugares de colecta en Yucatán

*NR = No referenciado

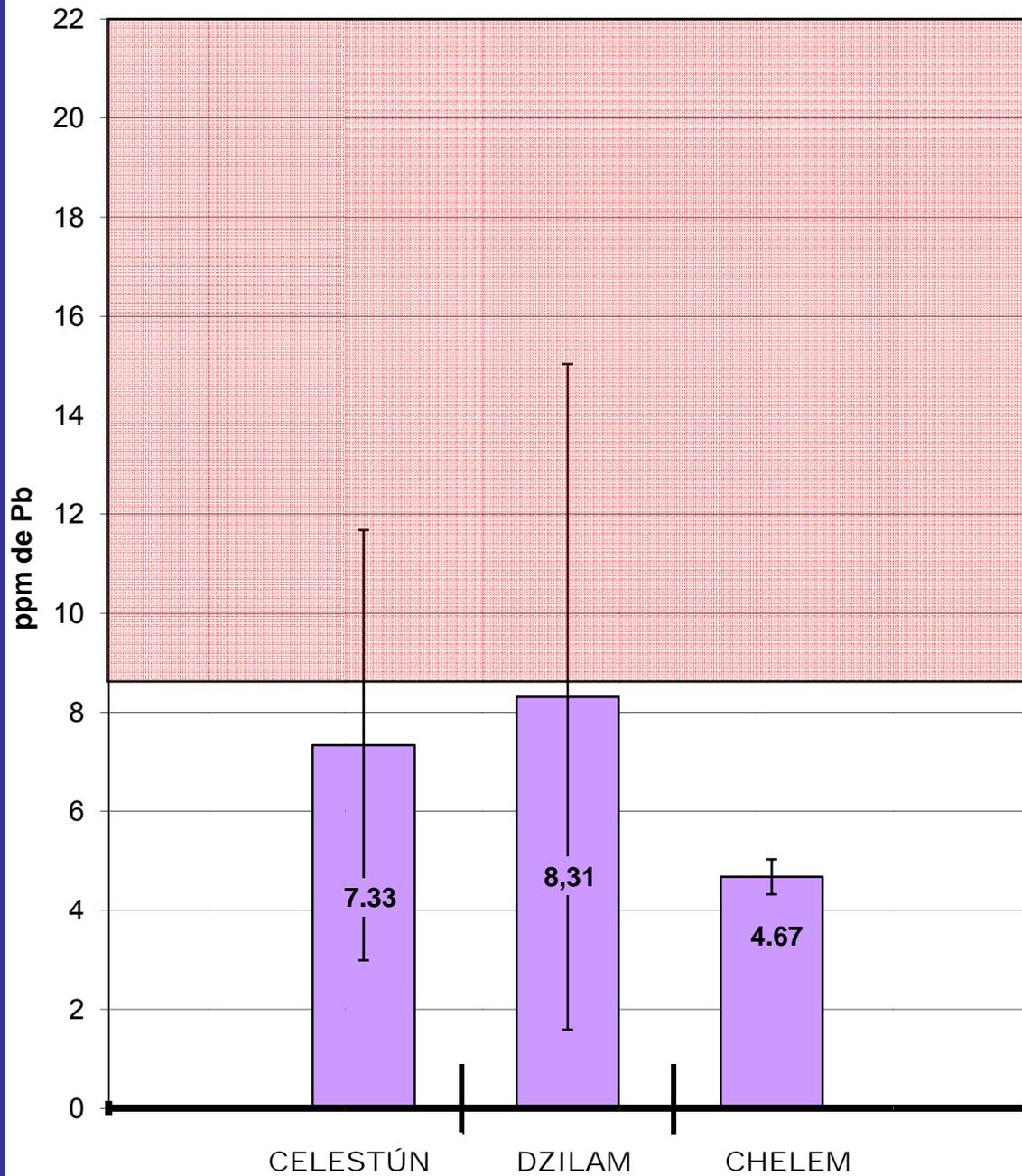


Figura 11. Ubicación de las zonas de colecta en el Estado de Yucatán

La Gráfica 6 presenta la concentración encontrada en cada lugar de colecta. En el eje de las abscisas se muestra el lugar, en las ordenadas la concentración de plomo en microgramos por gramo (ppm). Los números dentro de las columnas indican la concentración de plomo para cada lugar en partes por millón. Las barras en las columnas indican la desviación estándar.

Aunque la Gráfica 6 muestra que ninguno de los tres lugares presenta niveles que los clasificarían como zonas contaminadas, se observa que en Dzilam existe la mayor concentración de plomo en el estado, seguida por la concentración de plomo en hojas colectadas en Celestún.

YUCATÁN
(Agosto 2006)
Concentración promedio de plomo en hojas de los lugares de colecta



Gráfica 6. Concentración de plomo en muestras de hojas del Estado de Yucatán
 Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)
 Las barras en las columnas indican la desviación estándar

Estos resultados son alarmantes porque Celestún y Dzilam son Áreas Naturales Protegidas y por lo mismo se esperaba que presentaran una concentración baja de plomo. Los niveles altos de plomo en Celestún podrían explicarse por su cercanía con el Estado de Campeche, que como vimos anteriormente se encuentra bajo la influencia de la industria petrolera. Es importante notar que la Península de Yucatán se caracteriza por suelos de composición calcárea y la presencia de ríos subterráneos (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005). En esta zona el agua de lluvia se filtra a través del suelo llegando a los ríos subterráneos. Dado que el principal mecanismo de transporte de plomo es la deposición húmeda (EPA, 2006), puede pensarse que la presencia de plomo en este lugar se debe a la movilización del plomo a través de los ríos subterráneos; sin embargo, para poder confirmar esta hipótesis, es necesaria la realización de otras colectas en épocas de lluvias y secas.

Dzilam presenta niveles de plomo en hojas de *T. testudinum* similares a los encontrados en Celestún. Para analizar estos resultados es importante considerar que en Dzilam inicia la vertiente noroccidental, de la cual es parte el drenaje freático de Celestún (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005). Esto significa que Dzilam y Celestún están conectados por esta vertiente subterránea, y por esta razón también podría pensarse que la contaminación por plomo presenta el mismo comportamiento en las dos zonas.

Chelem es el lugar que presenta menor cantidad de plomo en las hojas colectadas. El punto de colecta se encuentra cerca de un pequeño puerto pesquero, por lo que este lugar sólo está bajo la influencia local de los residuos generados en la zona. Por esta razón podría pensarse que la cantidad de plomo encontrada indica la influencia de los desechos generados en el puerto. Es necesario realizar más análisis y colectas para corroborar esta hipótesis.

Para concluir con el análisis regional de Yucatán, es importante mencionar lo siguiente:

-Los niveles de plomo en Celestún probablemente se deben a su cercanía con el Estado de Campeche, que se encuentra influenciado por los contaminantes generados por la industria petrolera.

-La concentración de plomo en Dzilam es similar a la encontrada en Celestún porque ambos lugares se encuentran conectados mediante una vertiente subterránea.

-Chelem presenta los niveles más bajos de plomo en el estado. Este comportamiento podría atribuirse a que sólo se encuentra bajo la influencia local de los residuos generados en el puerto pesquero.

-Es fundamental la realización de un monitoreo constante para realizar un diagnóstico confiable de la contaminación por plomo en el Estado de Yucatán.

Estado de Quintana Roo

Para el análisis regional de este estado se utilizarán los resultados de la colecta realizada en ocho lugares distintos durante agosto de 2006. La Tabla 9 muestra los lugares que se consideran en este análisis y la Figura 12 muestra su ubicación en el mapa del Estado.

Lugar	Coordenadas	
Holbox	21°30.997 ´N	87°13.745 ´W
Contoy	21°29.953 ´N	86°43.756 ´W
Isla Mujeres	NR*	
Chacmochuc	21°23.766 ´N	86°49.340 ´W
Punta Cancún	21°08.327 ´N	86°44.754 ´W
Nichupté	NR*	
Bojórquez	NR*	
Punta Nizúc	NR*	

Tabla 9 Localización de los lugares de colecta en Quintana Roo

*NR = No referenciado

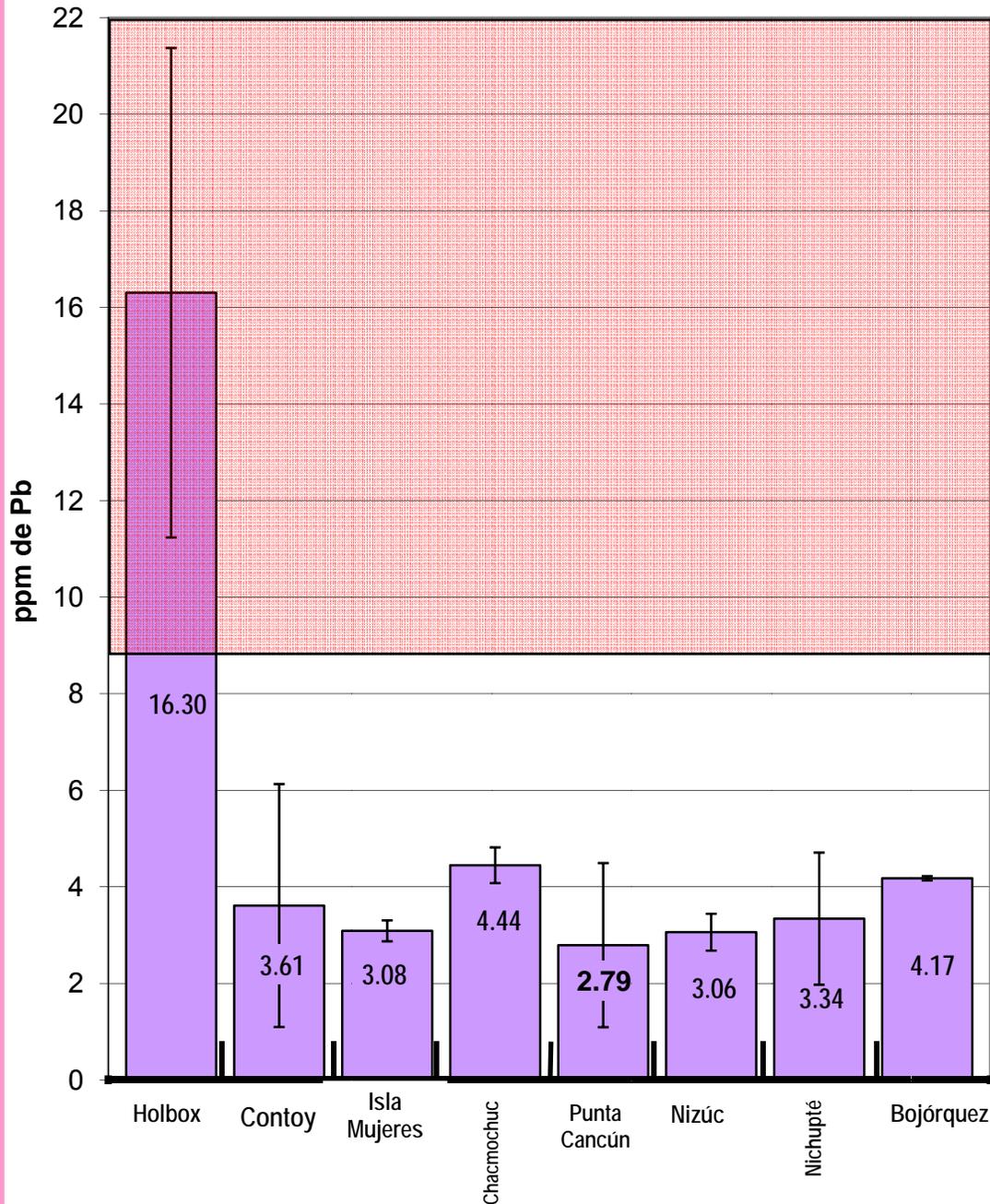


Figura 12. Ubicación de las zonas de colecta en Quintana Roo

La Gráfica 7 muestra la concentración de plomo en hojas de los ocho lugares colectados en Quintana Roo. En el eje de las abscisas se observa el lugar de colecta, en las ordenadas la concentración de plomo en microgramos por gramo (ppm). Los valores dentro de las columnas indican la concentración de plomo en ppm para cada sitio. Las barras en las columnas representan la desviación estándar, que fue calculada con la finalidad de observar la dispersión en los resultados porque para cada lugar se promedió la concentración encontrada en varias muestras.

En la Gráfica 7 se observa que el lugar que presenta contaminación en el estado es Holbox. El resto de los lugares presentan niveles de plomo pequeños y al compararlos con los reportados por Noriega para el SAV, indican que estos lugares no están contaminados.

QUINTANA ROO
(Agosto 2006)
Concentración promedio de plomo en los ocho lugares de colecta



Gráfica 7. Concentración de plomo en muestras de hojas del Estado de Quintana Roo
 Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)
 Las barras en las columnas indican la desviación estándar

Con la excepción de Holbox todas las zonas presentan niveles de plomo bajos. El plomo presente en las zonas se puede atribuir a la presencia de 63 hectáreas de tiraderos de basura a cielo abierto y a las 22.5 hectáreas de rellenos sanitarios (INEGI, 2007). Aunque hay poca cantidad de plomo, la simple presencia de este metal es preocupante porque no existen yacimientos en la zona. El plomo presente en el lugar se atribuye a las escurrencias y el mal manejo de residuos. Aunque los niveles de plomo en las zonas de colecta no son significativos (exceptuando Holbox), indican que es necesario prestar atención al manejo de residuos y que es necesario un monitoreo permanente en el estado.

Holbox presenta niveles de plomo muy altos, que indican que se encuentra contaminado. Estos resultados no son los esperados porque Holbox es parte del Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam, además de ser una isla con pocos habitantes. Para reconocer las causas de contaminación por plomo es importante realizar un análisis local mediante la colecta en varios sitios georeferenciados. De esta forma se podrían encontrar los puntos rojos de contaminación en la zona de Holbox, y con esto sugerir las posibles fuentes de contaminación.

ANÁLISIS LOCAL

El objetivo de hacer un análisis local es el de encontrar los posibles puntos rojos de contaminación, revisando la concentración de plomo encontrada en Holbox y Contoy. Para esto se utilizan los datos de la concentración de plomo para cada lugar, cada sitio y en cada colecta.

Holbox

Junio 2004

El área de estudio es la Isla de Holbox, particularmente la Laguna de Yalahau. En la Figura 13 se muestra la ubicación de la Laguna de Yalahau en México, y en la Figura 14 se detalla la ubicación de los ocho sitios de colecta en una fotografía aérea de Holbox.

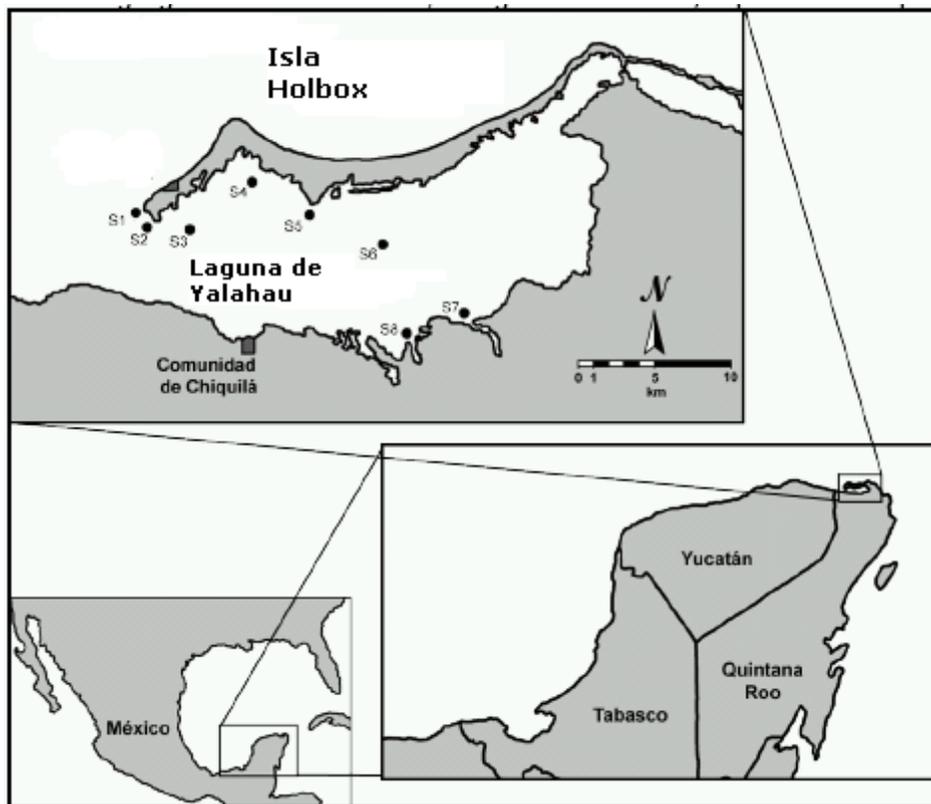


Figura 13. Ubicación de la Laguna de Yalahau en Holbox, Quintana Roo

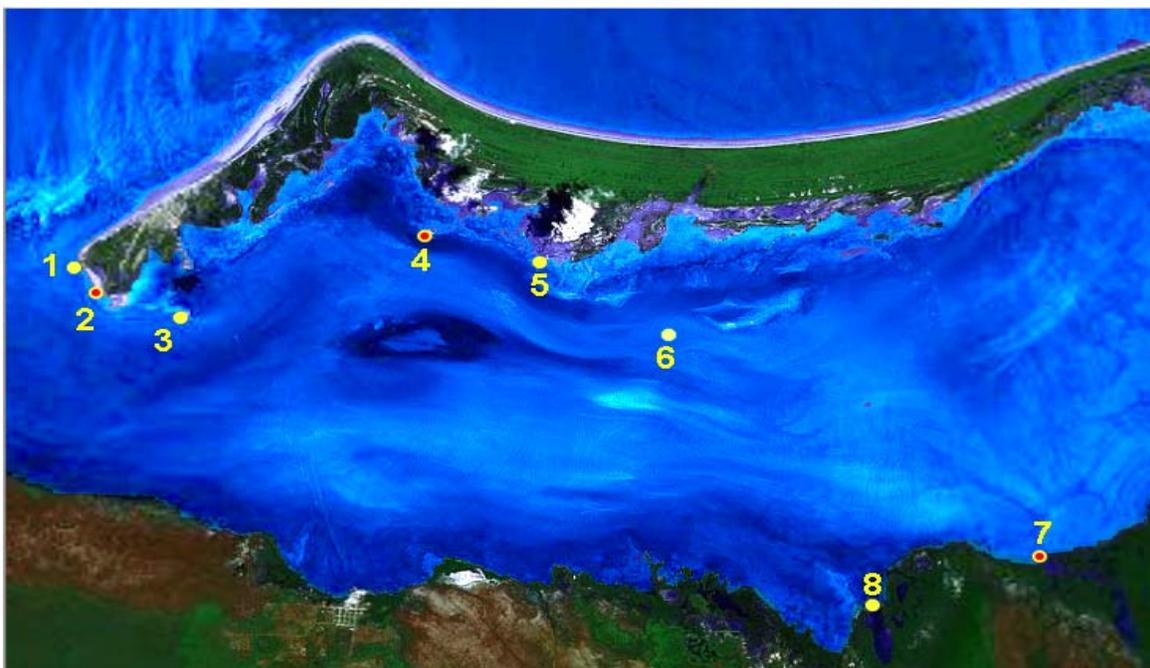


Figura 14. Sitios de colecta en la Laguna de Yalahau en Holbox

En la Tabla 10 se especifican los sitios de colecta con su nombre común y sus coordenadas geográficas.

Lugar	Sitio	Coordenadas
Holbox	1 (Isla Pasión)	21°30.997 ´N 87°23.525 ´W
	2 (Basurero)	21°30.255 ´N 87°23.525 ´W
	3 (Boya Recalada)	21°29.890 ´N 87°22.208 ´W
	4 (Isla Pájaros)	21°31.044 ´N 87°19.248 ´W
	5 (Punta Catalán)	21°60.427 ´N 87°17.576 ´W
	6 (Cetro Laguna)	21°29.291 ´N 87°15.776 ´W
	7 (Yalikin)	21°26.351 ´N 87°11.174 ´W
	8 (Río Bomba)	21°25.847 ´N 87°13.745 ´W

Tabla 10. Sitios de colecta en Holbox

En la Tabla 10 se observa que el sitio 2 se clasifica como “basurero”. Esto se debe a que se encuentra cercano al único basurero a cielo abierto que se encuentra en la Isla de Holbox. Este es el lugar de destino de los desechos generados por los habitantes de la comunidad, por lo tanto se podría pensar que es en este punto

donde existen grandes cantidades de contaminantes. Otros sitios de colecta importantes son el 7 (Yalikin) y el 8 (Río Bomba), porque están cercanos a la salida de uno de los ríos subterráneos que aparentemente nace cerca de la ciudad de Cancún.

En la colecta de junio de 2004 la concentración de plomo en muestras de hojas se reportó como No Detectable. El análisis de la concentración de plomo en las siguientes colectas se presenta a continuación.

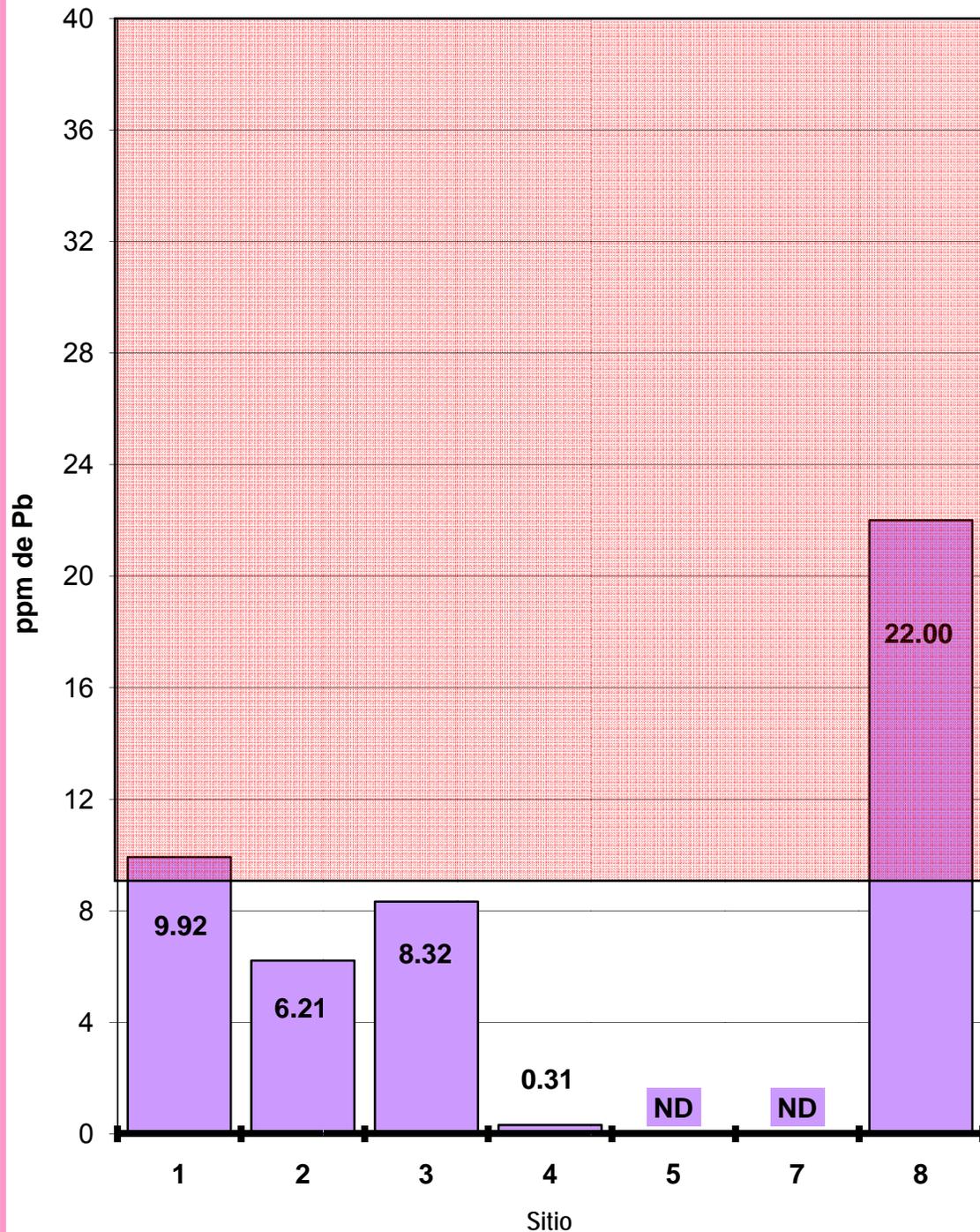
Octubre 2005

En la Gráfica 8 se presenta la concentración de plomo encontrada en Holbox en la colecta de octubre de 2005. En el eje de las ordenadas se indica el sitio de colecta; en el eje de las abscisas, la concentración de plomo en partes por millón ($\mu\text{g/g}$). Los números en las columnas representan la concentración de plomo en ppm ($\mu\text{g/g}$). Esta gráfica se obtuvo con los resultados de la cuantificación de plomo en muestras de hojas colectadas en los ocho sitios de Holbox en octubre de 2005.

En la gráfica 8 se observa que el sitio ocho es el más contaminado, seguido por los sitios uno, tres y dos en orden decreciente.

Los niveles tan altos en el sitio ocho (Río Bomba) probablemente se deben a que se encuentra cerca de la salida de un río subterráneo, que aparentemente tiene su nacimiento cerca de la Ciudad de Cancún. Esto nos lleva a pensar que el plomo es acarreado desde otros lugares del Estado de Quintana Roo, lo que indicaría un problema de contaminación a nivel regional porque la concentración encontrada en este sitio (22.0 ppm) es mucho más alta que la reportada por Noriega (2001) para zonas contaminadas (8.7 ppm). Para confirmar esta hipótesis es fundamental la realización de colectas posteriores y el análisis más preciso con marcadores para determinar el nacimiento del río subterráneo.

HOLBOX
(Octubre 2005)
Concentración de plomo en hojas



Gráfica 8. Concentración de plomo en Holbox en la colecta de octubre de 2005

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)

Cerca del sitio 2 existe un basurero a cielo abierto, por lo que podría pensarse que los niveles de plomo en los sitios uno, dos y tres se deben a la influencia de los desechos encontrados en el basurero de la comunidad, lo que indicaría un problema de contaminación a nivel local.

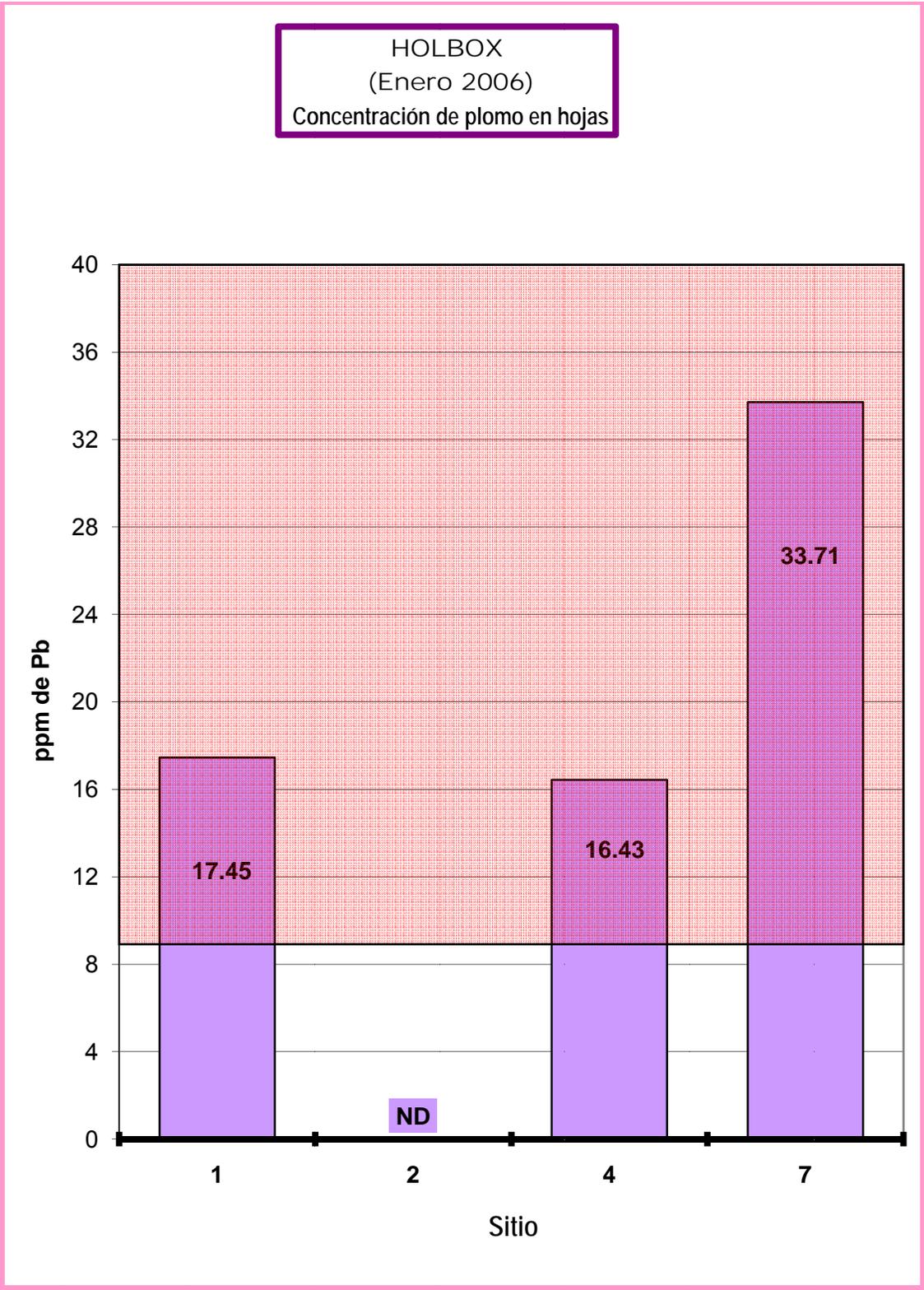
Enero 2006

En la Gráfica 9 se presentan los niveles de plomo encontrados en hojas de Holbox durante la colecta de enero de 2006. Los números dentro de las columnas representan la concentración de plomo en microgramos de plomo por gramo de muestra seca (ppm) y las barras en las columnas indican la desviación estándar. En el eje de las abscisas se muestra el sitio de colecta y en del eje de las ordenadas la concentración de plomo en ppm ($\mu\text{g/g}$).

En la Gráfica 9 puede observarse que los valores más altos de concentración de plomo se encuentran en el sitio 7, seguidos por el sitio 1 y el sitio 4 en orden decreciente. En el sitio 2, no se detectaron niveles de plomo. En esta gráfica no aparecen los valores de los sitios 3, 5, 6 y 8 debido a que en estos puntos de colecta no se encontraron praderas de *Thalassia testudinum* disponibles ya que las hojas estaban muy enterradas.

Se sabe que los resultados que observamos reflejan lo ocurrido durante los tres meses anteriores a la colecta (Tussenbroek, *et al*, 2006). En esta gráfica se observa nuevamente el efecto del Huracán Wilma pero esta vez a nivel local con la concentración en cada punto. De esta manera, los valores tan altos en el sitio 7 muestran la influencia del río subterráneo, pero además son un reflejo del aumento en las escurrentías debidas a la presencia del huracán.

También en los sitios 1 y 4 se registra una concentración elevada de plomo. Al sólo estar influenciados por la cantidad de desechos generados en el lugar, los niveles tan altos pueden atribuirse al aumento en el transporte de plomo al aumentar las precipitaciones y las escurrentías como consecuencia del huracán.



Gráfica 9 Concentración de plomo en muestras de hojas de Holbox en enero de 2006

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)

Es interesante notar que en el sitio 2, que está influenciado directamente por el basurero de Holbox, no se detectan niveles de plomo. Ante los resultados que arroja la cuantificación de plomo en el sitio más cercano (sitio 1), podría pensarse que el metal fue transportado hacia otros lugares.

Agosto 2006

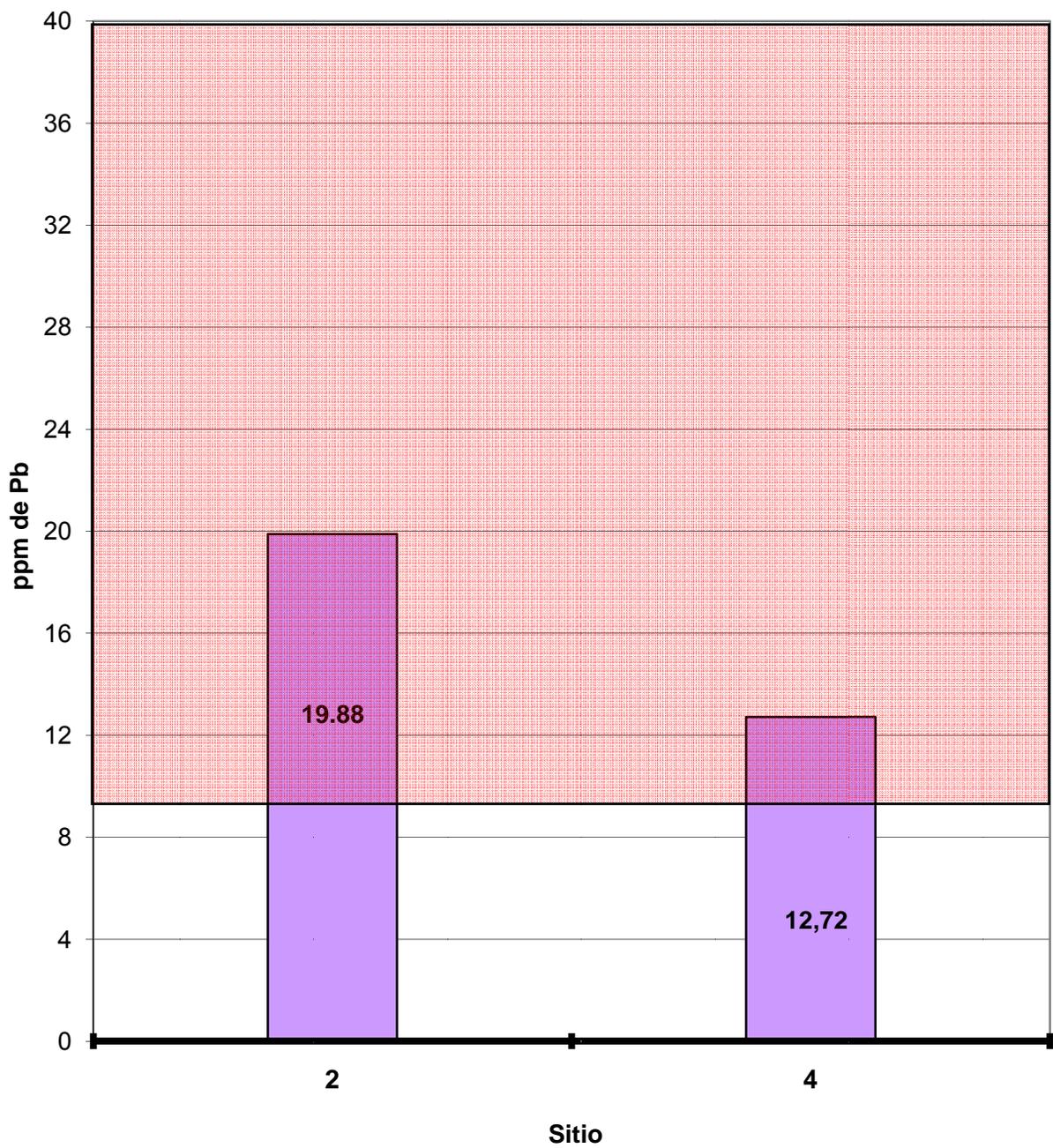
En la Gráfica 10 se observa la concentración de plomo en hojas colectadas en Holbox en agosto de 2006. El eje de las abscisas presenta el sitio de colecta, el eje de las ordenadas la concentración de plomo en partes por millón ($\mu\text{g/g}$). Los valores en las columnas indican la concentración de plomo en cada punto.

En esta fecha sólo se lograron coleccionar muestras para los sitios 2 y 4, ya que en los otros puntos no se encontraron praderas de *T. testudinum* disponibles.

En la Gráfica 10 se observa que en los dos puntos de colecta se registran altos niveles de plomo. Si lo que observamos indica lo ocurrido en el momento de la colecta y tres meses antes, los resultados de agosto reflejan lo ocurrido durante los meses de mayo, junio y julio, que es precisamente la época de secas. Ante este argumento es válido pensar que, debido a la falta de lluvias, el transporte de plomo se ve disminuido, y por lo tanto la concentración en hojas del sitio 4 (12.72 ppm) es menor que la encontrada en la colecta de enero de este mismo año (16.43 ppm), además de que el sitio ya no se encuentra tan influenciado por un acontecimiento ambiental drástico como fue el huracán de octubre de 2005.

En el sitio 2 se registran los niveles de plomo más altos en esta colecta. Es importante recordar que en la colecta de enero de 2006 no se detectaron niveles de plomo en este sitio, y que este comportamiento fue atribuido a la movilización del metal hacia el sitio 1. La alta concentración de plomo en muestras del sitio 2 en esta colecta refuerza esta hipótesis, porque la presencia de altos niveles de plomo en el sitio indica el aporte de este metal desde una fuente cercana, probablemente el basurero de la comunidad.

HOLBOX
(Agosto 2006)
Concentración de plomo en hojas



Gráfica 10. Concentración de plomo en hojas de Holbox colectadas en agosto de 2006
Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)

Ante estos resultados es importante continuar realizando colectas para comprobar que el sitio 2 se encuentra contaminado con plomo a causa del basurero.

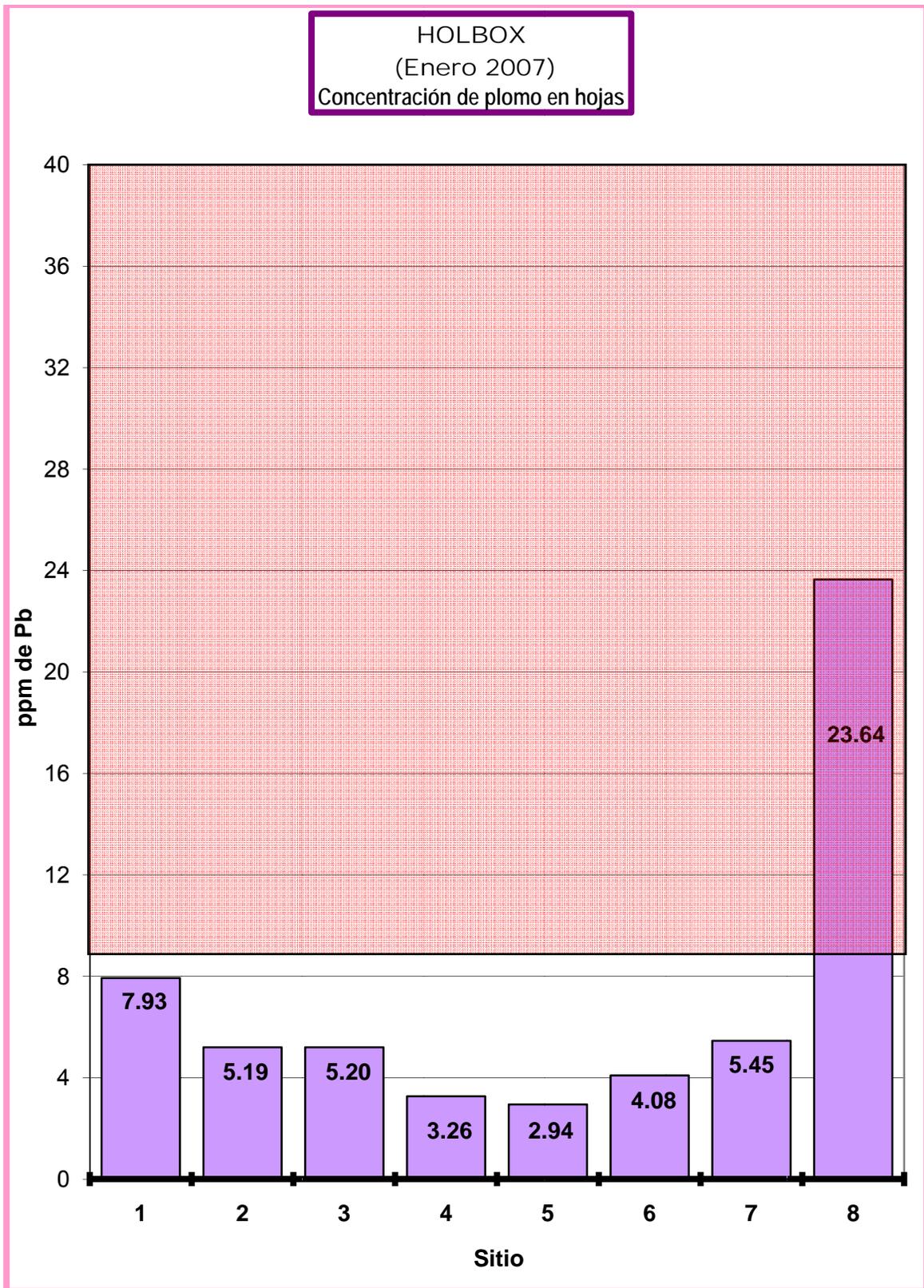
Enero 2007

En la colecta de 2007 fue posible obtener muestras de todos los puntos. Los resultados se presentan en la Gráfica 11, en la que se observa el sitio de colecta en las abscisas, y en el eje de las ordenadas se muestra la concentración de plomo en ppm ($\mu\text{g/g}$). Los valores dentro de las columnas significan el valor de la concentración de plomo en ppm ($\mu\text{g/g}$) para ese sitio de colecta.

En esta fecha, el sitio que refleja la concentración más elevada es el número 8, seguido por los sitios 1, 7, 3 y 2.

Si la concentración que observamos representa lo acontecido durante los tres meses anteriores a la colecta, en realidad estamos monitoreando lo ocurrido durante octubre, noviembre y diciembre del año 2006. Es interesante notar que aunque se registran niveles considerables de plomo, éstos son mucho menores a los encontrados un año antes en los que se notaba la influencia del huracán. Si el principal mecanismo de transporte de plomo es la deposición húmeda, es adecuado pensar que al no haber un aumento tan drástico en las precipitaciones (como aquél que se presentó en octubre de 2005 a causa del huracán), los niveles de plomo correspondientes a la misma época del año sean menores.

Los valores tan altos en el sitio 8 reflejan nuevamente la influencia del río subterráneo, al igual que la concentración de plomo en el sitio 7. Aunque es importante continuar el monitoreo mediante la realización de colectas futuras y su correspondiente análisis, hasta este momento podría decirse que existe un problema de contaminación a nivel regional ya que el río transporta el plomo generado en otras zonas del estado, posiblemente en la ciudad de Cancún. Es necesario realizar estudios para determinar el origen del río subterráneo.



Gráfica 11. Niveles de plomo en hojas colectadas en Holbox en enero de 2007

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)

Los sitios 1, 2 y 3, también presentan niveles importantes de plomo, aunque no alcanzan los niveles reportados por Noriega (2001) para zonas contaminadas. La concentración de plomo en las hojas de estos sitios indica que es importante mejorar el manejo de residuos de la Isla de Holbox. Como estos sitios sólo se encuentran influenciados por el basurero de Holbox, podemos decir que existe un problema de contaminación a nivel local.

Los sitios 4, 5 y 6 son los que presentan la concentración más baja de plomo en toda la Laguna, porque esta es la zona que se encuentra menos influenciada por el basurero y por el río. Aunque los niveles encontrados son inferiores a los reportados por Noriega para zonas contaminadas, indican que es muy importante la realización de un monitoreo constante con el fin de prevenir la contaminación y restaurar la Laguna de Yalahau.

Como conclusión al análisis de Holbox, podemos decir que los puntos rojos son los siguientes:

- sitios 1 y 2: como indicadores de contaminación a nivel local a causa del basurero de Holbox.

- sitios 7 y 8: indicadores de un problema regional identificado por la influencia de un río subterráneo.

Al ser éstos los puntos rojos de Holbox, es necesario monitorearlos constantemente.

Contoy

El lugar de estudio es Isla Contoy, ubicada al norte de Isla Mujeres. La ubicación de Isla Contoy en la Península así como sus sitios de colecta se muestran en la Figura 15 y en la Tabla 11 se indican sus coordenadas.

Contamos con datos de colectas realizadas en octubre de 2005, agosto de 2006 y enero de 2007. Los resultados obtenidos se analizarán a continuación.

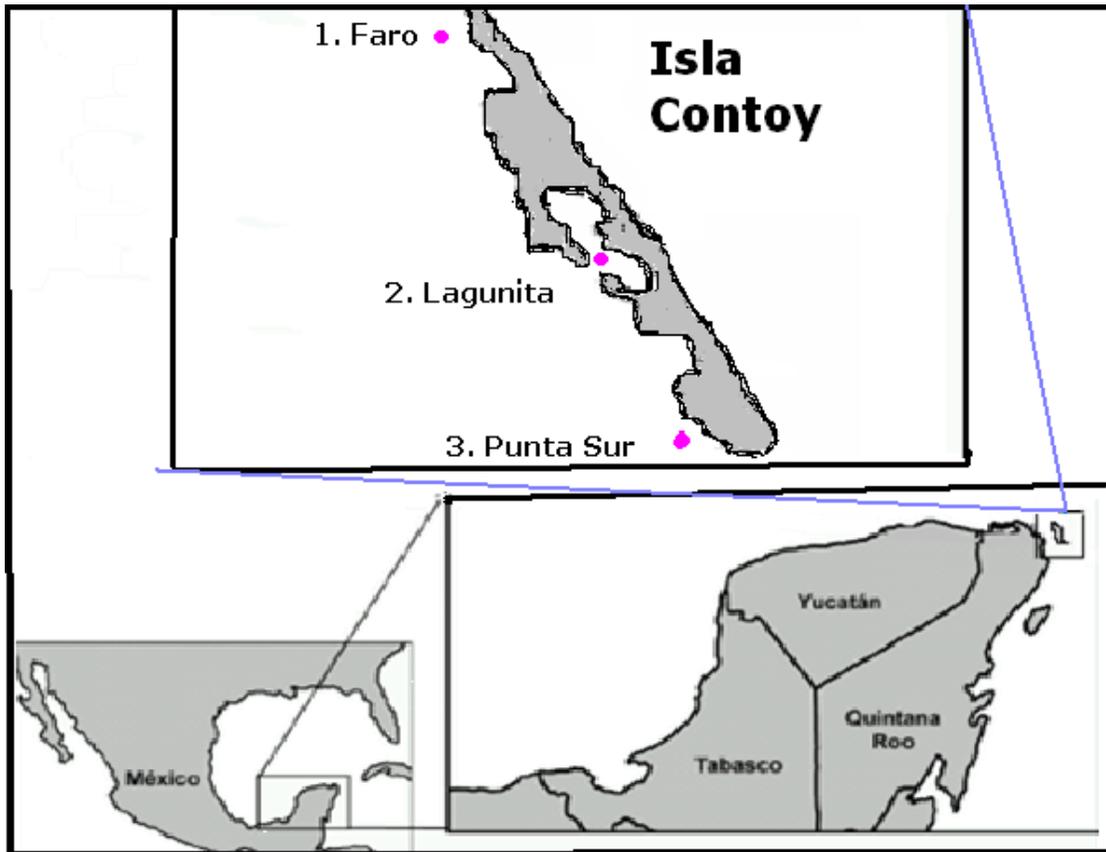


Figura 15. Ubicación de Isla Contoy

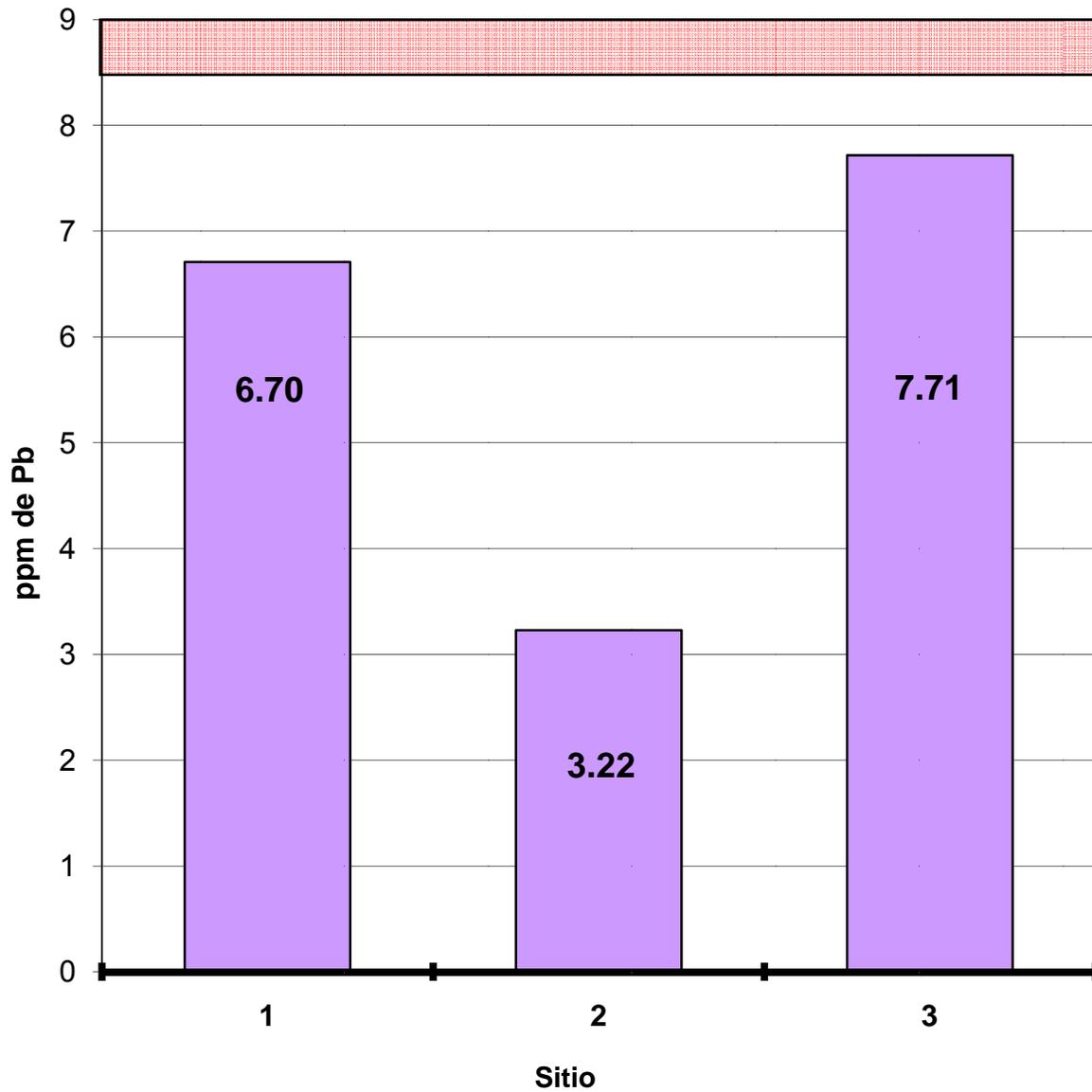
Contoy	1 (Faro)	21°29.953´N 86°43.756´W
	2 (Lagunita)	No Referenciado
	3 (Punta Sur)	No Referenciado *

Tabla 11. Coordenadas de los sitios de colecta en Contoy

Octubre 2005

La Gráfica 12 presenta los valores de plomo encontrados en octubre de 2005 en la Isla Contoy. En el eje de las ordenadas se presenta la concentración de plomo en partes por millón ($\mu\text{g/g}$). El valor dentro de las columnas representa la concentración.

CONTOY
(Octubre 2005)
Concentración de plomo en hojas



Gráfica 12. Concentración de plomo en muestras de hojas de Contoy en octubre 2005

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)

En la Gráfica 12 se observa que el sitio que presenta los niveles más altos de plomo es el llamado “Punta Sur” (sitio 3), seguido por el sitio 1 (“Faro”) y por último el sitio 2 (“Lagunita”). Los sitios 1 y 3 presentan niveles de plomo muy cercanos a los reportados por Noriega en el año 2001 para zonas contaminadas (8.7 ppm), por lo que podríamos suponer que son éstos los que representan los puntos rojos de contaminación en esta zona; sin embargo, para poder comprobar esta hipótesis es necesario el análisis de colectas realizadas en épocas de lluvias y secas.

Como el periodo de crecimiento de las hojas de *T. testudinum* es de tres meses, lo que se observa en esta colecta es la concentración acumulada durante los meses de julio, agosto y septiembre, que es la época de lluvias. Ya que el mecanismo de transporte de plomo es la deposición húmeda, en general se espera que en colectas realizadas en estas fechas se encuentren los niveles más altos de plomo. Esta hipótesis puede ser comprobada mediante el monitoreo constante de la zona.

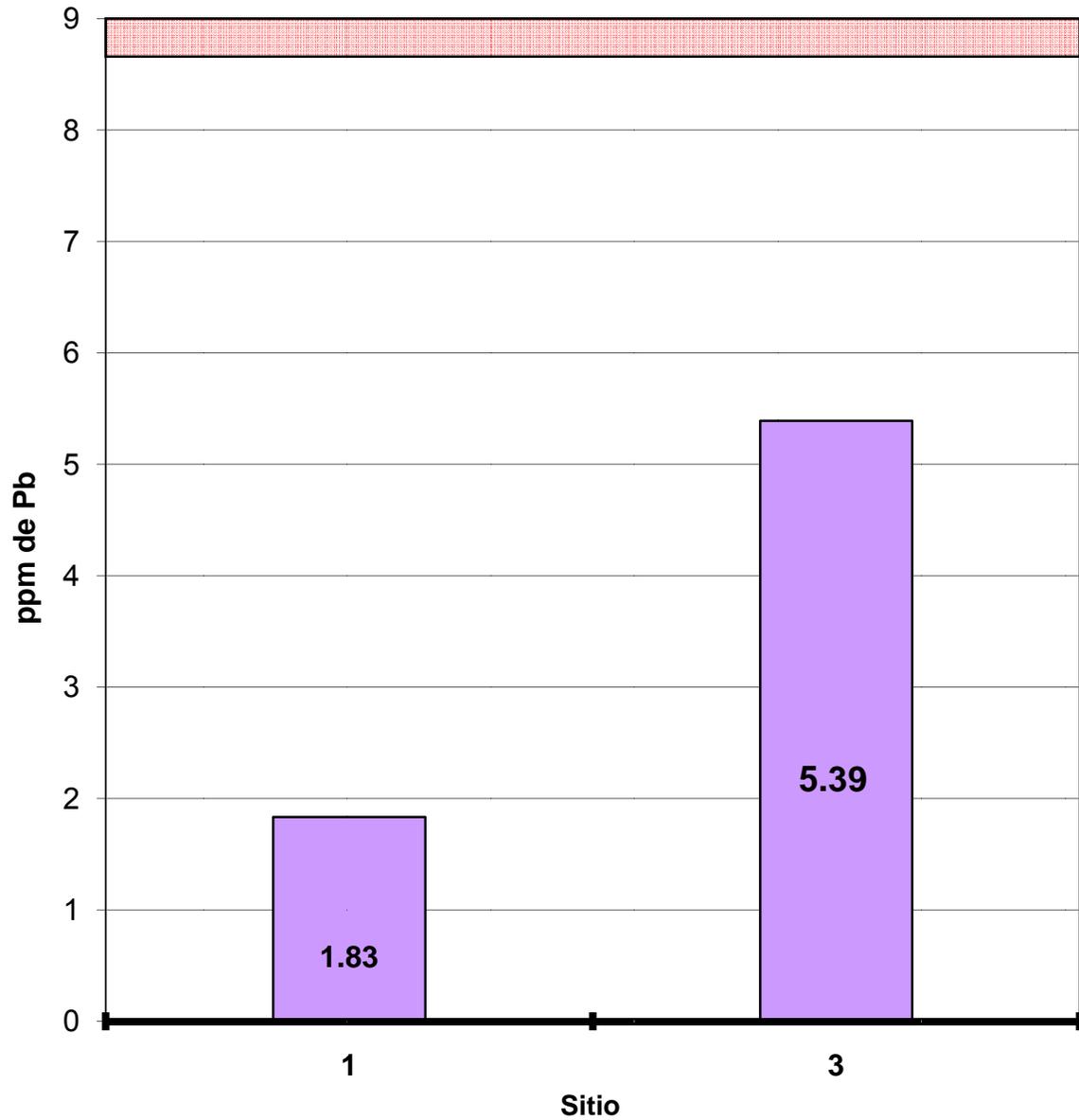
Agosto 2006

Para este análisis se utilizará la Gráfica 13. En ella se presenta la concentración de plomo ppm ($\mu\text{g/g}$). El número dentro de las columnas representa la concentración de plomo encontrada en cada sitio.

En la Gráfica 13 se observa el valor de la concentración de plomo en muestras de hojas de Contoy en agosto de 2006. Nuevamente los niveles más altos de plomo se encuentran en el sitio 3 (“Punta Sur”), por lo que podría pensarse que éste es un posible punto rojo de contaminación.

La concentración para los dos sitios en esta colecta es inferior a la reportada por Noriega en el 2001 para zonas contaminadas (8.7 ppm) y también por la encontrada en este trabajo en la colecta de octubre de 2005.

CONTOY
(Agosto 2006)
Concentración de plomo en hojas



Gráfica 13. Concentración de plomo en muestras de hojas de Contoy en agosto de 2006

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)

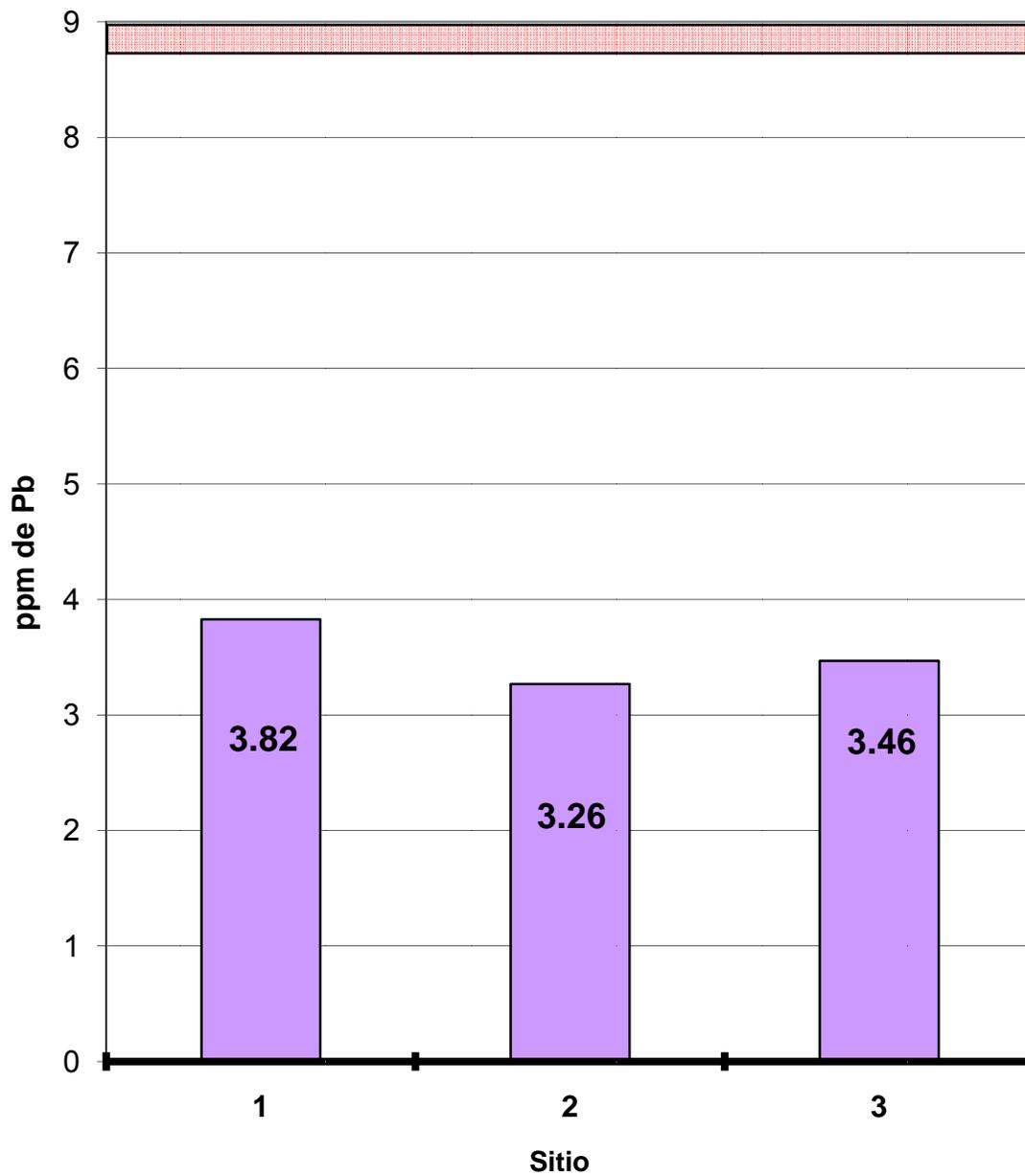
Si consideramos que los datos de la colecta de agosto de 2006 reflejan lo ocurrido durante mayo, junio y julio, podríamos suponer que la disminución en la concentración con respecto a los datos de octubre de 2005 se debe a que la colecta de agosto de 2006 corresponde a la época de secas. Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, al ser la deposición húmeda el principal mecanismo de transporte de plomo, se espera una disminución en la concentración al coleccionar en época de secas ya que al no haber precipitaciones, es menor la cantidad de plomo transportado.

Enero 2007

Los resultados de 2007 serán analizados con la Gráfica 14. En ella se presenta dentro de la columnas, la concentración de plomo en ppm ($\mu\text{g/g}$) encontrada en hojas. La Gráfica 14 muestra los niveles más bajos de plomo en muestras de Contoy en las colectas realizadas. Lo que observamos en la gráfica es el resultado de la cantidad de plomo en cada punto de la Isla de Contoy durante los meses de octubre, noviembre y diciembre del año 2006, porque las hojas de *T. testudinum* cambian cada tres meses. Estos meses corresponden a una época en la que no se presentan precipitaciones y por lo tanto podría pensarse que existe muy poco transporte de plomo. Debido a esto se presentan los menores niveles comparada con las otras colectas. Además se observa que los valores encontrados son muy parecidos entre sí, por lo que se concluye que en esta fecha la contaminación por plomo en Contoy presenta una distribución similar.

A pesar de que los niveles de plomo en todas las colectas se encuentran por debajo de los reportados por Noriega (2001) para zonas contaminadas, la simple presencia de plomo en el lugar indica una alteración porque en esta zona no existen fuentes naturales de este metal. Para averiguar de donde proviene el plomo es un buen comienzo el haber identificado los puntos rojos. Hasta este momento podría pensarse que la contaminación por plomo en Contoy podría ser el resultado de un mal manejo de residuos en la Isla, ya que ésta no se encuentra influenciada por el aporte de contaminantes generados en otras zonas del Estado de Quintana Roo.

CONTOY
(Enero 2007)
Concentración de plomo en hojas



Gráfica 14. Concentración de plomo en hojas de Contoy en enero de 2007

Los valores dentro de la parte sombreada representan zonas contaminadas según los trabajos de Noriega (2001)

Como conclusión al análisis local de Contoy podemos decir que:

-Los puntos rojos de contaminación por plomo en Contoy son el sitio 3 ("Punta Sur") y el sitio 1 ("Faro").

-Es importante el monitoreo constante de la zona aunque los niveles de plomo se encuentran por debajo de los valores de referencia para zonas contaminadas (Noriega, 2001). La simple presencia de plomo en el lugar representa un problema para el ecosistema.

CONCLUSIONES

Se estudió la presencia de plomo en la Península de Yucatán utilizando el pasto marino *Thalassia testudinum*, como bioindicador. Las conclusiones de este estudio son las siguientes:

- La naturaleza cárstica de los suelos y la gran cantidad de ríos subterráneos en la Península de Yucatán son factores importantes en el transporte de los contaminantes. Estas características permiten que el agua de lluvia se filtre hacia el subsuelo y de esta manera se arrastran los contaminantes a través de las corrientes subterráneas.
- La mayor concentración de plomo se encontró en Holbox en enero de 2006. Este comportamiento se explica por el aumento drástico en las precipitaciones y por lo tanto, en el transporte de materia a causa del Huracán Wilma ocurrido en octubre de 2005.
- En la Península de Yucatán no existen fuentes naturales de metales por lo que el plomo encontrado probablemente refleja un problema de mal manejo de residuos.
- Se observó que los niveles de plomo encontrados en los lugares de colecta son mayores en épocas de lluvias que aquéllos encontrados en época de secas; esto es porque al aumentar las precipitaciones aumenta el transporte de plomo ya que el principal mecanismo de movilización de este metal es la deposición húmeda.
- La comparación de los resultados encontrados en este estudio con los reportados en trabajos anteriores indican que la contaminación por plomo en Holbox se ha presentado de manera gradual.

- En Yucatán se encontraron niveles bajos de plomo; sin embargo, éstos indican que es importante prestar atención en el manejo de desechos.
- Los niveles de plomo encontrados en muestras de hojas de *Thalassia testudinum* en el Estado de Campeche indican que éste se encuentra contaminado por plomo.
- La evaluación de la concentración de plomo en Campeche permite el monitoreo indirecto del Golfo de México, porque los niveles de plomo en Campeche son similares a los reportados para el Sistema Arrecifal Veracruzano.
- Un aumento en la producción de petróleo ve reflejado en un incremento similar en los niveles de plomo. Los niveles de plomo en Campeche sugieren que la industria petrolera puede ser la principal fuente de contaminación en la zona.
- La concentración de plomo de Celestún probablemente se debe a su cercanía geográfica con el Estado de Campeche, que se encuentra influenciado por los contaminantes generados por la industria petrolera.
- Los niveles de plomo en Dzilam son similares a los de Celestún porque ambos lugares se encuentran conectados mediante una vertiente subterránea.
- Los niveles de plomo en Chelem son los más bajos del Estado de Yucatán porque sólo se encuentra bajo la influencia local de los residuos generados en el puerto pesquero.

- Los puntos rojos de Holbox , Quintana Roo son los siguientes:
 - sitios 1 y 2: por la influencia del basurero de Holbox.
 - sitios 7 y 8: debido a la probable influencia de un río subterráneo.

- El sitio 8 de Holbox es el punto que presenta los niveles de plomo más altos en la Península de Yucatán. Este comportamiento no es el esperado puesto que la isla forma parte del Área Natural Protegida de Yum Balam, una zona de baja influencia antropogénica. Con la información que se tiene hasta el momento, este grado de contaminación solo puede atribuirse a la presencia de un río subterráneo que transporta contaminantes probablemente de la Ciudad de Cancún. Ante estos resultados resulta fundamental la realización de estudios detallados que permitan identificar las fuentes generadoras de esta contaminación.

- Se lograron identificar los puntos rojos de Contoy, que son el reflejo de un mal manejo de residuos en la Isla. Los puntos rojos de Contoy son los siguientes:
 - Sitio 3 (“Punta Sur”) y el sitio 1 (“Faro”). La contaminación en estos puntos indica un problema de mal manejo de residuos.

- Es fundamental continuar con el monitoreo constante de la Península de Yucatán. Aunque los niveles de plomo se encuentren por debajo de los valores de referencia para zonas contaminadas, la simple presencia de plomo en el lugar representa un problema para el ecosistema.

ANEXO I

TABLAS CON LOS DATOS REPORTADOS

A continuación se muestran las tablas con los datos de origen de las gráficas presentadas en este estudio. Los valores de concentración de plomo se encuentran expresados en μg de plomo por gramo de muestra seca (ppm).

Fecha de colecta	Sitio de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/ g}$)	Promedio ($\mu\text{g/ g}$)	Desviación Estándar
Enero 2006	Holbox 1	17.45	22.53	9.69
	Holbox 2	ND		
	Holbox 4	16.43		
	Holbox 7	33.71		
Enero 2007	Holbox 1	7.92	7.21	6.81
	Holbox 2	5.19		
	Holbox 3	5.20		
	Holbox 4	3.26		
	Holbox 5	2.94		
	Holbox 6	4.08		
	Holbox 7	5.45		
	Holbox 8	23.64		

Tabla 12. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en HOLBOX utilizados para la elaboración de la Gráfica 1 (Análisis Temporal).

*ND = No detectable

Fecha de colecta	Promedio de la concentración de plomo en Holbox ($\mu\text{g/ g}$)	Desviación Estándar
Junio 2004	ND	-
Octubre 2005	9.35	7.95
Enero 2006	22.53	9.69
Agosto 2006	16.30	5.06
Enero 2007	7.21	6.81

Tabla 13. Datos de concentración promedio de plomo en muestras de HOLBOX utilizados para realizar el Análisis Anual (Gráfica 2).

*ND = No detectable

Estado	Lugar de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/g}$)	Promedio	Desviación Estándar
Campeche	Campeche	12.21	8.5	5.24
	Petenes	4.79		
Yucatán	Celestún	7.33	6.77	1.88
	Dzilam	8.31		
	Chelem	4.67		
Quintana Roo	Holbox	16.30	5.10	4.56
	Contoy	3.61		
	Isla Mujeres	3.08		
	Chacmochuc	4.44		
	Punta Cancún	2.79		
	Punta Nizúc	3.05		
	Nichupté	3.34		
	Bojórquez	4.17		

Tabla 14. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en agosto de 2006 utilizados para realizar el Análisis Espacial (Gráfica 3).

Estado	Lugar de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/g}$)	Desviación Estándar
Campeche	Campeche	12.21	2.23
	Petenes	4.79	1.73

Tabla 15. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en agosto de 2006 utilizados para realizar el Análisis Regional del Estado de Campeche (Gráfica 4).

Estado	Lugar de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/g}$)	Desviación Estándar
Yucatán	Celestún	7.33	4.34
	Dzilam	8.31	6.72
	Chelem	4.67	0.35

Tabla 16. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en agosto de 2006 utilizados para realizar el Análisis Regional del Estado de Yucatán (Gráfica 6).

Estado	Lugar de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/g}$)	Desviación Estándar
Quintana Roo	Holbox	16.30	5.06
	Contoy	3.61	2.51
	Isla Mujeres	3.08	0.21
	Chacmochuc	4.44	0.36
	Punta Cancún	2.79	1.69
	Punta Nizúc	3.05	0.38
	Nichupté	3.34	1.36
	Bojórquez	4.17	0.04

Tabla 17. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en agosto de 2006 utilizados para realizar el Análisis Regional del Estado de Quintana Roo (Gráfica 7).

Lugar de colecta	Sitio de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/g}$)
Holbox	1	9.92
	2	6.21
	3	8.32
	4	0.31
	5	ND
	7	ND
	8	22.00

Tabla 18. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en octubre de 2005 que se utilizaron para realizar el Análisis Local de Holbox (Gráfica 8).

*ND = No detectable

Lugar de colecta	Sitio de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/g}$)
Holbox	1	17.45
	2	ND
	4	16.43
	7	33.71

Tabla 19. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en enero de 2006 que se utilizaron para realizar el Análisis Local de Holbox (Gráfica 9).

*ND = No detectable

Lugar de colecta	Sitio de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas (µg/ g)
Holbox	2	19.88
	4	12.72

Tabla 20. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en agosto de 2006 que se utilizaron para realizar el Análisis Local de Holbox (Gráfica 10).

Lugar de colecta	Sitio de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas (µg/ g)
Holbox	1	7.93
	2	5.19
	3	5.20
	4	3.26
	5	2.94
	6	4.08
	7	5.45
	8	23.64

Tabla 21. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en enero de 2007 que se utilizaron para realizar el Análisis Local de Holbox (Gráfica 11).

Lugar de colecta	Sitio de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas (µg/ g)
Contoy	1	6.70
	2	3.22
	3	7.71

Tabla 22. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en octubre de 2005 que se utilizaron para realizar el Análisis Local de Isla Contoy (Gráfica 12).

Lugar de colecta	Sitio de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/g}$)
Contoy	1	1.83
	3	5.39

Tabla 23. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en agosto de 2006 que se utilizaron para realizar el Análisis Local de Isla Contoy (Gráfica 13).

Lugar de colecta	Sitio de colecta	Concentración de plomo en muestras de hojas ($\mu\text{g/g}$)
Contoy	1	3.82
	2	3.26
	3	3.46

Tabla 24. Datos de concentración de plomo en muestras colectadas en enero de 2007 que se utilizaron para realizar el Análisis Local de Isla Contoy (Gráfica 14).

ANEXO II

TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS Y ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Tratamiento de las muestras

Los análisis de las muestras se realizaron en el laboratorio de Espectroscopia de Absorción Atómica de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI), de la Facultad de Química de la UNAM. La Química responsable fue la Maestra en Ciencias Araceli Tovar Tovar. El laboratorio de absorción atómica de la USAI se encuentra certificado por implementar y mantener un sistema de gestión de calidad de conformidad con las normas ISO 9001:2000 COPANT e ISO 9001-2000, así como por la NMX-CC-9001-IMNC-2000.

Para garantizar la validez de los resultados, en el laboratorio se realizó el siguiente procedimiento:

a) Preparación de Material

Todo el material se lavó con solución jabonosa y se enjuagó con agua corriente. Posteriormente se enjuagó con agua destilada para eliminar la mayor cantidad de sales y detergentes. El material enjuagado se sumergió en ácido nítrico al 30% durante 24 horas, para oxidar los residuos (incluyendo otros metales). Transcurrido este tiempo, el material se lavó, primero con agua destilada para eliminar el exceso de ácido nítrico y después con agua desionizada para eliminar las sales que pudieran estar presentes. Ya con el material limpio, se procedió a la preparación de las muestras.

b) Preparación de las muestras

Las muestras se colocaron en una estufa a 60° C por 24 horas para asegurar la completa sequedad de los pastos. Transcurrido este tiempo los pastos se trituraron y se pesaron 3 fracciones de 250 mg de cada muestra en vasos digestores para realizar el proceso de digestión. Es importante destacar que para

algunos sitios no se contaba con la cantidad de muestra suficiente para obtener 3 muestras de 250 mg; cuando se presentó este caso se pesaron 3 fracciones de 100 mg y las muestras se analizaron con el método de atomización con horno de grafito.

c) Digestión de las muestras

A cada uno de los vasos digestores se le agregaron 2.5 mL de solución acuosa de HNO_3 1:1 y se calentaron a 70°C durante una hora. Posteriormente se dejaron enfriar a temperatura ambiente. A continuación se agregó 1 mL de HNO_3 concentrado y nuevamente se calentaron a 65°C durante 2 horas aproximadamente, concluyendo el calentamiento en el momento en el que no se observó el desprendimiento de gases color marrón de NO_2 . Se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se agregaron 5 gotas de H_2O_2 al 20%, cuidando que la temperatura no rebasara los 50°C para evitar proyecciones. Las muestras digeridas se aforaron en matraces de 10 mL con agua destilada, se filtraron y se transvasaron a frascos de polipropileno para su posterior medición. Es importante mencionar que se siguió el mismo procedimiento de preparación para las muestras, las soluciones de referencia y los blancos.

d) Cuantificación de plomo en las muestras

La cuantificación de plomo se realizó por espectroscopia de absorción atómica en un equipo Varian SpectrAA 220 como el que se muestra en la Figura 16, empleando sistema autodilutor SIPS (Simple Introduction Pump System) y utilizando una lámpara de cátodo hueco. Dependiendo de la cantidad de muestra total disponible para el análisis, se utilizaron dos métodos de atomización: horno de grafito ó flama de aire-acetileno, siguiendo los parámetros instrumentales que se muestran en la Tabla 25:

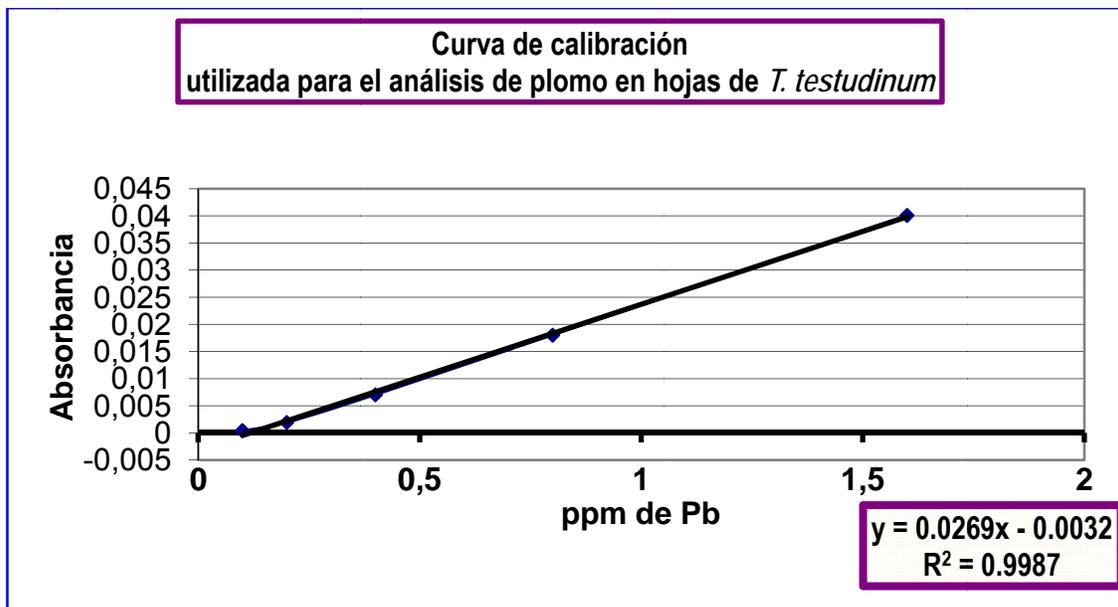


Figura 16. Fotografía del espectrofotómetro de absorción atómica Varian SpectrAA 220

FLAMA AIRE-ACETILENO	
Longitud de onda (nm)	283.3 nm
Slit (ancho de ventana) (nm)	0.5 nm
Método	Curva de calibración
Método atomización	Flama aire acetileno
HORNO DE GRAFITO	
Longitud de onda (nm)	217.0 nm
Slit (ancho de ventana) (nm)	1.0 m
Método	Curva de calibración
Método atomización	Horno de grafito

Tabla 25. Parámetros instrumentales para la cuantificación de plomo por flama aire-acetileno y horno de grafito

Para la cuantificación de plomo en las muestras fue necesaria la elaboración de curvas de calibración como la que se presenta a continuación. Es importante que los datos medidos estén dentro del intervalo de la curva de calibración. Como la concentración de plomo fue distinta en las diferentes muestras, fue necesario hacer varias curvas como la que aquí se presenta.



Concentración de plomo en ppm	Absorbancia
0.1	0.0004
0.2	0.0019
0.4	0.007
0.8	0.018
1.6	0.0401

Gráfica 15. Ejemplo de curva patrón utilizada para la cuantificación de plomo. En el recuadro se presenta la ecuación de la recta obtenida así como su coeficiente de correlación

Las curvas de calibración se construyen midiendo 5 disoluciones de concentración conocida preparadas a partir de disoluciones de referencia de nitrato de plomo en HNO₃ a una concentración de 1000 ppm. Los datos de los estándares se presentan a continuación:

High-Purity Standards
Cat #100028-1
Plomo 1000 ± 3mg/mL en HNO₃ 2%
Lotes: 0C109170 y 0728505.

Al inicio de cada sesión de análisis se utilizó una curva de calibración y también se realizó el ajuste del equipo a cero con la medición del blanco. Cada muestra se analizó por triplicado intercalando periódicamente el blanco y soluciones de referencia con el objetivo de verificar la calibración del equipo y así poder asegurar la confiabilidad de los resultados.

Espectroscopia de absorción atómica

La espectroscopia de absorción atómica es una técnica analítica empleada en la determinación cuantitativa de elementos químicos en concentración de trazas. Los métodos analíticos espectroscópicos se fundamentan en medir la cantidad de radiación que producen o absorben las especies moleculares o atómicas de interés.

La espectroscopia de absorción atómica se fundamenta en que los átomos pueden experimentar transiciones electrónicas entre sus orbitales, cuyas longitudes de onda se encuentran entre la región ultravioleta-visible. La técnica se basa en que los átomos pueden absorber radiación a una cierta longitud de onda. Cuando se hace incidir la radiación de una longitud de onda específica sobre un átomo que se encuentra en estado basal elemental, éste absorbe energía por lo que sus electrones son promovidos a un nivel energético superior ó estado elemental excitado. El estado elemental excitado es menos estable que el estado basal elemental, por lo que los átomos vuelven al estado de menor energía. En este proceso, los átomos emiten energía en forma de radiación. La magnitud de esta energía es equivalente a la energía que absorbieron los átomos para pasar al estado elemental excitado. En la espectroscopia de absorción atómica se determina la energía que absorben los átomos en esta transición energética.

La espectroscopia de absorción atómica se realiza sobre átomos en estado elemental, por lo que es fundamental que la muestra se encuentre en un medio gaseoso, donde están muy separados entre sí los elementos o iones elementales. Es por este motivo que el primer paso en el análisis espectroscópico es la atomización, que es el proceso en el que una muestra se volatiliza y se descompone para producir iones y átomos en fase gaseosa. Para la atomización de la muestra se utilizan principalmente tres métodos: la atomización de llama, la atomización electrotérmica (horno de grafito) y la nebulización directa.

La fuente que genera la radiación para la transición energética del estado basal elemental al estado elemental excitado es una lámpara de cátodo hueco del mismo elemento que se desea analizar. Esta lámpara está formada por un ánodo de tungsteno y un cátodo cilíndrico fabricado con el metal a analizar o bien, recubierto de éste. El cátodo se encuentra en un tubo de vidrio que contiene un gas inerte (argón en la mayoría de los casos). La radiación que emite esta lámpara pasa por la muestra atomizada y entonces la señal llega a un monocromador, que sirve para separar las diferentes longitudes de onda. La longitud de onda seleccionada llega a un detector y finalmente a un sistema de lectura.

La Figura 17 muestra un diagrama de los componentes básicos de un espectrofotómetro de absorción atómica.

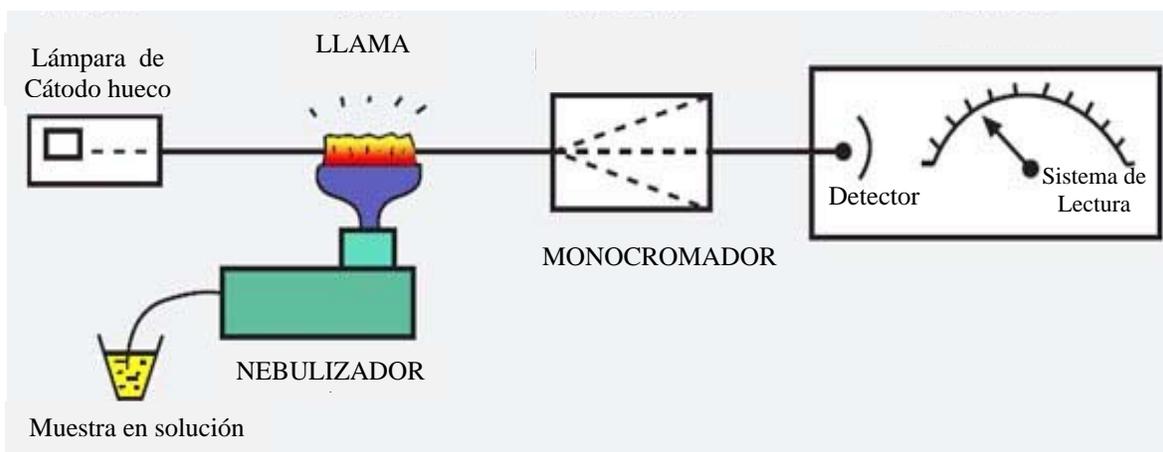


Figura 17. Diagrama de un espectrofotómetro de absorción atómica

Para la realización del análisis cuantitativo es necesario considerar que la radiación absorbida por átomos neutros en su estado basal elemental se comporta según la Ley de Lamber-Beer:

$$A = KCb$$

Donde:

A = Absorbancia,

K = coeficiente de absorción,

C = concentración molar del compuesto y

b = longitud de la rejilla de la flama.

El coeficiente de absorción es una constante característica para cada elemento. En el análisis de las muestras, la longitud de la rejilla de la flama es constante, por lo que la absorbancia es proporcional a la concentración. De esta manera, determinando la absorbancia es posible cuantificar la concentración del compuesto en la muestra. Los átomos libres pueden absorber la radiación emitida por la lámpara. La radiación que absorben es proporcional a su concentración en la muestra.

Debido a sus características de selectividad y sensibilidad la espectroscopia de absorción atómica es útil para analizar muestras que contienen elementos en cantidades traza y por esta misma razón sus aplicaciones principales son las siguientes:

-cuantificación de metales en muestras biológicas: por ejemplo en determinación de residuos metálicos en la mano de alguien que disparó un arma de fuego, o en la medición de los niveles sanguíneos de metales tóxicos.

-análisis de muestras agrícolas: en la determinación de suelos contaminados por metales, o en el análisis de metales traza en hortalizas.

-diagnóstico de contaminación: mediante la evaluación de muestras de agua, suelos y organismos vivos.

-control de calidad: en la determinación del contenido de metales traza en productos farmacéuticos, cosméticos y alimentos.

REFERENCIAS

*Adriano, D. C. *Trace elements in terrestrial environments biogeochemistry, bioavailability and risk of metals*. Edit Springer. USA. (2001)

*Alesio, L; Dell'Orto, A; Forni, A. *Indicadores biológicos para la valoración de la exposición humana a compuestos químicos industriales: Compuestos alquílicos de plomo*. Generalitat Valenciana. Conselleria de Sanitat. España. (1993).

*Arai, T; Ohji, M.; Hirata, T. *Trace Metal Deposition in Teleost Fish Otolith as an Environmental Indicador*. Water Air Soil Pollut. (2007). 179:255–263

*Aranguren, F. *El plomo en el medio geográfico, una amenaza silente*. Geoenseñanza. (1999). 4: 121-155

*Arcega, Flor. *Factores geoquímicos que regulan los niveles de contaminación, fraccionación geoquímica y toxicidad potencial del plomo derivado de la actividad minera en el río Cacalotenango, Taxco, Guerrero*. Tesis de Doctorado. Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. (2006)

*Beatty, R. *Concepts, Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry*. 2nd ed. Perkin-Elmer Corp. USA. (1993).

*Bojorge, Miriam. *Indicadores biológicos de la calidad del agua en el Río Magdalena, México, D. F.* Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. (2006).

*Bonilla, Noemí. *Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelo, planta, y agua de la zona de riego de los municipios de Huaquechula y Atilixco, Puebla*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. (2000)

*Bressler, J; Kim, K; Chakraborti, T; Goldstein, G. *Molecular mechanism of lead neurotoxicity*. Neurochemical Research. (1999). 24 (4): 595-600.

*Brix, H; Lyngby, J; Schireup, H. *Eelgrass (Zostera marina L.) as an indicator organism of trace metals in the Limfjord, Denmark*. Marine Environmental Research. (1983). 8: 165-481.

*Castillo, Gabriela; Díaz, María; Pica, Yolanda; Ronco, Alicia. *Ensayos toxicológicos y métodos de Evaluación de Calidad de Aguas*. The Internacional Development Research Centre. (2004). 5

*Cebrian, M; Albores, A; Camara, V; Gotelli, C; Hopenhayn-Rich, C; Kosatsky, T; Romieu, I; Vega, F; González, D; *Epidemiología ambiental: un proyecto para América Latina*. ECO. México, (1994).

*CENECAM (Centro Estatal de Emergencias de Campeche). Gobierno del Estado de Campeche. (2006).

*Cervantes, C.; Moreno, R.; *Contaminación ambiental por metales pesados y su impacto en los seres vivos*. A. G. T. Editor, S. A. México. (1999).

*CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. Gobierno Federal. México. (2006).

*CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Gobierno Federal. México. (2006).

*Contreras, Francisco. *Ecosistemas costeros mexicanos*. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. UAM Iztapalapa. México. (2003).

*Davis, J; Grant, L. *Establishing lead in air and water standards in the United States of America*. Salud Pública de México. 45 (2): 237-243. (2003).

*Doadrio, Antonio. *Ecotoxicología y acción toxicológica del plomo*. Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia. (2006), 72: 409-422.

*Domínguez, R.; Crisolito, J. *Aspectos radiológicos de la intoxicación por plomo*. Archivos de pediatría del Uruguay. (2001). 72 (2): 140-144.

**El Universal*. 20 de Febrero de 2009. *Yacimiento Ku-Maloob-Zaap rebasa a Cantarell*.

*Ellenhorn, Matthew; Schonwald, S; Ordog, G; Wasserberger, J. *Ellenhorn's medical toxicology. Diagnosis and treatment of human poisoning*. 2a ed. Williams & Wilkins. USA (1997)

*Enríquez, S; Pantoja-Reyes, N. *Form-function analysis of the effect of canopy morphology on leaf self-shading in the seagrass *Thalassia testudinum**. *Oecologia* (2005) 145: 235–243

*EPA. United States Environmental Protection Agency. Air Quality Criteria for Lead. Volume I of II. (2006).

*Espinoza, Sara. *Determinación de plomo en dientes permanentes incluidos en una población mexicana*. Tesis de maestría. Facultad de odontología. UNAM. (2001).

*Estrada-Loera, E. *Phytogeographic relationship on the Yucatan Peninsula*. *Journal of Biogeography*. (1991). 18: 687-697.

*Favero, N.; Grazia-Frigo, M. *Biomonitoring of metal availability in the southern basin of the lagoon of Venice (Italy) by means of macroalgae*. *Water, Air, and Soil Pollution*. (2002). 140: 231-246.

*Ferrat, L; Pergent-Martini, C; Roméo, M. *Assessment of the use of biomarkers in aquatic plants for the evaluation of environmental quality: application to seagrasses*. *Aquatic Toxicology*. (2003). 65 187-204

*Friberg, Lars; Nordberg, Gonnar; Vouk, Velimir. *Handbook on the toxicology of metals*. 2a ed. Elsevier. USA. (1990)

*García-Cuellar, J. Ángel, Arreguín-Sánchez, Francisco, Hernández Vázquez, Sergio *et al*. *Impacto ecológico de la industria petrolera en la sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: Una revisión*. INCI, jun. 2004, vol.29, no.6, p.311-319

*García-Rios, Cedar. *Guía Ecosistemas Marinos de Puerto Rico, Las Praderas de Thalassia de Puerto Rico*. Serie de educación marina UPR-E2-28, Programa de Colegio Sea Grant. (1990).

*Gasana, J; Hlaing, W; Siegel, K; Chamorro, A; Niyonsenga, T. *Blood lead levels in children and environmental lead contamination in Miami Inner City, Florida* International Journal of Environmental Research and Public Health. 3 (3), 228-234. (2006).

*Gnassia-Barelli, M; Romeo, M. *Some aspects of lead ecotoxicology in the marine environment*. Aquatic Toxicology. (1993). 26: 163-170.

*González, A; Merino, M; Czitrom, S. *Laguna Bojórquez, Cancún: un sistema de características marinas controlado por la atmósfera*. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. México (1992).

*Goodman & Gilman, Alfred. *Las bases farmacológicas de la terapéutica*. 10ª ed. Vol II McGraw-Hill Interamericana. México (2003)

*Hemminga, M; Duarte, C. *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press. United Kingdom. (2000)

*INE (Instituto Nacional de Ecología). *Programa de Manejo del parque Nacional Isla Contoy*. México. (1997).

*INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática). Gobierno Federal. México. (2000).

*INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática). *Agenda Estadística*. Gobierno Federal. México. (2007).

*Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. *Enciclopedia de los Municipios de México*. Gobierno del Estado de Campeche. (2005).

*Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. *Enciclopedia de los Municipios de México*. Gobierno del Estado de Quintana Roo. (2005).

*Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. *Enciclopedia de los Municipios de México*. Gobierno del Estado de Yucatán. (2005)

*Kuo, J; den Hartog, C. *Seagrasses: morphology, anatomy and ultrastructure*. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. Springer. 51-87. (2006).

*Lauwerys, R. *Toxicología industrial e intoxicaciones profesionales*. Elsevier. España. (1994).

*Lavoisier, Eric. *Metales pesados en la Laguna de Yalahau*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM. (2006)

*Ley General Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Tercera edición. Ediciones Fiscales ISEF. México. (2006)

*Lewis, M. A.; Darrin, D. D.; Chancy, C. A; Kathryn, C. A.; Lewis, C. G. *Florida seagrass habitat evaluation: A comparative survey for chemical quality*. Environmental Pollution (2007), 146: 206-218.

*Llanes-Monter, M.; Olguín, M.; Solache-Ríos, M. *Lead Sorption by a Mexican, Clinoptilolite-Rich Tuff*. Environmental Sci Pollution Research. (2007). 14 (6) 397 – 403

*Locatelli, C.; Torsi, G.; Garai, T. *Determination of heavy metals in environmental bio-indicators by voltammetric and spectroscopic techniques*. Journal Anal Chemical. (1999) 363: 662-666.

*Marín-Guirao, L.; Marín, A.; Lloret., J; Martínez, E.; García, A. *Effects of mining wastes on a seagrass ecosystem metal accumulation and bioavailability seagrass dynamics and associated community structure*. Marine Environmental Research. (2005). 60: 317-337.

*Martínez, Ana. *Metales pesados (Fe, Cd, y Cr) en pastos marinos (Thalassia testudinum) de la laguna de Yalahau, Quintana Roo: evidencia de posible contaminación del agua subterránea*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM (2007).

*Montgomery, J; Price, M. *Release of trace metals by sewage sludge and the subsequent uptake by members of a turtle grass mangrove ecosystem*. Environmental Science & Technology. (1979). 546-549.

*Nienhuis, P. H. *Background levels of heavy metals in nine tropical seagrass species in Indonesia*. Marine Pollution Bulletin. (1986). 17: 508-511.

*Nohpal, Xaman. *Presencia de cadmio en el norte de la Península de Yucatán: de Campeche a Cancún*. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. UNAM. (2007)

*Noriega, Elia. *Metales pesados en Thalassia testudinum (pasto marino), en el Sistema Arrecifal Veracruzano*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. (2001)

*Páez-Osuna, F. *Contaminación por metales en las costas de México*. Ciencia y Desarrollo. XXV. (1999). 149: 68-73

*Páez-Osuna, M.; Ochoa-Izaguirre, H.; Bojórquez-Leyva, I.; Michel-Reynoso. *Macroalgae as Biomonitors of Heavy Metal Availability in Coastal Lagoons from the Subtropical Pacific of México*. Environmental Contamination Toxicology. (2002). 64:846-851.

*Pérez, R; Pacheco, J. *Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán*. Ingeniería. (2004): 8-1: 33-42.

*Petróleos Mexicanos (PEMEX). *Alcanza PEMEX producción record de petróleo curdo en el activo Ku-Maloob-Zaap, el segundo en importancia en el país*. Boletín de prensa número 022. 28 de febrero de 2007.

*PetroQuiMex. La revista de la Industria Petrolera. *El presidente Calderón inaugura formalmente la plataforma de producción PB-Ku-S del proyecto Ku-Maloob-Zaap en la zona marina de Campeche*. Número 25. Enero-febrero de 2007.

*Poggio, L.; Vrscaj, B.; Schulin, R.; Hepperle, E.; Ajmone, F. *Metals pollution and human bioaccessibility of topsoils in Grugliasco (Italy)*. Environmental Pollution. (2008). 30: 1-10.

*Rogers, J; Richards, J, Wood, C. *Ionoregulatory disruption as the acute toxic mechanism for lead in the rainbow trout (Oncorhynchus mykiss)*. Aquatic Toxicology. (2003). 64: 215-234.

*Romieu, Isabelle; MD, MPH, ScD. *Uso de los datos de plumbemia para evaluar y prevenir el envenenamiento infantil por plomo en Latinoamérica* Salud Pública de México. (2003). 45 (2): 244-251.

*Rosas, Daniel. *Estudio de la acumulación de cadmio en Thalassia testudinum de la laguna de Yalahau, Quintana Roo*. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. UNAM. (2006)

*Sadiq, Muhammad. *Toxic metal chemistry in marine environments*. Marcel Dekker Inc. USA. (1992).

*Sánchez, Miguel. *Plomo en el área urbana de Torreón: concentración total, fraccionamiento geoquímico e isótopos estables*. Tesis de Maestría. Posgrado en ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán. UNAM. (2007).

*Schmitt, C; Caldwell, C; Olsen, B; Serdar, D; Coffey, M. *Inhibition of erythrocyte δ -aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) activity in fish from waters affected by lead smelters*. Environmental Monitoring and Assessment. (2002). 77: 99-119.

*Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de Campeche. *Reserva de la Biosfera Los Petenes*. Gobierno del Estado de Campeche. (2008).

*Skoog, D; West, D; Holler, J; Crouch, R. *Fundamentos de Química Analítica*. Octava edición. Cengage Learning Editores. México, (2005).

*Solís, C; Isaac-Olive, K; Martínez, A; Lavoisier, E; Herrera-Silveira, J. *Trace metals in the sea grass Thalassia testudinum from mexican caribbean coast*. Proceedings of the XI International Conference on PIXE and its Analytical Applications. Mexico, (2007).

*Stouthart, A.; Spanings, F.; Lock, R., Wendelaar Bonga, S. *Effects of low water pH on lead toxicity to early life stages of the common carp (Cyprinus carpio)*. Aquatic Toxicology. (1994). 30: 137-151.

*Tong, S; Schirnding, Y; Prapamontol, T. *Environmental lead exposure: a public health problem of global dimensions*. WHO bulletin. (2000). 209 78 (9): 1068-1077.

*Tussenbroek, B; Vonk, J; Stapel, J; Erftemeijer, P; Middelburg, J; Zieman, J. *The biology of Thalassia: paradigms and recent advances in research*. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. Springer 409-439. (2006).

*Valdespino, Job. *Determinación de metales pesados en Thalassia testudinum en dos zonas de la Península de Yucatán*. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. UNAM. (2005)

*Valitutto, R. S.; Sella, S. M.; Silva-Filho, E.; Guimaraes, R.; Miekeley, N. *Accumulation of metals in macrophytes from water reservoirs of a power supply plant, Rio de Janeiro State, Brazil*. Water Air Soil Pollut (2006) 178:89–102

*Volke, T; Velasco, J; de la Rosa, D. *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. INE-SEMARNAT México. (2005)

*Whelan, T; Espinoza, J; Villareal, X; CottaGoma, M. *Trace metal partitioning in Thalassia testudinum and sediments in the lower Laguna Madre, Texas*. Environment International. (2005). 31: 15-24.

*WHO. World Health Organization. *Guidelines for drinking-water quality*. 2a ed. Geneva. (1996). 91 -100.

*Zecua, Ana. *Estudio toxicológico de Pb, Cd y Cr para evaluar riesgos en la salud de una población*. Tesis de Licenciatura. Universidad del Valle de México. (2007).