

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

ANÁLISIS DE Cr EN QUINTANA ROO  
UTILIZANDO *Thalassia testudinum*  
COMO BIOINDICADOR

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Q U Í M I C A**

P R E S E N T A:

**MARÍA DEL PILAR FLORES PÉREZ**

ASESORA: DRA. ANA MARÍA MARTÍNEZ VÁZQUEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX.

2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 PRESENTE

ATN: L. A. ARABELLA HERRERA HERNANDEZ  
 Jefe del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 26 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos  
 comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Análisis de Cr en Quintana Roo utilizando Thalassia testudinum como bioindicador

que presenta la pasante: María del Pilar Flores Pérez  
 con número de cuenta: 300254130 para obtener el título de:  
Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en  
 el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 23 de junio de 2009

PRESIDENTE	M.C. Ocelia Vega Vázquez	
VOCA.	M.C. Pablo Hernández Matamoros	
SECRETARIO	M.C. Ruth Martínez Reséndiz	
PRIMER SUPLENTE	Dr. Alejandro Solano Peralta	
SEGUNDO SUPLENTE	Dra. María Guillermina Rivera Martínez	

## AGRADECIMIENTOS

---

Especialmente a la Dra. Ana Martínez, por haber asesorado este proyecto de tesis, por el apoyo y sobre todo por la paciencia.

Este trabajo se realizó con el apoyo financiero de DGAPA a través del proyecto PAPIIT clave IN-202506

Agradecimiento a CONACyT por el estímulo recibido como Ayudante de Investigador Nivel III exp. 13516

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de Francisco Remolina, director del Área de Protección de Flora y Fauna Yum- Balam en Quintana Roo.

Esta tesis fue elaborada en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México

A los miembros del jurado por sus valiosos comentarios y sugerencias. M. en C. Ofelia Vega, M en C Ruth Martínez, M en C. Pablo Hernández, Dr. Alejandro Solano y Dra. Guillermina Rivera.

Al M en C. Humberto Gómez. Director de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) donde se realizaron los análisis de las muestras.

A la Dra. Rubicelia Vargas y a la Q.F.B. Blanca Bonilla por haberme brindado su amistad y el espacio para trabajar.

A los compañeros del Instituto de Investigaciones en Materiales, Xaman, Job y Humberto, especialmente a mi instructor teórico el Dr. Marco Vinicio.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios porque Él es el camino, la verdad y la vida. (Juan 14:6)

A la Virgencita para que nos cuide plis.

A mi amado esposo Luigi, por tu apoyo, confianza y comprensión, porque tu sola presencia me hace mejor persona, porque gracias a que estás conmigo sueño y hago mil locuras, pero principalmente porque me amas y te amo. Soy muy feliz de compartir mi vida contigo y poder ver tu rostro cada mañana.

A mis padres:

Don Marce porque todo lo malo se puede convertir en algo bueno, ya ves "Aunque fuimos mujeres..." A Doña Pili porque la mejor manera de lavar algo es mejorando la formulación del detergente y no tallando. A los dos muchas gracias por todo.

A mis queridas hermanas:

Silvia, sólo faltas tú, échale ganas no es fácil pero tampoco imposible.

Adriana, gracias por el apoyo que me diste durante mis estudios: la cama, la comida y las lecciones de vida. Esto también es tuyo.

Muy especialmente a mi hermana Anahí por todo lo que me has enseñado y compartido conmigo. "Nunca jamás me llevaré con nadie como me llevo contigo". Gracias por ayudarme y por estar allí en todo momento. Por ser mi compañera de juegos con los osongos, por crecer conmigo y ser "las chamacas", por enseñarme el amor a las ciencias y que la Física es la mamá de todas las ciencias.

A mi Agüe donde quiera que estés esto es para ti también.

Finalmente le agradezco a mi querida Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de recibir instrucción en la Escuela Nacional Preparatoria No. 9 "Pedro de Alba", en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, en el Instituto de Investigaciones en Materiales y ahora en la Facultad de Química.

## DEDICATORIAS

A todos los grandes amigos que he hecho durante mis estudios el Joani, el Iván, la Laura, Grace y especialmente Blanca, yo también prometo no dejarte.

A la "Banda" mis amigos de la universidad Darío C, (el chino), Israel P. (el asereje), Betel P. (la Betel) y Roberto O. (Robert O.) Al abuelo del Isra porque creyó que ninguno de nosotros lo lograría.

Mis nuevos amigos del posgrado Elizabeth R. Tania R. Macaria, Citallli, Alejandro (el CUGS), Hugo y muy especialmente a Daniel R.

Muy especialmente a Gabriel M. "el pecas" por ayudarme al final los largos días de trabajo en el Instituto.

A el profe Aníbal (la saeta azul) a Tere y al bebé por mantenerme en condición para lograr mi cometido.

A todos los que compartieron un salón conmigo antes, ahora y después.

A toda la "Gonzaliza" mi nueva familia, sobre todo a la Sra. Ana, Don Antonio y Maricarmen por sus innumerables muestras de cariño. ¡Yo también los quiero mucho!

A Luis Antonio y Aurora por su futuro.

# Índice

---

	Número de página
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
METALES PESADOS	4
<b>Cromo</b>	6
Propiedades generales	6
Presencia de cromo en el ambiente	8
Efectos biológicos del cromo	11
Casos de perturbación por cromo	13
ZONA DE ESTUDIO: EL ESTADO DE QUINTANA ROO	15
<b>Sitios de muestreo</b>	20
Municipio Benito Juárez	21
Municipio Isla Mujeres	22
Municipio Lázaro Cárdenas	23
BIOINDICADORES	25
Organismos indicadores de la presencia de cromo	25
El bioindicador <i>Thalassia testudinum</i>	27
ANTECEDENTES	30
OBJETIVOS	32
HIPOTESIS	33
MATERIALES Y MÉTODOS	34
Áreas de estudio	34
Recolección de muestras	35
ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
CONCLUSIONES	62
ANEXO	63
REFERENCIAS	70

# Resumen

---

El estado de Quintana Roo tiene gran importancia económica, turística y ecológica. Dentro de su territorio se encuentran algunas Áreas Naturales Protegidas, que fueron creadas con el objetivo de conservar la riqueza natural. Para ello se han implementado programas de manejo que buscan mantener el equilibrio entre el ambiente y las actividades antropogénicas. Es por esta razón que el monitoreo de la contaminación en estas zonas es fundamental para su conservación.

Aunque la contaminación es un problema generalizado, la contaminación por metales pesados es relevante debido a las graves alteraciones que los metales causan en la salud y también por su persistencia en el ambiente. En esta tesis se evaluará la presencia de un metal pesado, el cromo. Para este metal la diferencia en el estado de oxidación determina si es tóxico o benéfico. Por las condiciones del ambiente marino, la presencia de la forma tóxica es favorecida.

En este estudio, para analizar los niveles de cromo en las costas del estado de Quintana Roo, se utiliza un pasto marino llamado *Thalassia testudinum*, que se encuentra a lo largo de las costas del Mar Caribe y del 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 cromo por Espectroscopia de Absorción Atómica en muestras de *Thalassia testudinum* colectadas desde el 2004 hasta el 2007 en Holbox, Contoy, Bojórquez, Punta Cancún, Punta Nizuc y Puerto Morelos. Todos estos lugares están ubicados dentro de Áreas Naturales Protegidas ubicadas al sureste del estado de Quintana Roo. El objetivo es determinar el grado de contaminación por cromo en estas zonas y determinar sus posibles fuentes.

# Introducción

---

El estado de Quintana Roo se ubica al sureste de México, al este de la Península de Yucatán. Es una zona con una gran diversidad biológica (Smardon & Faust 2006), que se caracteriza por ser una planicie costera en la cual no hay elevaciones importantes. El suelo en toda la península está formado de piedra caliza altamente permeable, lo que provoca la ausencia de ríos superficiales y la rápida infiltración de las precipitaciones sobre los mantos acuíferos que desembocan finalmente en el océano. Todas estas características definen al relieve de la región como cárstico (Back, 1981) (Carruthers *et al* 2005), y hacen que el ecosistema costero se vea afectado por la entrada de agua dulce a través de ríos subterráneos (Tapia *et al*, 2008). A su vez los acuíferos que se encuentran bajo tierra son particularmente susceptibles a la contaminación por aguas residuales domésticas, municipales e industriales (Back, 1981).

La mayoría de los metales pesados son contaminantes cuya presencia en el ambiente puede causar daño a los seres vivos, aún cuando se encuentran en pequeñas cantidades (EPA, 1997). La mayor fuente de estos contaminantes en los mares y los ríos es el agua residual proveniente del uso doméstico y de las descargas industriales (Nriagu y Pacyna, 1988). La presencia de metales pesados en los ecosistemas costeros es preocupante debido a que se pueden acumular a través de la cadena alimenticia (Vázquez *et al*, 1999).

Dentro de todos los metales pesados, el cromo en su forma hexavalente es peligroso para los organismos vivos, la cual carece de una función biológica conocida y se relaciona con algún tipo de cáncer (ATSDR, 2009). En particular, las condiciones en el medio marino favorecen la presencia del cromo (VI), la forma más tóxica del metal (Neff, 2002), por lo que resulta importante realizar el diagnóstico sobre la presencia de este metal en estos ecosistemas.

La contaminación por metales pesados en zonas costeras puede estudiarse mediante el análisis en algún organismo de la biota, que debe ser abundante en los sitios de estudio y ser capaz de acumular metales pesados además de que no puede estar en peligro de extinción. Al organismo seleccionado y en cuyos tejidos se pueden cuantificar concentraciones tóxicas de contaminantes, se le llama bioindicador. (Wiegolaski, 1975) (Phillips, 1970).

Se ha encontrado que algunas especies de pastos marinos sirven como bioindicadores (Nienhuis, 1986). En particular, la *Thalassia testudinum* es un pasto marino cuyos tejidos se han utilizado en diversos estudios para detectar y cuantificar metales pesados. (Noriega, 2001) (Valdespino, 2005) (Ruiz, 2005) (Lavoisier, 2006) (Rosas, 2006) (Nohpal, 2007) (Martínez, 2007) (Lewis, 2007).

Esta tesis forma parte de un proyecto de investigación sobre la presencia de metales pesados en las costas del Caribe Mexicano desarrollado en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

# METALES PESADOS

---

Los metales pesados se definen para este trabajo como aquellos elementos metálicos y algunos metaloides cuya densidad es superior a  $5 \text{ g/cm}^3$ , que además presentan un número atómico superior a 20 y que se encuentran como elementos traza (concentración  $<1000\text{ppm}$ ) en el suelo, el agua y los organismos vivos. (Gasic & Korban 2006) (Mocanu, *et al*, 2006) (Rosas, 2006).

Es importante mencionar que no todos los metales pesados son tóxicos, aunque en la literatura el término “metal pesado” es utilizado como sinónimo de “malo” (Hodson, 2003). Esto no se justifica ya que la toxicidad está relacionada con las propiedades químicas del elemento y las propiedades biológicas del organismo en situación de riesgo. Es decir, el grado de toxicidad varía ampliamente entre los metales y depende del organismo en el que se encuentra (Hodson, 2003). Además, hay algunos metales pesados como el Co, el Cu, el Mn, el Ni, el Fe y el Zn que no sólo no son tóxicos sino que son esenciales para la vida. En general, la toxicidad de los metales pesados se presenta cuando su presencia interfiere con la actividad biológica en la que participan cationes con características similares. Además, los metales pesados son peligrosos para los organismos en los que se encuentran porque no pueden degradarse o transformarse en productos no peligrosos fácilmente; no pueden eliminarse en poco tiempo y pueden bioacumularse, lo que implica que pasado el tiempo hay un aumento de su concentración en los seres vivos (animales y plantas).

Los metales pesados han estado en la superficie terrestre desde que ésta se formó. La contaminación se presenta cuando éstos se acumulan en sitios donde antes no se encontraban. Antes de la Revolución Industrial, actividades como la minería y la fundición representaban la mayor fuente de contaminación por metales pesados al ambiente. A partir de la segunda mitad del siglo XIX, la producción y la descarga de estos contaminantes en el ambiente se incrementó

casi a una escala logarítmica debido a las diversas actividades industriales. (Nriagu, 1989). Esta situación continúa, pues cada año miles de toneladas de “nuevos” metales pesados se extraen en las minas y en las industrias y subsecuentemente son redistribuidos en la biosfera, lo cual ha generado una perturbación en el flujo natural de este tipo de contaminantes (Nriagu y Pacyna, 1988) (Otiniano *et al*, 2007).

Hoy se sabe sin duda que la influencia humana produce un incremento en la acumulación y concentración de metales pesados en diferentes niveles de un ecosistema. Los estudios muestran claramente que las actividades humanas son un factor determinante en el ciclo natural de los metales pesados, ya que cambian directamente su distribución en la corteza terrestre. (Nriagu, 1989)

Debido a esta redistribución en el ambiente, los metales pesados pueden llegar a los organismos vivos a través de diversos medios tales como el agua, el aire y la cadena alimenticia (Mocanu, 2006). Las principales fuentes de contaminación en el aire son las que provienen de la combustión de algunos derivados del carbón como la hulla y los lignitos en plantas eléctricas, así como las que se producen en los quemadores industriales, comerciales y residenciales. En el caso del agua, los efluentes industriales y domésticos de aguas residuales los principales contaminantes (Nriagu y Pacyna, 1988). Una vez que los metales pesados se encuentran en el agua pueden alcanzar diversos organismos prácticamente de manera inmediata, llegando así a la cadena alimentaria.

Se ha señalado que los metales pesados pueden estar presentes en los océanos en muy bajas concentraciones. Su distribución está determinada por las características fisicoquímicas del agua de mar y las actividades antropogénicas del área (Sadiq, 1992). La contaminación de ríos y mares está dada principalmente por metales como el cobre, el cromo, el manganeso y el níquel. (Nriagu y Pacyna, 1988)

Debido a que los mares y las zonas costeras son especialmente susceptibles a la contaminación por metales, en este trabajo se presenta un análisis de la

contaminación por cromo en las costas del estado de Quintana Roo. Se analiza el cromo porque es uno de los principales metales pesados que contaminan el agua. Aún en bajas concentraciones el cromo puede ser tóxico, se ha determinado que en el rango de 5-100 ppm las principales formas de cromo presentan afectaciones en los organismos marinos (Botello *et al*, 2005). De acuerdo a lo anterior es necesario revisar cuáles son sus fuentes antropogénicas o naturales y realizar un diagnóstico en las zonas seleccionadas para este estudio.

## CROMO

---

Hace doscientos años el cromo fue descubierto por L.N. Vauquelin. Los compuestos de cromo presentan una gran variedad de colores. Esta característica les da el nombre (del griego *Chroma* que significa color). Hace más de una década se determinó su función en el metabolismo de grasas y azúcares (Anderson, 1997) y actualmente se ha señalado que la exposición prolongada a este elemento en su estado más oxidado es una posible causa de cáncer (Adriano, 2001) (Sakar, 2000). El estado de oxidación del cromo define cuáles serán sus efectos en el ambiente y en la salud, por lo que resulta importante revisar las propiedades óxido reductoras de este metal.

### Propiedades Generales

---

El cromo es un metal de transición, cuyo número atómico es 24 y cuya densidad es superior a los  $7 \text{ g/cm}^3$ , por lo que de acuerdo a la definición presentada al inicio de este trabajo el cromo es considerado un metal pesado. Cuenta con cuatro isótopos que tienen los siguientes porcentajes de abundancia:  $^{50}\text{Cr}$  (4.31%),  $^{52}\text{Cr}$

(83.76 %),  $^{53}\text{Cr}$  (9.55%) y  $^{54}\text{Cr}$  (2.38%). Además, se disuelve fácilmente en ácidos con propiedades reductoras y en el agua regia o el ácido nítrico. Es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos oxidantes y algunos otros compuestos químicos, por lo que se utiliza en aleaciones para obtener materiales con mayor resistencia a la corrosión (Adriano, 2001).

El cromo puede presentarse en diferentes estados de oxidación desde 0 hasta +6. En la Figura 1 se presentan los potenciales de oxido-reducción ( $E_0$ ) de las diferentes especies de cromo. También se muestran las reacciones de reducción entre los diferentes estados de oxidación de cromo y sus respectivos valores de potencial sobre las flechas.

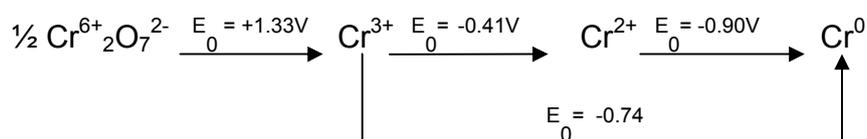


Figura 1. Diagrama de potenciales de cromo (Sharpe, 1993)

Recordemos que cuanto más positivo es el valor de  $E_0$  mayor es la tendencia de que la reacción ocurra como está escrita (Brown, 1991). Con base en lo anterior, las reacciones oxido-reducción del cromo indican que el cromo (VI) es fácilmente reducido a Cr (III) lo que implica que es altamente oxidante; el Cr trivalente es una especie que no se reduce fácilmente para formar otra especie; sin embargo, el  $\text{Cr}^{2+}$  y el  $\text{Cr}^0$  se pueden oxidar para formar el cromo trivalente. Conforme a lo anterior, Cr (III) es el estado de oxidación más estable del cromo, pero esto no significa que sea la única especie de cromo presente en la naturaleza.

Las formas predominantes de Cr (III) en el ambiente son los hidroxocomplejos  $\text{CrOH}^{2+}$  y  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (Kotas & Stasicka, 2000), los cuales son poco solubles en agua de mar (Neff, 2002). El Cr (VI) está usualmente enlazado al oxígeno como cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) o dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) (Cervantes *et al* 2001). La forma hexavalente del cromo es más soluble en agua, por esta razón el Cr (VI) es la forma más tóxica del cromo.

Por lo anterior los estados de oxidación más importantes del cromo son el trivalente por su estabilidad y el hexavalente debido a su solubilidad y posible toxicidad. La conversión de cromo (III) a Cromo (VI) se favorece en pH's alcalinos, en condiciones aerobias y en temperaturas altas (Barcelo & Gunse, 1986). Se sabe que en medios acuosos y en particular bajo las condiciones del ambiente marino se favorece la presencia de Cr (VI) (Van Der Weijden, 1982). El pH del mar se encuentra entre alrededor de 8 (Rosas, 2006), la concentración de oxígeno es mayor en la parte superficial de los mares (Neff, 2002) además la presencia de manganeso en el océano facilita la oxidación (Van Der Weijden, 1982).

. Un análisis correcto de la contaminación por cromo debe contemplar que es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza. En el medio marino la presencia de Cr (VI) es más factible a pesar de la mayor estabilidad de la especie de Cr (III). Como el metal puede pasar de un estado de oxidación al otro es conveniente realizar cuantificaciones de cromo total (Ruiz, 2006).

### Presencia del cromo en el ambiente

---

El cromo es el séptimo elemento más abundante de la tierra y el 21º elemento de mayor presencia en rocas de la corteza terrestre. El cromo (III) ocupa el cuarto lugar en los metales de importancia biológica (Adriano, 2001). Su abundancia en la corteza terrestre oscila entre las 100 y las 300 ppm. La producción mundial de cromo se encuentra en el orden de  $10^7$  toneladas por año (Cervantes *et al*, 2001). El cromo es abundante en la naturaleza y se encuentra a diferentes concentraciones en el aire, el suelo, el agua y en los organismos vivos (Adriano, 2001).

Se conocen cerca de 40 minerales que contienen cromo; sin embargo, la cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) es el de mayor importancia comercial. Este mineral contiene el 68% de óxido crómico ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) y 32% de óxido ferroso (FeO). La producción mundial de cromita es de aproximadamente 9 millones de toneladas al año, lo que convierte a este mineral en la principal fuente de cromo en el mundo. La resistencia de la

cromita a la descomposición a altas temperaturas, su moderada dilatación térmica y la estabilidad de su estructura cristalina han hecho posible el uso del mineral de cromo para fines refractarios (Udy, 1956). También se utiliza en la fabricación de ladrillos y morteros (Adriano, 2001) En México la presencia de cromita se ha determinado en algunos sitios al noreste y centro del país. Los yacimientos principales se encuentran en Baja California Sur, Guanajuato y Puebla (Varela, 2007)

La producción y los usos industriales del cromo han aumentado en los últimos cien años y todos los desechos se han vertido en el ambiente. Esto ha generado que hoy en día el cromo sea un contaminante generalizado. Cada año se suman a las emisiones alrededor de 75000 toneladas de cromo provenientes de fuentes antropogénicas, lo que representa un 60-70% del total emitido (Nriagu y Pacyna, 1988). El resto de las emisiones lo representan las fuentes naturales (30-40%, es decir, unas 54000 toneladas) (Kotas & Stasicka, 2000). Es importante resaltar que, del total de emisiones de cromo antropogénico, la tercera parte son de la forma hexavalente (Hang & Kim- Hyun, 2008).

Las partículas de cromo pueden ser transportadas por dos vías: la deposición seca y la húmeda. En la deposición seca las partículas atmosféricas que contienen cromo se transportan por el viento y pueden depositarse en superficies acuáticas o terrestres. La distancia recorrida depende de factores geográficos como la topografía y la vegetación (Kotas & Stasicka, 2000). La deposición húmeda en general implica la presencia de agua. La mayor parte del cromo proveniente de fuentes antropogénicas se deposita por esta vía en los distintos ambientes acuáticos. El mal manejo de los residuos industriales aumenta significativamente la concentración de cromo en el suelo, lo que produce la contaminación de aguas subterráneas a través de las escurrientías.

La deposición seca genera distribuciones más homogéneas en comparación con la húmeda, la cual esta sujeta a los procesos de traslado en los ríos y los patrones de circulación del océano (Kotas & Stasicka, 2000). En general se

depositan mayores cantidades de cromo por vía húmeda que por vía seca. Por ejemplo, se estima que tan sólo el Río Mississippi deposita 157000 toneladas métricas de cromo por año en el Golfo, mientras que por vía aérea se depositan 10 toneladas métricas de cromo cada año (Neff, 2002).

En la Figura 2 se presentan las fuentes naturales y antropogénicas de cromo en el ambiente.

En general las fuentes naturales de cromo en el ambiente están relacionadas con la distribución natural y la expulsión habitual de rocas minerales que contienen cromo. Las fuentes antropogénicas están siempre referidas a actividades industriales y a los desechos que producen.

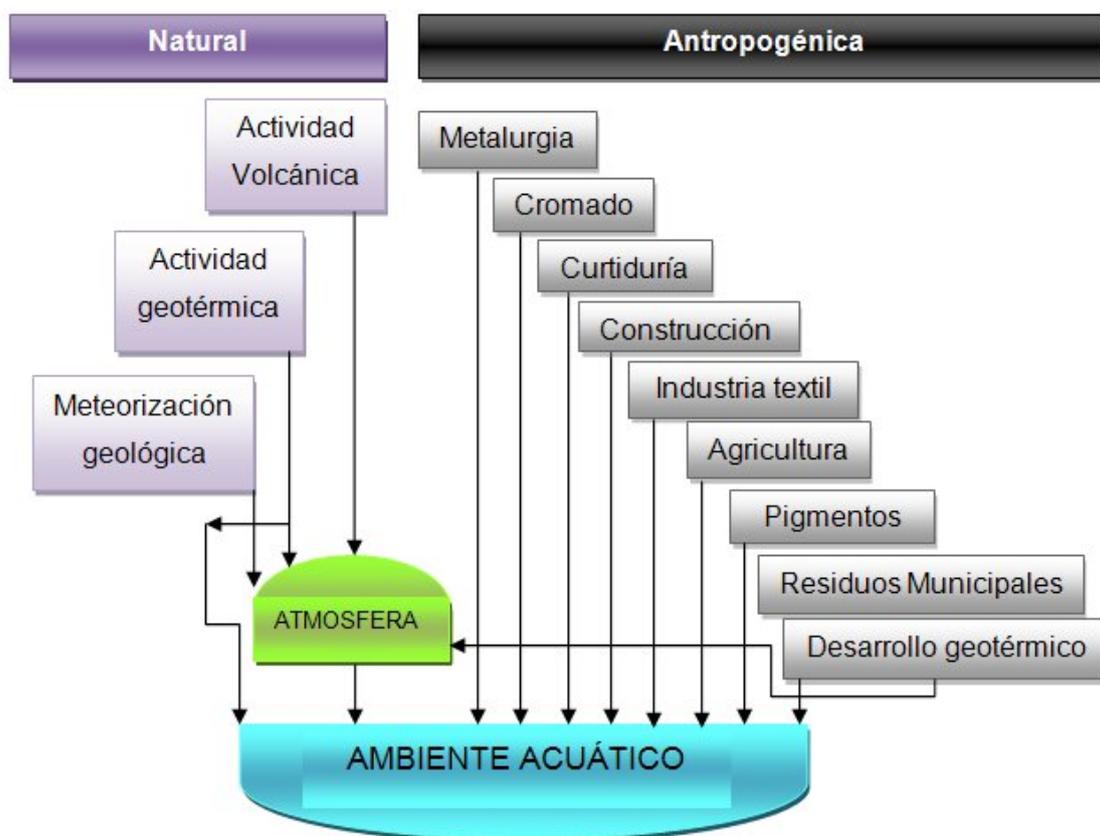


Figura 2 Fuentes naturales y antropogénicas de cromo en ambientes acuáticos (modificado de Föster y Charlesworth, 1996)

Considerando las actividades antropogénicas, la mayor parte de cromo (entre el 60-70%) se utiliza en aleaciones con otros metales, en particular en la manufactura de acero inoxidable y el 15% se usa en procesos químicos industriales como la manufactura de pigmentos ya que los compuestos de cromo presentan una baja solubilidad y una enorme gama de colores. Finalmente el último uso principal del metal es en el curtido de pieles (Udy, 1956) (Cervantes *et al*, 2001).

En zonas poco industrializadas, las fuentes de cromo antropogénico se relacionan con desechos sólidos como los desperdicios de equipo electrónico (computadoras y televisores). El equipo electrónico contiene cromo que fue colocado para mejorar las propiedades del acero. (Li *et al*, 2008)

El cromo también se utiliza en actividades agrícolas como fertilizante (He, 2005) y en la formulación de insecticidas (Martínez, 2007).

### Efectos biológicos del cromo

---

La importancia biológica del cromo depende del estado de oxidación en el que se encuentra. El Cr (III) se requiere, entre otras cosas, para mantener los niveles normales de glucosa en el metabolismo del ser humano, mientras que Cr (VI) no es esencial y es muy tóxico (Lees, 1991) (Kotas & Stasicka, 2000) (Adriano, 2001).

La esencialidad del cromo para los humanos fue documentada hace más de treinta años. Se le considera un elemento traza esencial pues tiene una función en el factor de tolerancia a la glucosa (FTG) que forma parte del metabolismo de la insulina. Como nutriente el consumo de Cr en la dieta debe ser de 20 a 50 µg al día. (Adriano, 2001) Su deficiencia provoca síntomas parecidos a los de la diabetes y a los de las enfermedades cardiovasculares (Adriano, 2001) (Alvarado-Gómez *et al*, 2002).

Por otra parte, el cromo hexavalente afecta la salud humana, pero esto depende del tiempo de exposición. En los casos más graves el cromo actúa como un

carcinógeno (Sakar, 2000). La concentración letal de cromo +6 en animales se ha determinado como  $CL_{50} = 45 \text{ mg/m}^3$  (ATSDR, 2008). Los niveles máximos de exposición al cromo son de  $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  en Estados Unidos (NOISH 2008) y de  $500 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  en México (Sakar, 2000). En el caso de Cr (III) la exposición máxima es de  $0.5 \text{ mg/m}^3$  y  $\text{Cr}^0$  a  $1 \text{ mg/m}^3$  (EPA, 2008)

En general, la absorción de los iones metálicos se lleva a cabo mediante un transporte activo a través de la membrana en contra de un gradiente de concentración y con una inversión de energía (Lenhinher, 1995) La absorción activa del cromo es en la forma de cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) y su transporte a través de la membrana celular se presenta tanto en las células procariotas como en las eucariotas. (Cervantes *et al*, 2001)

En los animales los efectos del cromo dependen de cada especie y de la biodisponibilidad del metal. La biodisponibilidad se refiere al grado de alcance o absorción de una sustancia por un organismo con el que ha tenido contacto a través de la piel, la inhalación, la ingesta o su inyección (IUPAC, 1993). Cuando la tasa de ingreso es superior a la capacidad del organismo para eliminar esa sustancia del cuerpo se presenta la bioacumulación.

Entre los efectos que puede tener el cromo al ser absorbido por los organismos marinos se puede mencionar el incremento de la susceptibilidad a infecciones en los peces, y la acumulación y el daño en los tejidos. Cuando se presentan altas concentraciones de cromo en los tejidos de las plantas se ha observado que se inhibe la acción de la clorofila y se presenta una reducción en la cantidad de pigmentos fotosintéticos, lo que produce un cambio de coloración en las hojas llamado clorosis. También se observa una reducción en la cantidad de raíces y hojas y se presenta un retraso en el crecimiento de la planta (Vajpayee *et al*, 1999). De acuerdo con lo anterior, el cromo se considera fitotóxico y como un elemento no esencial para las plantas.

## Casos de perturbación por cromo

---

Todas las actividades antropogénicas relacionadas con el uso del cromo han protagonizado casos de contaminación en el ambiente, y en algunas ocasiones han dado origen a graves problemas en la salud, como en los ejemplos que se presentan a continuación.

1. Uno de los casos más graves, donde se afectó severamente la salud de una población, ocurrió en 1975 en Japón. Se detectó envenenamiento por cromo hexavalente debido a que una industria local utilizó desechos y lodos con cromo como relleno en ciertas áreas de Tokio. En agosto de ese mismo año se encontró que la concentración de cromo en el agua obtenida de ese subsuelo era 2000 veces mayor que la permitida (Cruz, 2005)
2. En el Estado de México, en 1978, la empresa Cromatos de México utilizó desechos con cromo para pavimentar calles y avenidas de las colonias aledañas. Posteriormente la diseminación de la contaminación por cromo provocó la muerte de algunos estudiantes, lo que originó el cierre de la empresa. Una vez cerrada las instalaciones de la empresa se convirtieron en un cementerio industrial; sin embargo, la falta de mantenimiento aún sigue contaminando el aire, el agua y el subsuelo (Ruiz, 2005).
3. En la década de los 90's se encontraron altas concentraciones de cromo en el agua que consumían los habitantes de la ciudad de León, Guanajuato. La presencia de cromo se relacionó directamente con la gran actividad industrial de curtidurías y la industria del calzado que existe en el estado. También en la ciudad se encuentra la empresa Química Central, la cual fabrica todas las sales de cromo que son necesarias para el tratamiento del cuero (Armienta *et al*, 1996).
4. Cuando la concentración de cromo es baja no se produce la muerte pero si puede provocar daños en la salud, como alergias y dermatitis. Esto se ha reportado especialmente en trabajadores que emplean cemento debido a

las altas concentraciones de cromo hexavalente que contiene este material de construcción (Chiou-Jong *et al*, 2008)

Debido a los problemas que causa el cromo en la salud, es importante identificar los sitios que presentan contaminación por este metal. Esta es la motivación principal para este trabajo. A continuación se presenta la zona de estudio.

## ZONA DE ESTUDIO. EL ESTADO DE QUINTANA ROO

---

Quintana Roo se encuentra ubicado en la parte sureste de la República Mexicana, en la zona este de la Península de Yucatán (ver Figura 3). Sus coordenadas geográficas son al norte 21°37', al sur 17°53' de latitud norte; al este 86°42', al oeste 89°20' de longitud oeste. El estado de Quintana Roo representa el 2% de la superficie de todo el país. Colinda al norte con el estado de Yucatán y el Golfo de México; al este con el Mar Caribe; al sur con la Bahía de Chetumal y Belice; al oeste con Campeche y Yucatán (INEGI 38, 2008). Cuenta con una altitud promedio de 10 msnm. La extensión territorial del estado es de 1 176 Km lineales de costa, es decir, tiene el 8% del litoral nacional (solamente superado por Baja California Sur (19%) y Norte (13.5%), y el estado de Sonora (10.9%)). El estado contienen la costa más extensa del Golfo de México, y del Mar Caribe (INEGI 35, 2008).



Figura 3. Ubicación del estado de Quintana Roo en la República Mexicana

El estado de Quintana Roo tiene un clima cálido húmedo y sus temperaturas oscilan entre los 24 y los 28 °C. Su precipitación total es de 800-2000 mm al año, siendo la época de lluvias los meses entre mayo y octubre. Es una zona donde se presentan e impactan gran cantidad de ciclones. El más fuerte de la época actual fue el huracán “Wilma”, que azotó la costa del país en octubre de 2005, impactando la isla de Cozumel y Puerto Morelos con vientos máximos de 220 km/h.

Al noreste del estado la superficie es una extensa planicie costera sin montañas. Tiene un tipo de suelo sedimentario formado con roca caliza altamente permeable, lo que provoca una alta ausencia de ríos superficiales y la rápida infiltración de las precipitaciones. Al tratarse de un área cárstica, debido a la presencia de la roca caliza, la lluvia forma innumerables corrientes subterráneas (Nohpal, 2007)

El estado de Quintana Roo comprende dos Regiones Hidrológicas: la Yucatán Norte y la Yucatán Este. La primera, como su nombre lo indica, se ubica en el extremo norte del territorio estatal. Ahí se encuentran la Cuenca de Quintana Roo con aproximadamente la tercera parte de la superficie del estado. Los cuerpos de agua con mayor extensión en esta cuenca son la Laguna Nichupté, la Laguna Chakmochuk y la Laguna Conil. Las lagunas menores son la Laguna Bojórquez y la Laguna Río Inglés, principalmente. A la Región de Yucatán Este le corresponde la Cuenca de la Bahía de Chetumal y los ríos Hondo, Azul, Escondido y Ucum.

La vegetación principal en Quintana Roo es la selva que ocupa más del 85% de la superficie del estado. También hay zonas de manglar y de arrecifes, los cuales tienen gran importancia ya que proveen a la costa de las características particulares del mar Caribe. El estado cuenta con once Áreas Naturales Protegidas, que corresponden a seis Parques Nacionales, cuatro Áreas de Protección de Flora y Fauna y un santuario en La Isla Contoy.

Los únicos rasgos tectónicos de la Península de Yucatán son las fallas de Ticul y Balacar (Prol-ledesma, 1996). Uno de los principales rasgos hidrogeológicos del

sureste del estado es la serie de fracturas de Holbox, aunque en general la hidrología subterránea no ha sido estudiada por completo.

Si bien no hay fuentes naturales de cromo en el estado, ya que no hay yacimiento cercanos. Existen reportes de la presencia del metal en estados aledaños. En 1982 se encontraron zonas geoquímicamente anómalas por su contenido de cromo, específicamente en la parte norte del estado de Chiapas, y se ha correlacionado este hecho con la presencia de cromo en los estados de Tabasco y Campeche ubicados al oeste de Quintana Roo (Castellanos, 1982; 1984).

Para este estudio hay que considerar todas aquellas actividades antropogénicas que puedan influir directamente en la presencia de cromo en el estado, además de revisar datos estadísticos que podrían estar relacionados. La distribución de la población por municipio se representa en la Figura 4.

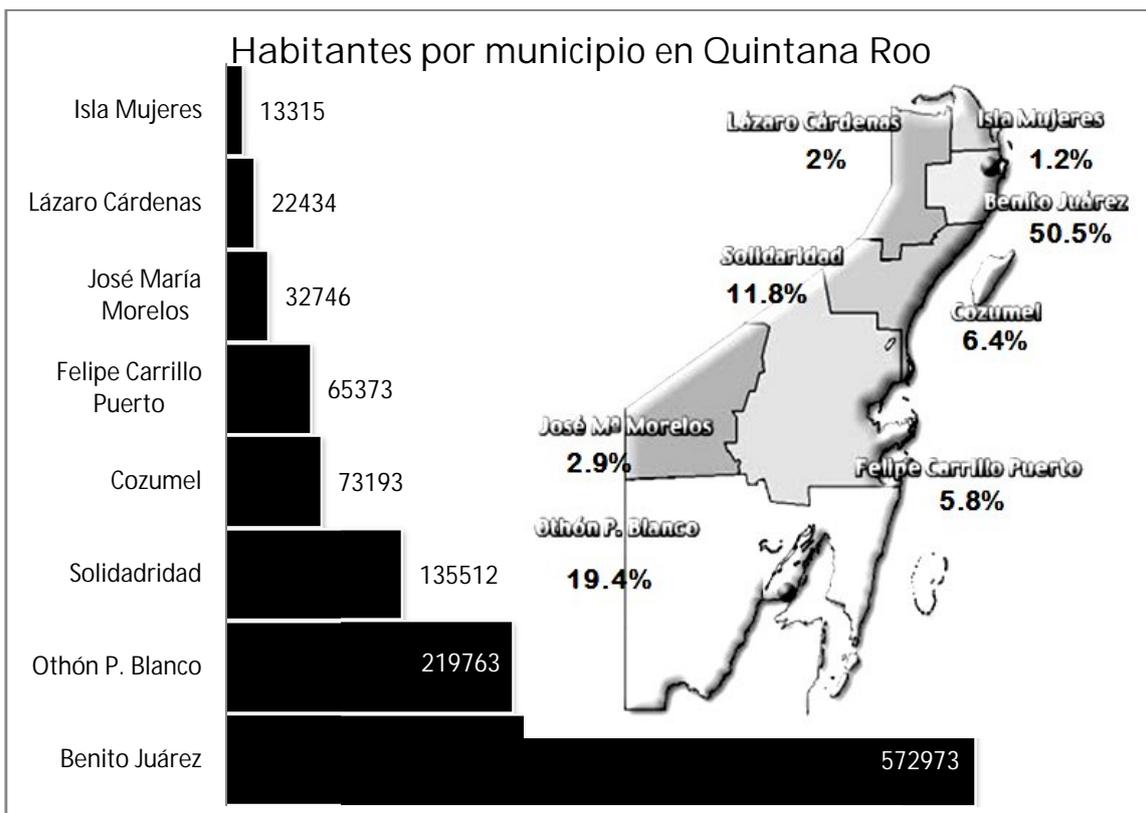


Figura 4. Distribución de habitantes y ubicación de los municipios en Quintana Roo (INEGI 35, 2005)

El estado de Quintana Roo tiene una población total de 1, 135, 309 habitantes y cuenta con una tasa de crecimiento anual igual al 3.9%. (INEGI 36, 2005). Como se puede observar en la Figura 4, el 50% de la población del estado se encuentra ubicada en el municipio de Benito Juárez. Es contrastante el hecho de que el municipio con la mayor cantidad de población (Benito Juárez) se encuentre colindante a los municipios que presentan la menor cantidad de habitantes (Isla Mujeres y Lázaro Cárdenas).

Una consecuencia directa de los grandes asentamientos humanos es la producción de elevadas cantidades de basura. Tan sólo en el 2006 en el estado se produjeron 6, 112, 000 toneladas de basura, que se desecharon en 63 hectáreas de tiraderos a cielo abierto y en las 22.5 hectáreas de relleno sanitario.

El agua residual en el estado se colecta a través del alcantarillado y finalmente es vertida por alguno de los 389 puntos de descarga. Allí se vierten 215 mil millones de metros cúbicos de aguas de desecho, de las cuales sólo son tratadas 67 122 millones de metros cúbicos (30% aproximadamente) en 29 plantas de tratamiento (INEGI 37, 2008). En muchas localidades la disposición del agua residual se realiza de manera informal, a través de zanjas o depósitos excavados por los pobladores.

Durante el 2005 los residuos sólidos en el sureste del país se presentaron en los porcentajes que se indican en la Figura 5. Como se puede observar los desechos orgánicos son la mayor parte de los residuos sólidos colectados en el Sureste Mexicano. Los metales sólo representan un 3%. Aparte del hierro los demás metales representan el 0.6% del total de residuos, por lo que, para el estado de Quintana Roo, lo anterior significa aproximadamente 183 mil toneladas de metales y en particular 36 mil toneladas de metales no ferrosos. Dentro de esta última cifra se encontraría el cromo. (INEGI 39, 2008)

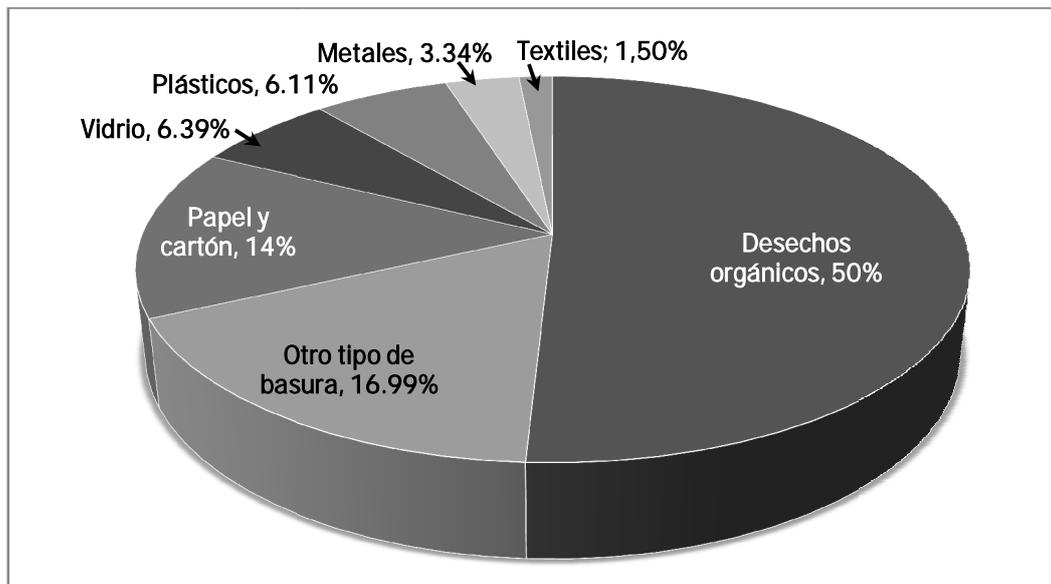


Figura 5. Distribución de los residuos sólidos colectados en el sureste de México (INEGI 38, 2007)

Los municipios que presentan el mayor volumen de desechos son Benito Juárez y Solidaridad. Se trata de los municipios con los principales complejos turísticos del estado (Cancún y la Riviera Maya, respectivamente). Esto cobra importancia si pensamos que durante el 2006 visitaron nuestro país más de 97 millones de personas siendo el estado de Quintana Roo el principal destino turístico nacional. En este estado se ha incrementado la oferta turística en los últimos quince años. En 1990 se contaban con 24 mil habitaciones para turistas y actualmente son más de 68 mil (INEGI 38, 2008). Así, el estado de Quintana Roo cuenta con la mayor infraestructura hotelera para recibir visitantes en el país.

Dentro de las actividades del turismo que pueden estar relacionadas con la contaminación por metales pesados se encuentran los viajes en embarcaciones como los cruceros. La Organización Marítima Internacional estima que cada pasajero produce un promedio de 3.5 kg de basura y de desechos sólidos durante su estancia en un crucero. En uno de estos viajes se descargan alrededor de un millón de litros de agua residual por semana. A pesar de la gran cantidad de cruceros que llegan a las costas del Caribe, especialmente a Cozumel, los residuos generados por esta vía no han sido cuantificados específicamente para las costas del Caribe Mexicano (Davenport & Davenport, 2006).

## SITIOS DE MUESTREO

Los puntos de muestreo que se emplearon en este estudio se encuentran ubicados en tres municipios del estado de Quintana Roo. Como se reporta en la figura 6 los municipios son Benito Juárez, Isla Mujeres y Lázaro Cárdenas. También se anotan las poblaciones más cercanas a los sitios de muestreo.

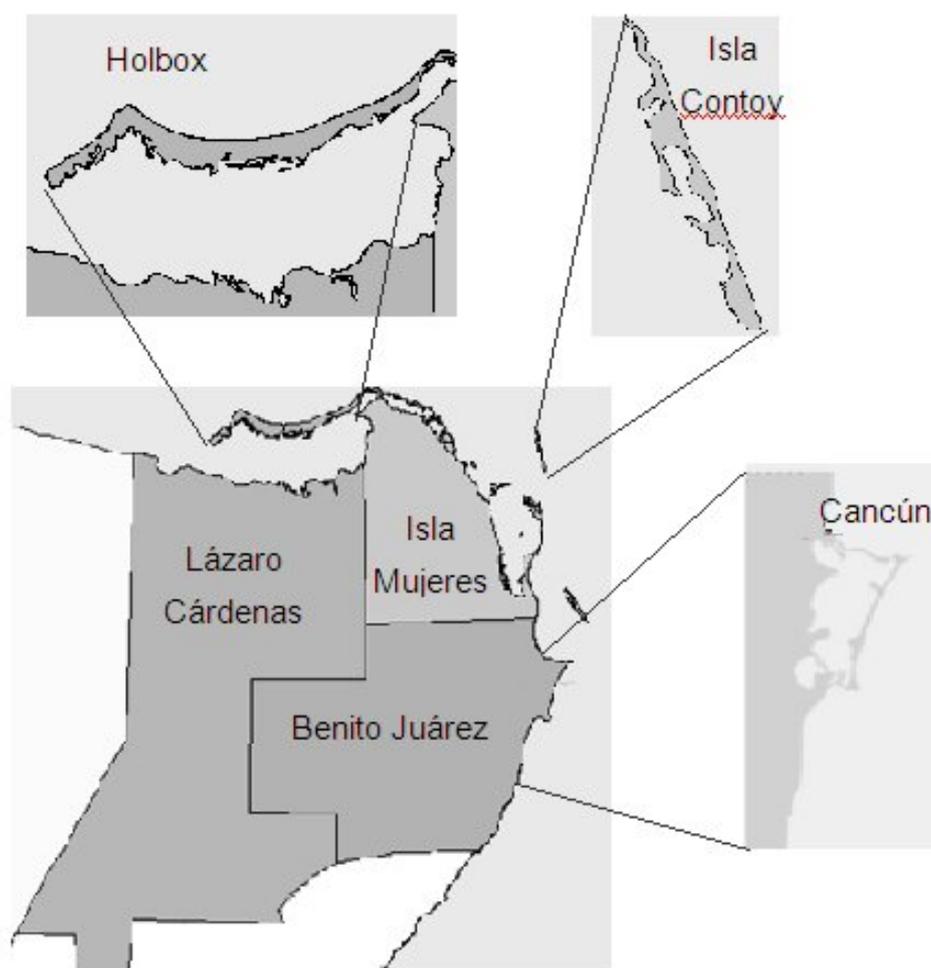


Figura 6. Ubicación de los sitios de colecta indicando las poblaciones de mayor influencia

## Municipio de Benito Juárez

---

El municipio de Benito Juárez tiene una extensión territorial de 1664 Km<sup>2</sup> y cuenta con una población de 572 mil habitantes. Su cabecera municipal es Cancún. El territorio es completamente plano, alcanzando apenas una elevación de 10 metros sobre el nivel del mar (msnm) y teniendo únicamente una suave declinación de oeste a este hacia el mar. Carece de corrientes fluviales superficiales y existen únicamente cenotes y lagunas de las cuales las más importantes son la Laguna Nichupté, la Laguna Bojórquez y la Laguna Río Inglés. Todo el territorio del municipio pertenece a la Cuenca de Quintana Roo de la región hidrológica de Yucatán Norte.

Frente a las costas del municipio se encuentra parte del “Sistema Arrecifal Mesoamericano”, en el cual se encuentran el “Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos”, que está situado frente a la población del mismo nombre; y el “Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc”.

Las principales actividades económicas del municipio son el turismo, la industria alimentaria, el comercio, la fabricación de artesanías y la industria de la madera.

Cada año en este municipio se colectan más de 200 mil toneladas de residuos. Los tipos de desechos presentan una distribución similar a la presentada en la Figura 5 página 18). Para su manejo se cuenta con 22.5 ha de relleno sanitarios y 10 ha de tiraderos a cielo abierto (INEGI 40, 2006). En 1990 existía el doble de hectáreas de relleno sanitario las cuales fueron cerrando en los últimos quince años. A pesar de su cierre los rellenos sanitarios que no tienen mantenimiento pueden generar la filtración de contaminantes al subsuelo y a los mantos acuíferos.

En este municipio se encuentran la mayor parte de los puntos de descarga del estado. En ellos se vierten casi 118 mil millones de metros cúbicos de aguas de desecho (INEGI 37, 2007).

La Ciudad de Cancún es la cabecera municipal con 529 701 habitantes. Se encuentra ubicada al noreste del municipio. A 13 km de sus costas se encuentra Isla Mujeres. Por esta zona cruzan diversos barcos y embarcaciones que transportan todo el día pobladores y turistas entre la isla y la parte continental. También en la cabecera municipal se encuentra la Zona Hotelera llamada Isla Cancún, la cual alberga la mayor parte de los hoteles y de las zonas residenciales. Entre el continente y la isla se encuentra el sistema lagunar Nichupté.

Otra población importante del municipio es Puerto Morelos, que cuenta con 1087 habitantes (INEGI 44, 2005). Puerto Morelos es el principal puerto de Quintana Roo y constituye una de las tres delegaciones del municipio de Benito Juárez. Se encuentra a 36 Km al sur de Cancún. Frente a sus costas está un arrecife coralina declarado Parque Nacional. Está barrera arrecifal forma parte del “Gran Cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental” y es la segunda barrera de arrecifes más grande del mundo (también conocida como Sistema Arrecifal Mesoamericano). Al ser una barrera de arrecifes se forma una laguna arrecifal de poca profundidad, con lo que las playas de Puerto Morelos son de poco oleaje y la profundidad de la laguna oscila entre los 2 y 8 metros.

Los municipios de Benito Juárez e Isla Mujeres comparten territorialmente el “Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc”.

### Municipio de Isla Mujeres

---

El Municipio de Isla Mujeres (ver Figura 6 para la localización en el estado) tiene una extensión de 1100 km<sup>2</sup>. Incluye a la isla del mismo nombre, la Isla Blanca, la Isla Contoy y parte del territorio continental. La altitud promedio de la región es de 5 msnm. El municipio representa el 2.16% del territorio estatal. La cabecera municipal es Isla Mujeres, que se ubica a 13 Km de la ciudad de Cancún. Para arribar a la isla se aborda un ferri desde Puerto Juárez o en un transbordador (para autos) desde Punta Sam. El municipio cuentan con 13 315 habitantes y las principales actividades económicas del lugar son la pesca y el turismo.

El municipio no presenta corrientes superficiales de agua y posee tres lagunas: La laguna Conil compartida con el municipio de Lázaro Cárdenas; la laguna Chakmochuk y la laguna Macax, que en realidad son entradas del mar Caribe. También se localizan cenotes de agua dulce.

En 1999 el municipio contaba con 4 hectáreas de relleno sanitario y se producían 3 mil toneladas menos de basura en comparación con las que se colectaron durante el 2005. En ese último año se colectaron en el municipio 11 mil toneladas de basura, aunque ya no contaban con áreas de tiradero a cielo abierto, ni con rellenos sanitarios. El municipio cuenta con una sola planta de tratamiento de aguas con lodos activados. Los 14 mil millones de metros cúbicos de aguas residuales que produce el municipio son vertidos por los 19 puntos de descarga. (INEGI 41, 2007)

Una de las islas que conforman este municipio es la Isla de Contoy, que se encuentra a 30 Km de Isla Mujeres. La Isla tiene 8.75 Km de largo y 200 - 700m de ancho. Al sur de la isla se encuentra el arrecife Ixlaché, que forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano, y que se encuentra ubicado en la unión de las aguas cálidas del mar Caribe y de las aguas menos cálidas del Golfo, por lo que existen muchos nutrientes que son ideales para la alimentación de especies marinas. Desde 1998 la isla se conformó en Parque Nacional (Parque Nacional Isla Contoy) junto con las 4 900 hectáreas del mar circundante. La Isla tiene ecosistemas prácticamente intactos, y es un santuario de aves y fauna marina, como algunas especies de tortugas que están en peligro de extinción.

### Municipio de Lázaro Cárdenas

---

El municipio de Lázaro Cárdenas (Figura 6 para su ubicación en el estado) tiene 3881 Km<sup>2</sup> de extensión y una población de 22, 434 habitantes. El terreno es prácticamente plano, como toda la Península de Yucatán, no superando la altitud de 25 msnm. Todas las corrientes son subterráneas y sus afloramientos a la superficie son conocidos como cenotes. La principal laguna es Yalahau o Conil,

ubicada entre los poblados de Holbox y Chiquilá, además de ser limítrofe con el municipio de Isla Mujeres. A diferencia de los otros municipios, la vegetación es de bosque tropical y no de selva.

En este municipio existen 7 hectáreas de tiradero a cielo abierto y no hay relleno sanitario. En las poblaciones más pequeñas existen áreas en las afueras para colocar la basura. La basura allí puesta no es colectada y tampoco tiene tratamiento alguno. En cuanto a las aguas residuales se producen cerca de 212 millones de metros cúbicos que se vierten a través de 13 puntos de descarga. Las actividades económicas relevantes en el municipio son la agricultura, la ganadería, la apicultura y la actividad forestal (INEGI 42, 2006).

La cabecera municipal es Kantulkinil con 6 383 habitantes. Otras poblaciones importantes son Chiquilá, con 1 285 habitantes, y Holbox con 1 198 habitantes. (INEGI 44, 2005) En particular Holbox es una isla ubicada a 10 Km de la costa, que forma parte del Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam. Tiene una extensión de 40 Km de largo y 2 km de ancho. Se encuentra unida a la península por una barra de arena con varios canales que la unen al mar y a la laguna Yalahau. Sólo se llega a la isla al cruzar la laguna en lancha. Las calles en la isla son de arena blanca. En la isla las actividades económicas importantes son la pesca y el turismo.

Toda esta información detallada nos permite encontrar las posibles fuentes de contaminación en el Estado. El análisis de metales pesados se realizó con un bioindicador, mismo que se presenta a continuación.

## BIOINDICADORES

---

La contaminación por metales pesados en las zonas costeras puede estudiarse mediante el análisis de su concentración en el agua, los sedimentos o a través de algún organismo de la biota marina, el cual debe ser común en toda la zona de estudio (Phillips, 1977). A estos organismos se le conoce como bioindicadores.

Los organismos bioindicadores se utilizan para definir áreas contaminadas. Esta opción de estudio es atractiva ya que no es muy costosa, los organismos a utilizar deben absorber metales del agua y puedan analizarse de manera simple (Mocanu *et al*, 2006). Un buen organismo bioindicador tienen que cumplir con los siguientes puntos (Wiegoloaski, 1974):

- su fisiología y su ecología deben ser bien conocidos;
- debe acumular contaminantes sin que se vea seriamente afectado;
- de preferencia deberá ser sedentario;
- debe ser abundante en la región de estudio;
- debe tener un rango de vida aceptable para que su exposición a los contaminantes sea la adecuada y su colecta se realice en periodos largos;
- debe tener un tamaño razonable y proveer de una cantidad adecuada de tejido para el análisis;
- debe ser fácil de colectar, extraer y manejar;
- NO debe estar en peligro de extinción.

### Organismos indicadores de la presencia de cromo

---

Actualmente muchos de los estudios que se realizan sobre la presencia de cromo en los ambientes marinos utilizan como bioindicadores algunos animales marinos. Entre los bioindicadores más frecuentes se encuentran las ostras y en menor grado peces, mejillones y almejas (Neff, 2002) (Rosas, 2004) (Rayment & Barry, 2000).

Para este estudio se seleccionó un tipo de pasto marino como bioindicador, debido a que se ha encontrado que la concentración de cromo es cuantitativamente mayor en pastos marinos que en otros organismos como peces y moluscos (Rosas, 2004). Además, los efectos ecológicos son menores al tomar muestras de una población tan abundante y de fácil reproducción.

Los pastos marinos son plantas fanerógamas marinas que crecen principalmente en suelos sedimentarios. A diferencia de las algas sólo se encuentran en zonas de poca profundidad y buena iluminación, por lo que es posible encontrarlas en zonas cercanas a la costa.

En la literatura existen diversos estudios sobre la presencia de cromo en pastos marinos, mismos que se presentan en la Tabla 1.

Costa	Especie	Concentración de Cr [ppm]		Fuente
Mediterráneo	<i>Posidonia oceánica</i>	0.96-3.27		Neff, 2002
Mediterráneo	<i>Posidonia oceánica</i>	≈1.05		Catsiki, 1993
Florida E.U.	<i>Halodule wrightii</i>	Hojas 0.2-3.5	Raíces 0.3-2.9	Lewis, et al, 2007
Australia	<i>Zostera Caprioni</i>	Mes 1998	Hojas   Raíces	Prange & Dennison, 2000
		Julio	6.1   4.7	
		Septiembre	30.6   29.7	
		Enero	5   12.8	
Grecia	<i>Cymodocea nodosa</i>	Hojas 4.8-1.4	Raíces 10.5-8.7	Nicoldau, et al 1998

Tabla 1. Concentración de cromo en diferentes pastos marinos procedentes de diversas partes del mundo

En la tabla se indica la costa en que fueron colectadas las muestras y la especie de pasto marino utilizada en ese estudio. También se reporta la concentración de

como determinada en sus tejidos. Como se observa en la tabla, en algunos casos la concentración es mayor en raíces que en hojas.

Los pastos marinos son un buen bioindicador para determinar la cantidad de metales pesados presente en el ambiente. El pasto marino que se utiliza en el presente proyecto es *Thalassia testudinum*, del cual se presentan especificaciones y detalles relevantes a continuación.

### El bioindicador *Thalassia testudinum*

---

En la Figura 7 se muestra un diagrama del pasto marino conocido popularmente como “hierba de la tortuga” y científicamente como *Thalassia testudinum*. Es una fanerógama (planta con flores) que vive y se reproduce bajo el agua. Además pertenece a los llamados pastos marinos, nombrados así por sus funciones ecológicas y no por su taxonomía.

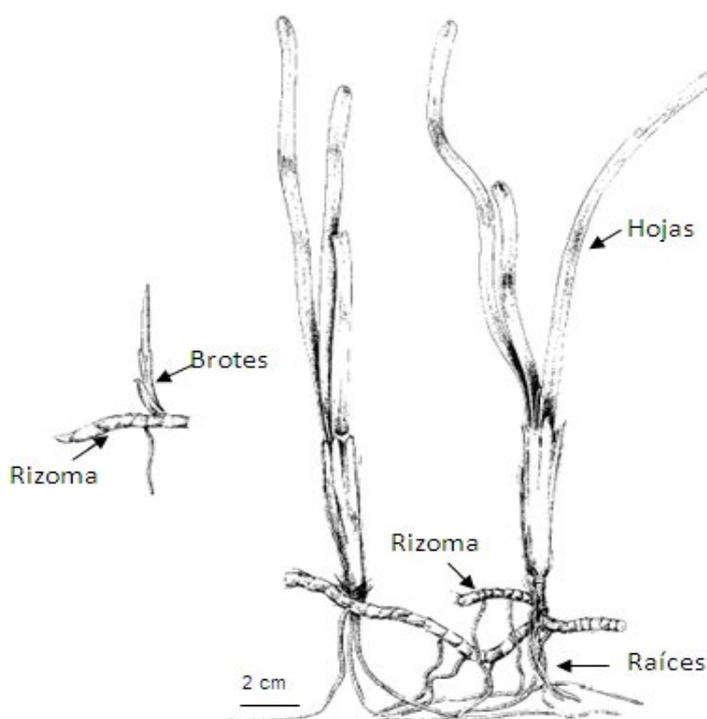


Figura 7. Morfología del pasto marino *T. testudinum* (Modificado de Tomlinson, 1974)

El pasto está morfológicamente compuesto por un rizoma horizontal y en declive, con raíces que se encuentran verticales y un follaje de hoja. La presencia de flores y frutos está determinada por la estación.

La *T. testudinum* es una de las especies más importantes de pastos marinos de las costas del Caribe y el Golfo de México (Nugent, 1978) (Galindo, 2000) (Gutiérrez *et al*, 2000). Aunque la distribución global de este pasto se ve afectada por la salinidad, las epifitas, algunas enfermedades, los nutrientes presentes y la actividad de las olas, los principales factores que determinan su presencia son la temperatura del agua, la profundidad a la que se encuentran y la luz disponible. La *T. testudinum* tiene un óptimo crecimiento a temperaturas entre los 23 y 31° C y puede encontrarse a profundidades de hasta 10 m en aguas claras, pero en hábitats turbios donde la cantidad de luz limita su actividad fotosintética se encuentran a menos de 3 metros de profundidad (Van Tussenbroek *et al*, 2006).

Las cualidades de este pasto marino no sólo se limitan a constituir un alimento directo para los organismos. (Nugent, 1978) (Vargas & Yáñez, 1987) También:

- son substrato para una gran variedad de epifitas, que son fuente de alimento para otros organismos adyacentes;
- sus praderas son importantes áreas de desarrollo de etapas juveniles de peces e invertebrados, y zonas de protección para otros animales marinos;
- su presencia incrementa la acumulación de partículas orgánicas e inorgánicas;
- sus raíces se enlazan a los sedimentos, protegiendo el fondo de la erosión, mientras que las hojas amortiguan las corrientes e incrementan la tasa de depositación de sedimentos finos;
- sus raíces remueven nutrientes como nitrógeno y fósforo del sustrato, lo transfieren a las hojas y de ahí al agua circundante, proporcionando nutrientes para otras plantas.

La *T. testudinum* toma los nutrientes del medio a través de sus hojas y raíces, con los cual los metales pesados se absorben por ambos tejidos. Este pasto marino se utiliza como biomonitor para la detección de metales traza en sitios contaminados, debido a que su temporalidad de crecimiento y sus características morfológicas permiten su fácil identificación y selección (Whelan III *et al*, 2005).

En la Tabla 2 se presentan algunos datos reportados previamente sobre la concentración de cromo determinados en los tejidos del pasto marino *Thalassia testudinum*.

Sitio	Concentración de Cr [ppm]		Fuente
Rio Newport, Carolina del Norte E. U.	Hojas 4.0	Raíces ----	Montgomery & Price, 1979
Cayos de Florida Miami E.U.	<0.2	0.2-0.8	Lewis <i>et al</i> , 2007

Tabla 2. Concentraciones de cromo reportadas para *T. testudinum*

El primero de los sitios se reporta como perturbado a causa de la contaminación generada por las industrias que trabajan con compuestos de cromo y descargan sus residuos en el río. El segundo se clasifica como un sitio con poca influencia antropogénica.

Como antecedentes de este estudio existen una serie de trabajos previos que se presentan a continuación (Ruiz, 2005) (Valdespino, 2005) (Lavoisier, 2006) (Martínez, 2007).

## ANTECEDENTES

---

La concentración de cromo en el estado de Quintana Roo se estudia desde el 2004 y tiene como principal punto de atención la Laguna Yalahau aledaña a la población de Holbox. Las colectas en este sitio se han llevado a cabo regularmente desde entonces.

En el trabajo más reciente en relación a Holbox y la Laguna Yalahau (Martínez 2007) se presentan los datos recabados en las colectas realizadas durante enero y mayo de 2005. Se reportó que en el primer muestreo las concentraciones de cromo permanecieron relativamente constantes a lo largo de todos los puntos de la laguna. En mayo se colectaron pastos que tuvieron su etapa de crecimiento durante la época de nortes. La concentración de cromo en las muestras colectadas en mayo es cuantitativamente mayor que las de enero del mismo año. En este trabajo previo se propone que los tejidos de las hojas son mejores indicadores pues representan una temporalidad más corta. También se reportan sitios que presentan incremento en la concentración debido a la influencia del basurero de la localidad y por la entrada de aguas subterráneas. Una de las conclusiones más relevantes que se presentan en este trabajo es la necesidad de continuar el diagnóstico y los estudios relacionados con la absorción de cromo por la *T. testudinum*.

Entre los trabajos precedentes se encuentran los de Lavoisier (2006), Valdespino (2005) y Ruiz (2005) donde se presentan los resultados de los muestreos de julio y octubre de 2004 y se analiza el mismo lugar. En todos estos trabajos se relacionan los periodos de colecta con los datos de las precipitaciones. Se establece que el muestreo de julio se encuentra en un periodo de secas seguido por uno de lluvias, y para el muestreo de octubre se presenta un periodo de lluvias. Las concentraciones de cromo se incrementan en época de lluvias debido a las escurrientías, lo que explica también la mayor concentración de otros metales pesados (Cd, Pb, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn) en la zona del basurero local.

Adicionalmente el trabajo de Ruiz (2005) presenta datos para el sitio de Puerto Morelos. Al comparar los sitios de Puerto Morelos y la laguna Yalahau se encuentra que la concentración de cromo en la laguna es mayor que la del puerto.

En todos los estudios se concluye que los sitios no se encuentran peligrosamente contaminados; sin embargo, la presencia del metal es indicativa de influencia antropogénica al no haber fuentes naturales en la región.

En este trabajo continuamos con el diagnóstico de estas zonas, además de incluir otras que también pertenecen a las Áreas Naturales Protegidas pero que presentan diferentes grados de influencia antropogénica. Aquí no sólo se habrán de estudiar los efectos de poblaciones pequeñas, sino también de la principal ciudad del estado (Cancún).

## OBJETIVO GENERAL

---

- Realizar un diagnóstico de la presencia de cromo en el noreste del estado de Quintana Roo utilizando como bioindicador un pasto marino colectado desde 2004 hasta 2007.

## OBJETIVOS PARTICULARES

---

- Cuantificar la presencia de cromo en algunas Áreas Naturales Protegidas del estado de Quintana Roo, a través del uso de un bioindicador, *Thalassia testudinum*.
- Realizar análisis locales, espaciales, anuales y temporales para tratar de definir las posibles fuentes de cromo, naturales y antropogénicas, en las zonas costeras del estado.
- Comparar los resultados obtenidos por la técnica de espectroscopia de absorción atómica logrados con los reportados previamente en la literatura para realizar un diagnóstico de la presencia de cromo en la zona de estudio.

## HIPÓTESIS

---

Los sitios de estudio ubicados al noreste del estado de Quintana Roo, en particular algunas Áreas Naturales Protegidas y sus lagunas adyacentes, se encuentran afectados por diversos contaminantes, entre ellos el cromo; sin embargo, se espera que la cantidad de cromo presente en los tejidos del bioindicador (*Thalassia testudinum*) sea superior en las zonas que tienen mayor influencia antropogénica como las zonas turísticas.

En caso de encontrarse que las Áreas Naturales Protegidas presentan una concentración mayor o igual del metal, será indispensable sugerir una revisión de los programas de manejo, o bien, analizar si existe una afluencia de cromo desde otros lugares de la región hacia estas zonas en particular.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de realizar un diagnóstico sobre la presencia de cromo en el estado de Quintana Roo se han realizado colectas del pasto marino *T. testudinum* en la zona noreste del estado de Quintana Roo desde el 2004 hasta el 2007.

### Áreas de estudio

Para este estudio se definieron como lugares de estudio los señalados en la Figura 8, todos ubicados en la zona noreste del estado de Quintana Roo.

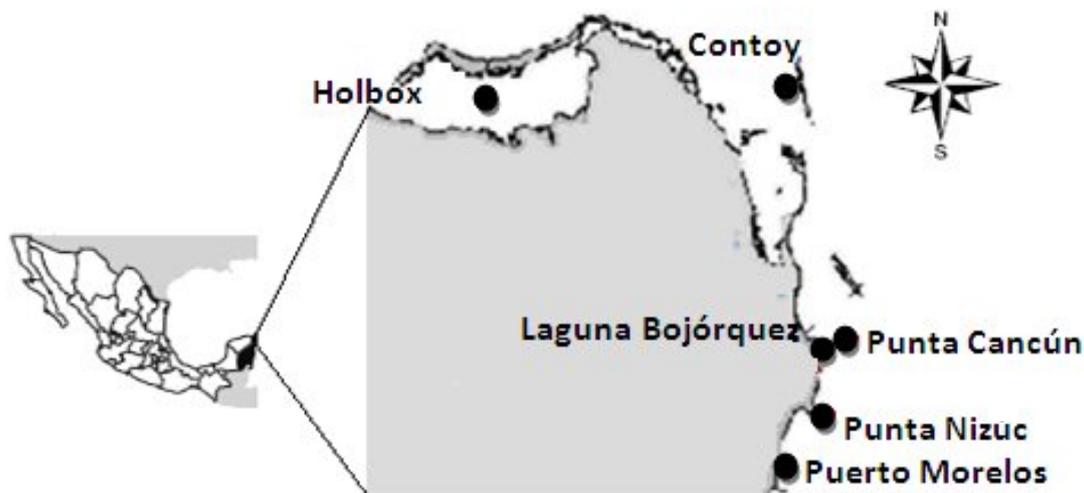


Figura 8. Ubicación general de los lugares de colecta

Cada uno de los lugares es subdividido en sitios al momento de colectar las muestras, y algunos de ellos son georeferenciados (ver Tabla 3). Algunos se reconocen por sus características locales de la siguiente forma:

- sitios 2 y 3 de Isla Contoy cercanos a la Aldea de pescadores;
- sitios 6 y 8 de la Laguna Bojórquez rodeados por la zona Hotelera “Isla Cancún”;

- sitios 1, 2 y 3 de Punta Nizuc frente a la zona Hotelera;
- sitios 1, 2, 3 y 4 de Puerto Morelos situados frente al puerto desde el faro hasta la estación militar.

Lugar	Sitios	Georeferencia
Holbox	1	N 21° 30.997' - W 87°23.880'
	2	N 21° 30.255' - W 87°23.525'
	3	N 21° 29.890' - W 87°22.208'
	4	N 21° 31.044' - W 87°19.248'
	5	N 21° 60.427' - W 87°17.576'
	6	N 21° 29.291' - W 87°15.776'
	7	N 21° 26.351' - W 87°11.174'
	8	N 21° 25.847' - W 87°13.742'
Contoy	1	N 21° 29.953' - W 86°43.756'
Punta Cancún	1	N 21° 08.327' - W 86°44.754'

Tabla 3. Coordenadas geográficas de algunos sitios de colecta en el estado de Quintana Roo

## Recolección de muestras

La recolección de las muestras fue realizada desde el 2004 y hasta el 2007. Los sitios de muestreo y los meses de recolección se especifican en la Tabla 4 en el capítulo de análisis de resultados.

Debido a que la profundidad en la mayoría de los lugares de muestreo oscila entre los 0.5 m y los 4 m, es posible realizar la colecta del pasto manualmente. Sólo en los sitios cercanos a los 4 m de profundidad es necesario bucear para obtener la muestra. Una vez ubicadas las “praderas” de *T. testudinum* se extraen los pastos. La extracción se realiza desde la raíz. No se utiliza ningún aparato al sustraer el pasto. Una vez desenterrada la planta es sometida a un primer lavado con agua del sitio para retirar sedimento. Posteriormente se seleccionan y separan las hojas

de las raíces y rizomas. Una vez apartadas las hojas son frotadas con la uña para retirar epifitas. En cuanto a las raíces se les retira el sedimento. Finalmente todo es enjuagado con agua del sitio. La selección de una segunda muestra en el sitio se realiza a una separación de 4 m del sitio inicial. Así se obtienen tres muestras por sitio de manera aleatoria. Al momento de arribar a tierra las muestras son puestas al sol para su secado.

Al llegar las muestras al laboratorio se transfieren a una bolsa de papel estraza. En el laboratorio las muestras se colocan en la estufa a 60°C durante 24 hrs. De esta manera se secan para después ser sometidas al tratamiento analítico. El análisis de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio de Espectrometría de Absorción Atómica ubicado en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los detalles de la forma en que se analizaron las muestras se presentan en el ANEXO al final de esta tesis.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

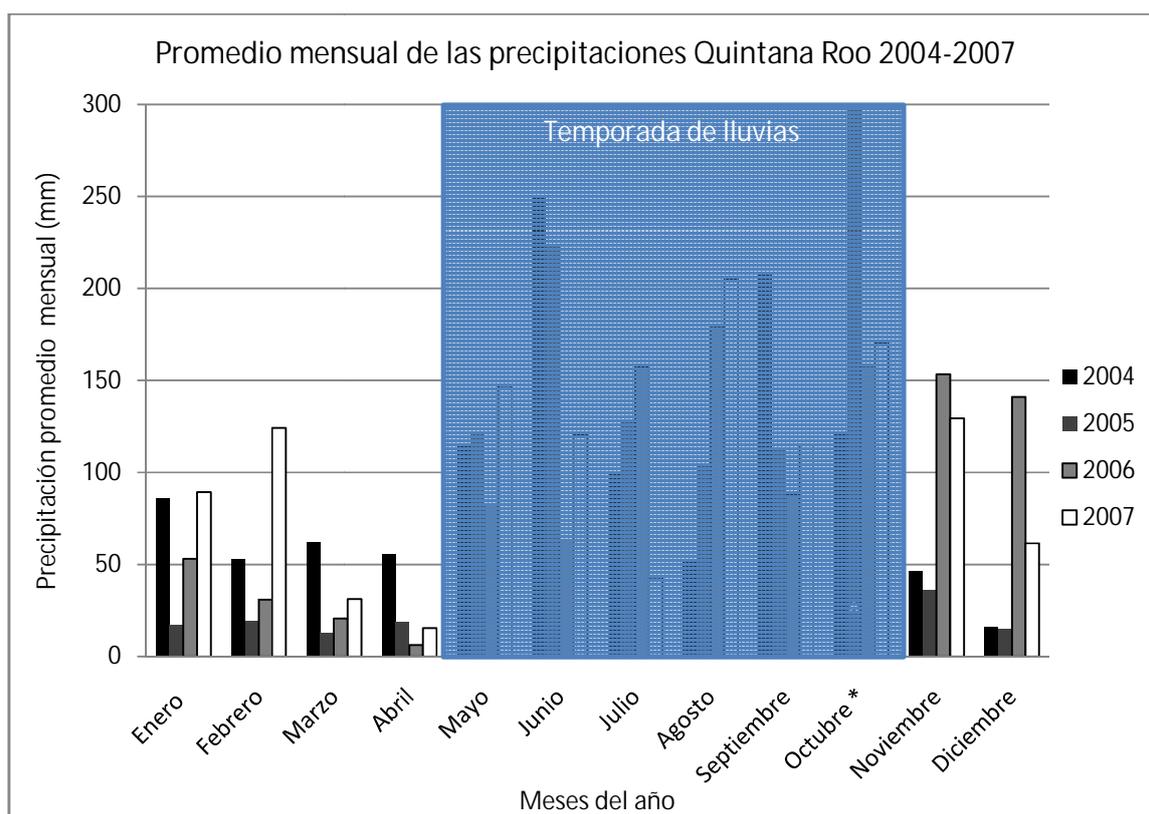
En la Tabla 4 se reporta la fecha en la que se llevó a cabo la recolección de las muestras de pastos marinos. También se mencionan los lugares donde se realizó la colecta. Se puede observar que las muestras de *T. testudinum* para este estudio se obtuvieron durante tres años, de junio 2004 a junio de 2007. Los meses en los que se efectuó la colecta están relacionados con las temporadas de lluvias y secas.

Año \ Mes	2004	2005	2006	2007
Enero- Febrero		Holbox	Holbox	Holbox Contoy Punta Nizuc Punta Cancún Puerto Morelos
Mayo		Holbox		
Junio	Puerto Morelos Holbox			Holbox
Agosto			Punta Nizuc Bojórquez Holbox	
Octubre	Holbox	Holbox Contoy		

Tabla 4. Fechas y lugares de los sitios donde se colectaron las muestras

El cromo puede llegar a los ambientes acuáticos por deposición húmeda a través de las lluvias. En la Península de Yucatán, el transporte de cromo se ve además favorecido por el fenómeno de las escurrentías y las características cársticas del suelo. Para encontrar una relación entre las lluvias y la contaminación resulta importante revisar los niveles de precipitación en el Estado y relacionarlos con las concentraciones de cromo encontradas en los tejidos de las muestras de *T. testudinum*.

En la Gráfica 1 se presentan los niveles de precipitación en el estado de acuerdo a su promedio mensual y durante los años en que se realizaron las colectas. Se observa también que en el estado de Quintana Roo la temporada de lluvias se presenta en los meses de mayo a octubre, y la época de secas desde el mes de noviembre hasta el mes de abril.



**Gráfica 1 . Precipitación promedio mensual en el estado de Quintana Roo (CONAGUA SMN Precipitación Histórica por Estado, 2008**

\* Nivel de precipitación de 649.2mm en octubre de 2005

De esta manera cada uno de los meses de colecta presenta características acentuadamente diferentes en cuanto a la influencia de las precipitaciones.

En el análisis de las muestras es importante saber que el promedio de vida de las hojas de la *T. testudinum* es de tres meses (Tussebroek, 2006). Por lo tanto, la cantidad de metales pesados que pueden encontrarse en los tejidos fotosintéticos representan lo acumulado durante los tres meses antes de su colecta. Por esta razón, las colectas realizadas en el periodo de enero- febrero, reflejan lo ocurrido tres meses antes, es decir, octubre, noviembre y diciembre del año anterior, que son meses asociados al final de la época de lluvias. Las muestras colectadas en el mes de junio están influenciadas por lo que ocurrió en los meses de marzo, abril y mayo, es decir, el final de época de secas. Las muestras colectadas en el mes de mayo representan la época de secas, mientras que aquellas obtenidas en los meses de agosto y octubre reflejan lo ocurrido durante la temporada de lluvias.

En el Golfo de México durante la temporada de ciclones se presentan huracanes, tormentas y depresiones tropicales, que se caracterizan por causar fuertes vientos y abundantes lluvias. Como las lluvias y los vientos generados por los ciclones tienen influencia en el movimiento de nutrientes y contaminantes de un sitio a otro, resultará importante especificar si durante los tres meses previos a la colecta se presentó alguno de esos fenómenos. La temporada ciclónica se presenta desde el mes de mayo hasta el mes de noviembre y frecuentemente los ciclones más intensos se presentan en los meses de septiembre y octubre.

Además de tener fechas de colecta adecuadamente seleccionadas, cada zona de estudio tiene diferentes grados de influencia antropogénica. Así, Holbox es una isla separada del continente por una laguna y cuenta con una pequeña población de poco más de mil habitantes; Contoy es una isla que sólo tiene una aldea de pescadores y a la que sólo se permite el arribo de 200 turistas diariamente; Bojórquez es una laguna cercana a Cancún, la ciudad más poblada del Estado; Punta Cancún y Punta Nizuc son lugares aledaños a la zona Hotelera de Cancún,

uno de los complejos turísticos más grandes del país; y Puerto Morelos es una localidad con actividad portuaria menor cuyo número de pobladores está creciendo de manera importante. Es relevante recordar que todos los lugares pertenecen a las Áreas Naturales Protegidas de la SEMARNAT.

El estudio de la presencia de metales pesados inició en Holbox (Valdespino, 2005) (Ruiz, 2005) (Rosas, 2006) (Lavoisier, 2006) (Martínez, 2007) (Nohpal, 2007). Por esta razón en la Tabla 4 se observa que la recolección de muestras ha sido regular para Holbox. Al ser el lugar del que se tiene mayor información, el análisis de esta zona será el más amplio.

Con los datos que contamos se puede realizar el diagnóstico de la contaminación por cromo en las zonas de estudio seleccionadas del estado de Quintana Roo, para lo cual realizamos cuatro tipos de análisis: temporal, anual, espacial y local.

En el análisis temporal se plantea como objetivo ver qué ocurre con la concentración de cromo en Holbox a través de los años. Para realizar este análisis se seleccionan las muestras de pastos que cumplen con la condición de haberse colectado durante el mismo mes pero en diferente año. Se propone esta restricción pues se asume que las condiciones climatológicas serán similares de un año a otro y se espera que la planta se encuentre en la misma etapa de crecimiento.

El análisis anual tiene como finalidad revisar el cambio en los niveles de cromo en Holbox en el transcurso de un año. Las muestras elegidas para elaborar este análisis tienen que cumplir el requisito de haberse colectado en distintos meses de un mismo año. En este análisis también se pretende conocer la relación que hay entre las precipitaciones y la concentración de cromo, por lo que se puntualizarán los acontecimientos meteorológicos ocurridos durante los tres meses anteriores a la colecta de las muestras.

Con el análisis espacial, se definen los lugares del Estado que presentan los niveles más altos de cromo. Para hacer esta comparación se escogen muestras provenientes de diferentes regiones del estado pero colectadas durante el mismo

mes y año. Al plantear esta restricción en la selección de muestras se asume que las condiciones meteorológicas fueron semejantes en todos los lugares durante ese mes y año.

El análisis local refleja las fuentes puntuales de cromo en Holbox. Para desarrollar este análisis se toman las colectas con la mayor cantidad de sitios. Los datos serán presentados y analizados de acuerdo a la fecha de toma de muestra. Al estudiar los niveles de cromo en cada uno de los sitios y compáralos, la diferencia en la concentración de cromo podría indicar una fuente puntual de contaminación. De ser así habrá de examinarse cuál es el posible origen del metal en la localidad.

Para precisar si los niveles de cromo representan que el lugar está contaminado se comparará la concentración determinada en las muestras de pasto marino con el índice de referencia de 4 ppm, que es la concentración reportada para un sitio severamente contaminado por cromo (Montgomery & Price, 1979). Este valor de referencia fue determinado en tejidos de *Thalassia testudinum* colectados en el Rio Newport (E.U.) en el cual se descargan las aguas residuales de varias industrias que utilizan compuestos de cromo. Con el fin de realizar la comparación, en las gráficas de este trabajo se marcará una línea sombreada indicando el valor de referencia.

Por último cabe destacar que al realizar un diagnóstico sobre la contaminación por metales pesados es importante focalizar el estudio sobre la fracción biodisponible de los metales (Rosas, 2005). Las hojas de *T. testudinum* son el tejido que es consumido directamente por otros organismos. La cantidades de Cr presente en hojas es la fracción más biodisponible del metal en comparación con el cromo presente en raíces. Por esta razón, todos los análisis que se realizan en este trabajo se realizan con base en la concentración de cromo determinada en hojas.

## ANÁLISIS TEMPORAL

---

Este análisis tiene como objetivo conocer el comportamiento en los niveles de cromo a través del tiempo. El análisis sólo se realizará con las concentraciones de cromo determinadas en muestras colectadas en Holbox. Se revisará si las condiciones climatológicas son similares de un año a otro y se asume que la etapa de crecimiento del pasto es la misma al colectarse en la misma fecha.

En la Tabla 4 se remarcan tres recuadros con las colectas que se pueden comparar y son las siguientes:

- Temporal 1: Colectas de junio de 2004 y 2007;
- Temporal 2: Colectas de octubre de 2004 y 2005.
- Temporal 3: Colectas de enero- febrero de 2005, 2006 y 2007;

Recordemos que las colectas realizadas para este estudio iniciaron en junio de 2004. Por esta razón el análisis temporal se ordena de acuerdo a la fecha en que se realizó la primera colecta de cada uno de los análisis. Además, se analizan de acuerdo a la época que representan, es decir, las muestras colectadas en junio están influenciadas por lo ocurrido al final de la época de secas, las muestras de octubre por la época de lluvias y las muestras de enero-febrero están influenciadas por el final de la temporada de lluvias.

Para realizar el análisis temporal en todos los casos se promedian las concentraciones de cromo de los sitios 2, 4 y 7 (ver la Tabla 3 en la página 32 o la Figura 13 en la página 54), ya que son los sitios en los que se han recolectado muestras con mayor regularidad. El promedio de la concentración de cromo representa en general cuál era la condición del lugar en ese mes y año.

Para comenzar con este análisis es útil mencionar que en el estado de Quintana Roo la precipitación media anual oscila entre los 90 y los 100 mm. Generalmente durante la época de lluvias los niveles son superiores a este valor, mientras que en la época de sequía las precipitaciones se presentan con niveles inferiores. Es

importante señalar que durante el transcurso de un fenómeno meteorológico, los niveles de precipitación se ven afectados. Tal es el caso ocurrido durante el paso del huracán Wilma se presentaron los niveles máximos históricos de 649 mm de precipitación.

En la Tabla 5 se muestran las fechas de colecta, y la concentración promedio de cromo determinada en las muestras colectadas en Holbox.

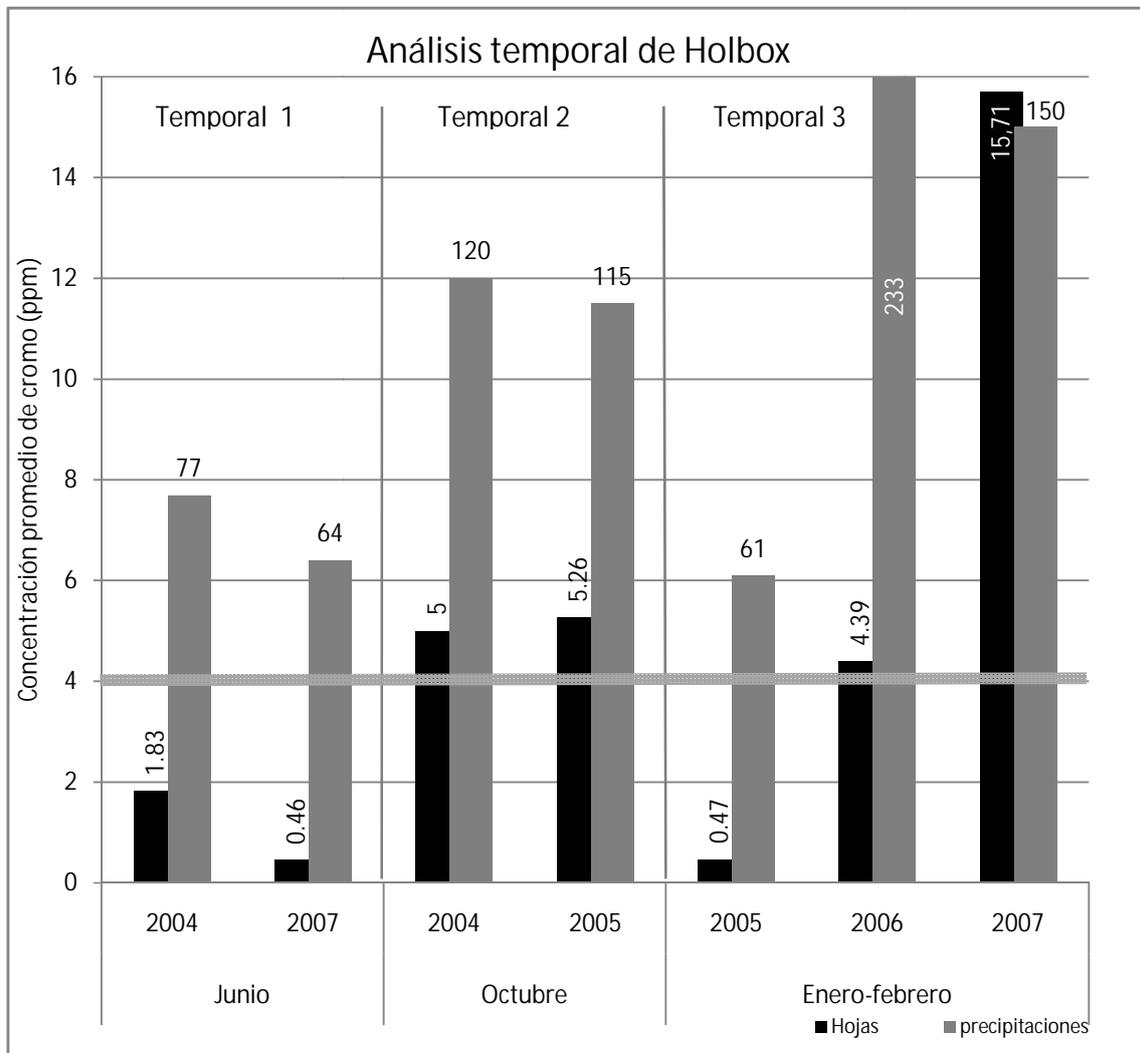
Análisis	Colecta	Año	Concentración promedio de cromo (ppm)
Temporal 1	Junio	2004	1.83
		2007	0.46
Temporal 2	Octubre	2004	5.00
		2005	5.26
Temporal 3	Enero-febrero	2005	0.47
		2006	4.39
		2007	15.71

Tabla 5. Datos con los que se elabora el análisis temporal de Holbox

Estos mismos datos se reportan en la Gráfica 2. En la parte inferior de la gráfica se muestran las fechas en que fueron realizadas las colectas y en la parte superior se indica a que número de análisis temporal pertenecen. La concentración de cromo determinada en hojas se ilustra con las barras negras y a su lado derecho se muestra una barra gris que indica la precipitación promedio de los tres meses anteriores a fecha de la colecta. Finalmente se marca una línea sombreada para indicar el marco de referencia sobre una zona con alta influencia antropogénica, de acuerdo a lo reportado por Montgomery & Price (1979).

Para el análisis temporal 1 se utilizan los resultados de concentración de cromo obtenidos de las muestras colectadas en junio de 2004 y 2007. Se observa que la concentración de cromo determinada para las muestras colectadas en junio de 2004 es mayor a la reportada para las muestras colectadas en el mismo mes de 2007. Hay una diferencia importante en los niveles de cromo de más de 1ppm. La

concentración promedio de cromo en este análisis temporal muestra una disminución en el transcurso de tres años.



Gráfica 2. Análisis temporal de Holbox

En cuanto a las precipitaciones, éstas se presentaron con niveles por debajo de la media anual (90-100 mm). No obstante las lluvias fueron más abundantes en el trimestre previo a la colecta de junio de 2004 que en el mismo periodo de 2007. La diferencia entre las precipitaciones de 2004 y 2007 es de 13 mm. Esto puede explicar la disminución de los niveles de cromo en el 2007.

Para el análisis temporal 2 se comparan las colectas realizadas en el mes de octubre de los años 2004 y 2005. La concentración de cromo determinada en las hojas colectadas en 2005 es ligeramente mayor a la reportada para las muestras colectadas en 2004. La diferencia entre los niveles de cromo de ambas colectas es de 0.26 ppm, por lo que se puede decir que se mantuvo prácticamente igual en estos dos años.

Los niveles de precipitación son ligeramente mayores en el trimestre previo a la colecta realizada en 2004 que en la misma época de 2005. Durante el mes de septiembre de ese año el incremento en los niveles de precipitación está relacionado con la presencia del Huracán Ivan. La diferencia entre ambos periodos de lluvias es de 5 mm. De acuerdo a lo anterior, los niveles de precipitación no presentaron diferencias considerables, lo que explica el parecido de los niveles de cromo de las muestras colectadas en las dos fechas.

El análisis temporal 3 se realiza con las colectas realizadas en el periodo de enero-febrero de 2005, 2006 y 2007. La concentración de cromo presenta una tendencia de incremento anual siendo la más baja la reportada para el 2005. Las muestras colectadas en 2006 presentan un incremento de casi 4 ppm en la concentración, mientras que el aumento para el 2007 es de más de 10 ppm. Cabe resaltar que la concentración de cromo determinada para las muestras de 2007 presenta los niveles máximos históricos.

En cuanto a las precipitaciones, en los tres meses previos a la colecta de 2005 se presentan niveles de lluvia por debajo de la media anual y acorde con la época de lluvias. Para el mismo periodo de 2006 se presentaron niveles de precipitación máximos. Esto se debe al impacto del Huracán Wilma, ocurrido en octubre de 2005. Finalmente los niveles de precipitación relacionados con las muestras de la colecta de 2007 tienen niveles superiores a la media anual, pero menores a los reportados en 2006.

En general en este periodo se presenta un aumento en la concentración de cromo con respecto a las colectas anteriores. También hay situaciones particulares en

cuanto los niveles de precipitación. A diferencia de los análisis temporales anteriores, no se observa una relación estrecha entre las lluvias y la concentración de cromo, por lo que será necesario continuar con el estudio para determinar cuál es el efecto de los fenómenos meteorológicos sobre los niveles de cromo en el pasto marino. También se debe precisar si los altos niveles de cromo determinados en 2007 se presentaron como una situación particular o hay un aporte regular de contaminantes con cromo hacia la laguna.

Es importante señalar que las muestras colectadas en el periodo de enero-febrero de 2007 tienen una concentración más de tres veces mayor a la reportada en un área altamente contaminada por este metal (Montgomery & Price, 1979).

A partir de los análisis anteriores se concluye que Holbox es una zona que ya presenta contaminación por cromo, a pesar de tratarse de un Área Natural Protegida donde no hay fuentes naturales del metal.

## ANÁLISIS ANUAL

---

Este análisis tiene como primer objetivo revisar los cambios en los niveles de cromo en Holbox a través del año. El segundo objetivo es conocer la relación entre el promedio de las precipitaciones de los tres meses anteriores a la colecta y las concentraciones de cromo determinadas en el pasto marino.

Este análisis se realiza con los resultados obtenidos de todas las colectas realizadas en Holbox. Para conocer cuál era la situación del lugar en general, se promedia la concentración de cromo determinada en cada uno de los sitios.

En la Tabla 6 se presentan los datos con los que se realiza este análisis anual. En las primeras dos columnas se indica la fecha de la colecta, en la tercera la cantidad de sitios en los que se recolectaron las muestras y en la última se muestra el promedio de concentración de cromo.

Año	Mes de colecta	Cantidad de sitios en los que se recolectó muestra	Promedio de concentración de cromo (ppm)
			Hojas
2004	Junio	3	1.83
	Octubre	2	5.00
2005	Enero-Febrero	8	0.52
	Mayo	8	1.71
	Octubre	7	3.17
2006	Enero- Febrero	4	3.06
	Agosto	2	N.D.*
2007	Enero- Febrero	8	12.30
	Junio	4	0.65

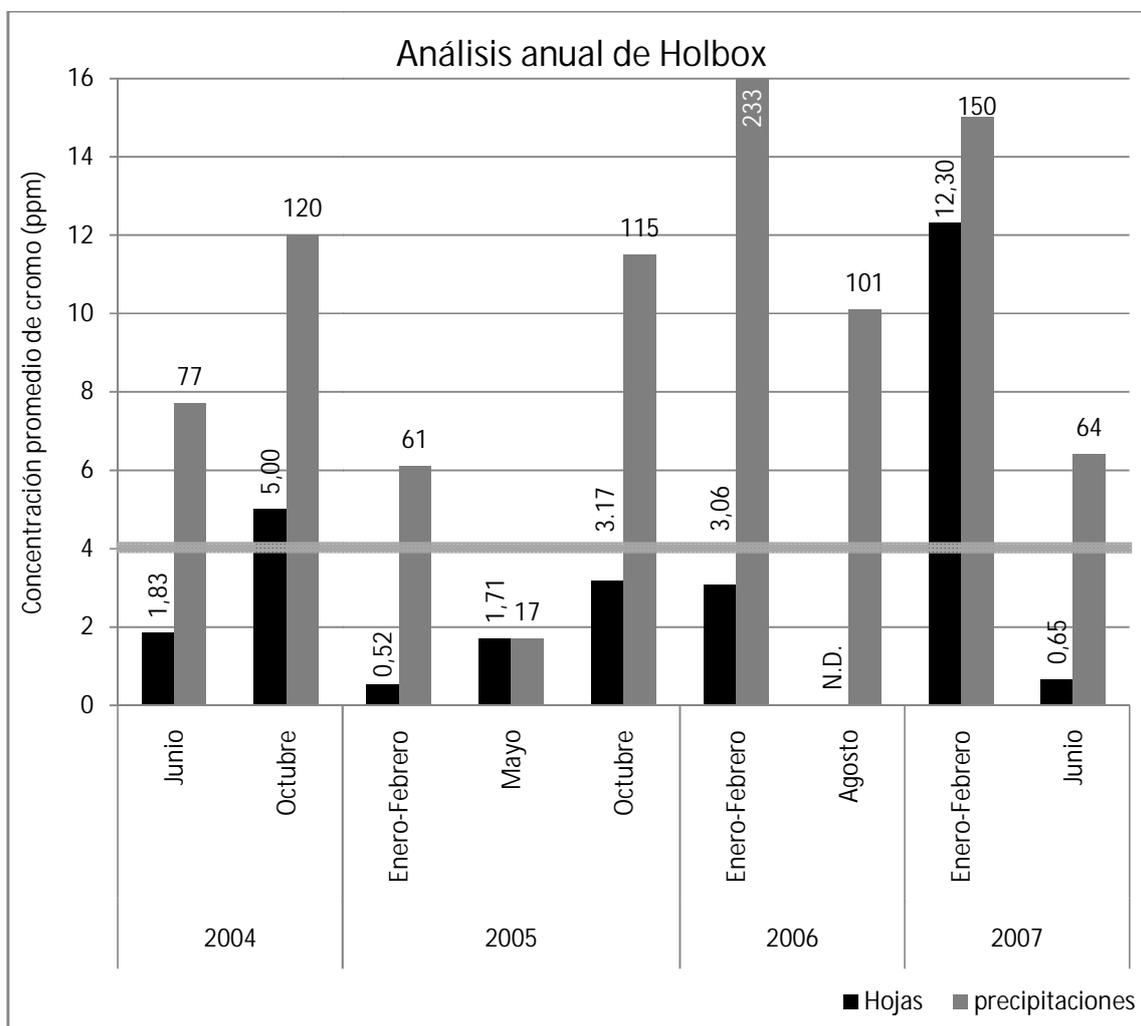
Tabla 6. Datos con los que se elabora el análisis anual de Holbox

\*No detectado, Aproximadamente el límite de detección para cromo es para el método de atomización flama aire acetileno 0.005ppm y para horno de grafito 0.0005ppm

Con los datos de la Tabla 6 se elabora la Gráfica 3, con la cual se realiza el análisis anual para Holbox.

En la Gráfica 3 la concentración de cromo en hojas se ilustra con las barras negras y a su lado derecho se muestra una barra gris que indica la precipitación promedio durante los tres meses anteriores a fecha de la colecta. Finalmente se marca una línea sombreada para indicar el nivel de referencia reportado para una zona con alta influencia antropogénica.

Obsérvese en la gráfica que durante el **2004** los niveles de cromo presentan un incremento a través del año. En el mes de octubre la concentración es mayor que en junio, con una diferencia de más de 3 ppm. La cantidad de lluvia durante la etapa de crecimiento de estas muestras presentan la misma tendencia, por lo que se puede decir que las precipitaciones afectaron la concentración de cromo en las hojas.



**Gráfica 3. Análisis anual de Holbox**

Durante el 2005 los niveles de precipitación fueron menores que en 2004, lo que explica la disminución en los valores de concentración de cromo en este año con respecto al 2004. La cantidad de Cr, al igual que en el análisis anterior, aumenta a lo largo del año. La concentración en las muestras colectadas en mayo, el mes de mayor sequía, es mayor que las del periodo de enero-febrero, que a su vez presentó mayores niveles de precipitación. Si la falta de lluvias aminora el transporte de cromo, entonces este incremento a pesar de tener menos lluvias, se explicaría diciendo que hubo un mayor aporte antropogénico del metal en Holbox.

Las muestras colectadas en octubre tienen la concentración de cromo más alta del 2005. Las lluvias que se presentaron durante el periodo de crecimiento del pasto colectado en este mes tuvieron niveles por arriba de la media anual de precipitación. El aumento de las lluvias podría explicar el incremento en las concentraciones de Cr.

Para las colectas realizadas en **2006** se observa hay una disminución a través del año en la concentración de cromo. La concentración de Cr y la cantidad de precipitación presentan la misma tendencia para este año. Es importante señalar que en octubre de 2005, tres meses antes de la primer colecta de 2006, el huracán Wilma impacto directamente en Quintana Roo. Al revisar la Gráfica 1 se observa que en octubre de 2005 se presentan los niveles de precipitación más altos, por lo que se puede sugerir que el transporte de cromo fue considerable durante el paso del Huracán.

Las muestras colectadas en agosto de 2006 no presentan concentraciones de cromo detectables. Esto se explica con la presencia del Huracán en octubre. La cantidad de cromo transportada por las intensas lluvias provocadas por el Huracán fue abundante y absorbida por las hojas que crecieron en el trimestre siguiente al fenómeno meteorológico (enero-febrero 2006). Al llegar la temporada de lluvias, que se ve reflejada en las muestras colectadas durante agosto, no había cromo que transportar por las lluvias o que absorber por parte de la planta.

La concentración de cromo y las precipitaciones reportadas para las muestras colectadas en **2007** presentaron una disminución en los niveles a través del año. Se determinaron valores máximos en las concentraciones de cromo en las muestras colectadas en el periodo de enero-febrero de 2007. Durante los tres meses previos a la colecta, el último trimestre de 2006, se registraron niveles de precipitación superiores a la media anual. Probablemente los hechos que favorecen que la concentración de cromo presente el valor máximo histórico no sólo sean las abundantes lluvias, sino que también influye la contaminación debida a las actividades antropogénicas.

Para junio de 2007 los niveles de cromo disminuyen y uno de los factores que podría explicar esto es la disminución en las precipitaciones. También podría ser un efecto de los altos niveles de cromo que anteceden este muestreo, es decir, en el muestreo de enero-febrero la captación del metal por el pasto alcanzó niveles máximos y disminuyó la presencia del metal en el lugar, por lo que en la colecta siguiente, la realizada en junio, los valores reportados son del cromo restante en la Laguna, que aparentemente son bajos.

En cuanto al grado de influencia antropogénica hay una tendencia a que los niveles de cromo más altos o cercanos a los reportados para una zona contaminada, también presentan altos niveles de precipitación. También hay cierta tendencia en el caso contrario, cuando las precipitaciones se presentan por debajo de la media anual la concentración de cromo es menor a 4 ppm. Es alarmante que las muestras colectadas durante el periodo de enero-febrero de 2007 tengan una concentración de cromo tres veces mayor que la reportada para un área con alta influencia antropogénica.

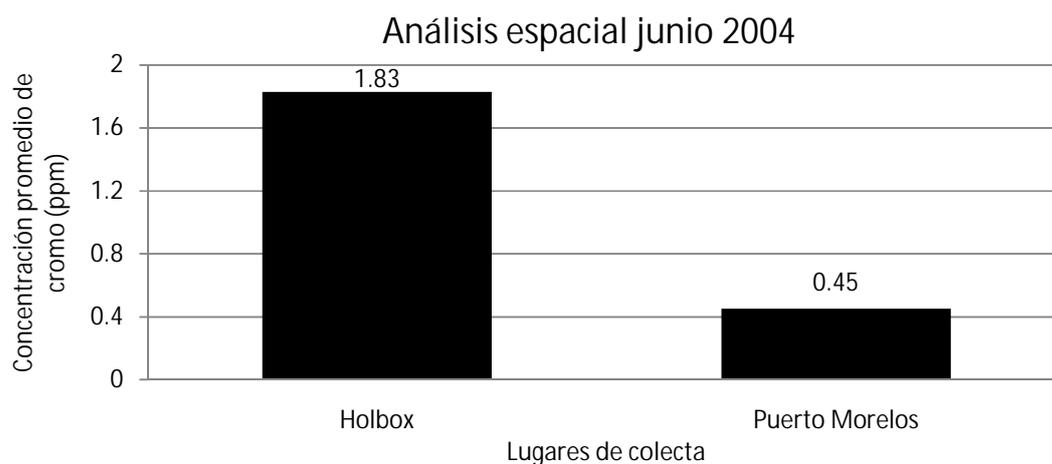
Para concluir este análisis se puede decir que hay una tendencia dividida sobre la tasa de cambio de los niveles de cromo en el año. Para los años de 2004 y 2005 hay un aumento a través del tiempo, mientras que en 2006 y 2007 la concentración de cromo disminuye en el año. Cabe destacar que cada año hay una colecta que tiene una concentración de cromo similar o muy superior a la reportada para un área severamente contaminada por cromo ( $\approx 4$  ppm) (Montgomery & Price 1979).

## ANÁLISIS ESPACIAL

---

El objetivo de este análisis es definir en cuál de los lugares seleccionados en este estudio ubicados al noreste del Estado se presenta el nivel más alto de cromo. Se revisarán las concentraciones de cromo de los tejidos de pasto marino colectado en diferentes lugares, durante el mismo mes y año.

En la Figura 9 se reportan los datos con los que se realiza el análisis espacial de las colectas realizadas en junio de 2004. En la tabla inferior se indica el número de sitios de los que se tomó muestra. La concentración determinada en cada muestra se utiliza para obtener el promedio de concentración de cromo. En la Gráfica se indican a través de las barras negras la concentración promedio de cromo determinada en las hojas provenientes de Holbox y Puerto Morelos.



Año	Mes de colecta	Nombre del lugar	Cantidad de sitios en los que se recolectó muestra	Promedio de concentración de cromo (ppm)
				Hojas
2004	Junio	Holbox	3	1.83
		Puerto Morelos	2	0.45

Figura 9. Datos con los que se realiza el análisis espacial de junio de 2004

Como se puede observar tanto en la gráfica como en la tabla, las hojas colectadas en Holbox tienen una concentración de cromo mayor a las colectadas en Puerto Morelos. La concentración reportada en Holbox es más de 1 ppm mayor a la reportada para Puerto Morelos. Las condiciones meteorológicas en ambos sitios son similares por lo que las diferencias en los niveles de cromo no están relacionadas con este factor. Los niveles de cromo podrían tener como fuente

actividades antropogénicas y como factor para su distribución algún aspecto geográfico.

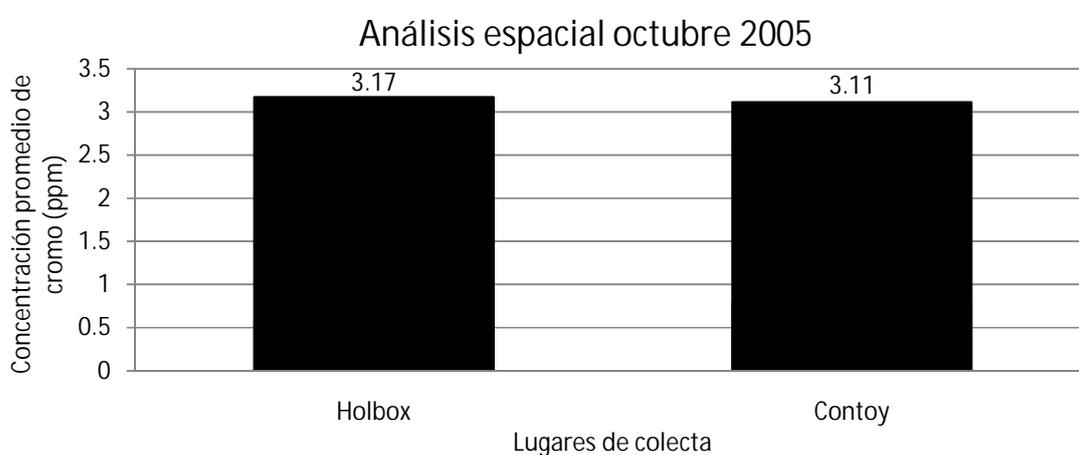
En Holbox la concentración mayor de cromo en hojas podría estar relacionada con un aporte directo de contaminantes con cromo sobre la laguna. También hay una diferencia de población importante entre ambos lugares, ya que en Puerto Morelos hay poco más de mil habitantes mientras que en las poblaciones aledañas a la laguna se suman más de dos mil habitantes. Esto también podría repercutir en la cantidad de residuos generados en cada localidad.

La situación geográfica también es muy diferente. La Laguna Yalahau tiene más de 30 km de longitud y 10 km de ancho. Esta separada del mar por la isla de Holbox, que tiene una extensión de 40 km y 2 km de ancho. En cuanto a los sitios de toma de muestra de Puerto Morelos están ubicados frente a la playa en mar abierto. A una distancia de 500 m mar adentro frente a la costa se encuentra la barrera de arrecife. De lo anterior se puede decir que la presencia de contaminantes en la Laguna Yalahau se queda en la laguna donde hay pocas corrientes, mientras que en Puerto Morelos los desechos se vierten en mar abierto donde las corrientes pueden dispersar la contaminación con cromo en el lugar

Holbox es el lugar más contaminado con cromo en junio de 2004. A pesar de esto tanto, Holbox como Puerto Morelos son sitios que presentan niveles de cromo menores a los de un área con influencia antropogénica.

En la Figura 10 se reportan los datos con los que se realiza el análisis espacial de las colectas realizadas en octubre de 2005. En la figura se encuentran una gráfica y una tabla en la que se indica la fecha, la cantidad de sitios de los que se tomó muestra. Con la concentración de cromo determinada en cada muestra se obtuvo el promedio de concentración de cromo para todo el lugar. En la gráfica se muestran en la parte inferior los sitios de colecta (Holbox y Contoy). La concentración de cromo se muestra a través de las barras negras y su valor se escribe en la parte superior de la barra. Se observa claramente que Holbox y Contoy presentan la misma concentración de cromo. Durante estas colectas las

condiciones meteorológicas fueron similares en los dos sitios. Cabe destacar que ambos lugares son destinos turísticos con un manejo muy diferente. En la isla Contoy el acceso diario es de 200 turistas máximo y como habitantes permanentes sólo hay una pequeña aldea de pescadores (50 habitantes). Isla Contoy se encuentra próxima a la zona donde convergen corrientes provenientes del Mar Caribe y el Golfo de México (INE, 1994). De acuerdo con lo anterior es probable que la gran cantidad de corrientes que confluyen en este sitio no sólo aumenten la cantidad de nutrientes sino que arrastre una cierta cantidad de contaminantes provenientes de otras partes del Estado



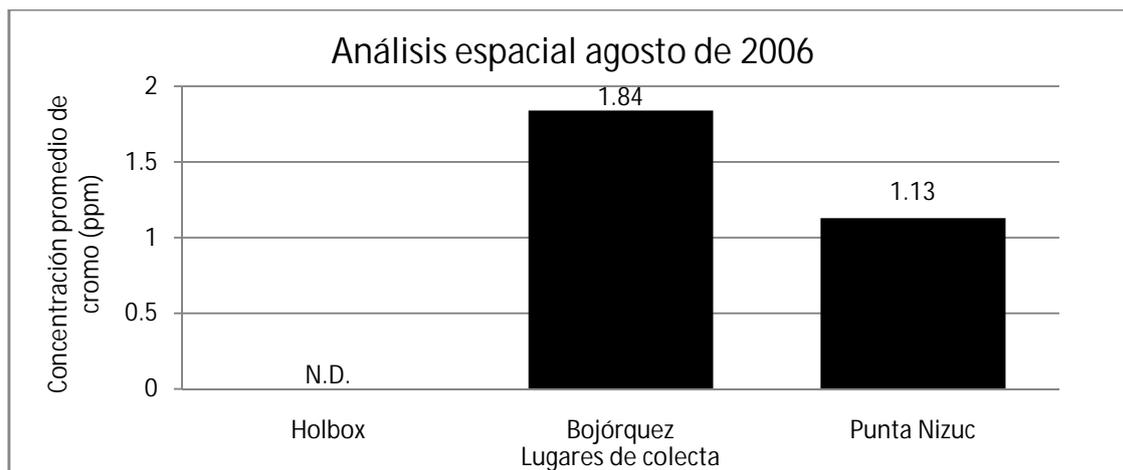
Año	Mes de colecta	Nombre del lugar	Cantidad de sitios en los que se recolectó muestra	Promedio de concentración de cromo (ppm)
				Hojas
2005	Octubre	Holbox	7	3.17
		Contoy	3	3.11

Figura 10. Datos con los que se realiza el análisis espacial de octubre de 2005

El caso contrario es Holbox que es una isla que no limita el número de visitantes y durante todo el día viajan por su laguna embarcaciones que llevan pobladores y turistas. También se ha calculado que toda la superficie del Área Natural Protegida de Yum Balam, en donde se encuentra la isla, residen de manera permanente unas 10 000 personas (INE, 1994). Tanto Holbox como la Isla Contoy presentan

condiciones ambientales similares en cuanto a la contaminación por cromo. También el grado de influencia es el mismo y en los dos lugares el cromo presente se encuentra en cantidades ligeramente menores a las reportadas para una zona contaminada.

En la Figura 11 se presentan el análisis espacial de agosto de 2006.



Año	Mes de colecta	Nombre del lugar	Cantidad de sitios en los que se recolectó muestra	Promedio de concentración de cromo (ppm)
				Hojas
2006	Agosto	Holbox	2	N.D
		Bojorquez	2	1.84
		Punta Nizuc	3	1.13

Figura 11. Datos con los que se realiza el análisis espacial de agosto de 2006

Se muestra una gráfica y una tabla para indicar los lugares en los que se realizó la colecta, la cantidad de sitios en los que se recolectó muestra y la concentración promedio de cromo en cada sitio. En la gráfica se observa que los lugares de colecta fueron la Holbox, la laguna Bojórquez y Punta Nizuc.

En la Figura 11 se observa que el sitio que tiene la mayor concentración de cromo es la laguna Bojórquez y con un valor ligeramente menor le sigue Punta Nizuc. En Holbox no hay niveles de cromo detectables en las muestras de esta colecta.

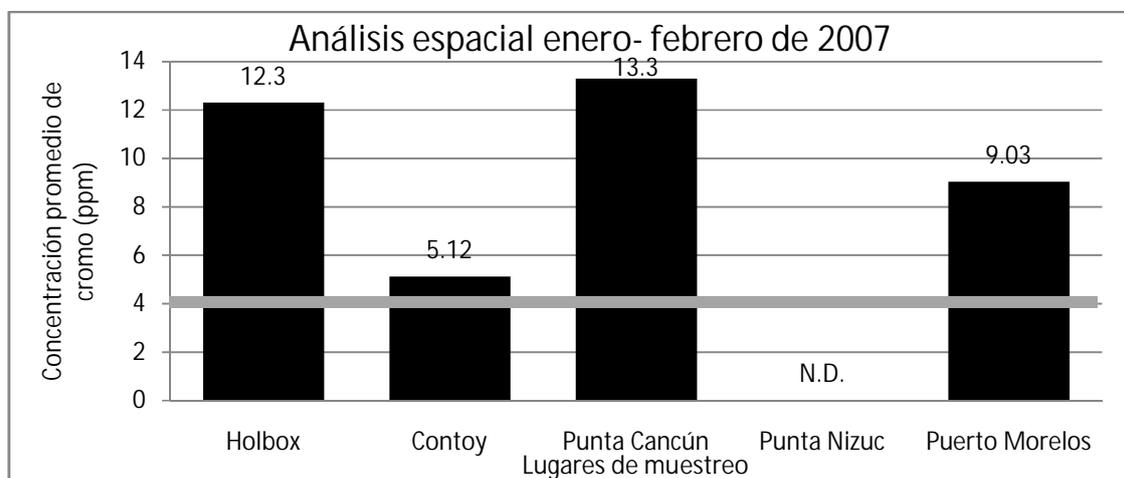
Dado que las concentraciones de cromo en estos lugares están influenciadas por las mismas condiciones meteorológicas, a continuación se revisa su situación geográfica. Las muestras que presentan los valores más altos de concentración por cromo son las colectadas en las cercanías de la ciudad y la zona hotelera de Cancún. Particularmente Bojórquez es una pequeña laguna que se encuentra rodeada por un Campo de Golf y parte de la zona Hotelera que se sitúa a menos de cuatro kilómetros del corazón de la ciudad de Cancún. En tanto Punta Nizuc es una playa ubicada al sur de la ciudad y a menos de 10 km de la misma. La distribución de los contaminantes podría estar relacionada con la situación geográfica del lugar. Así, Bojórquez es una laguna donde los desechos con cromo se distribuyen y permanecen en la laguna, mientras que en Punta Nizuc los desechos pueden ser arrastrados a mar abierto.

En la Figura 12 se muestra el análisis espacial para la primera colecta realizada en enero- febrero de 2007. En la figura se muestran los resultados de las colectas realizadas en Holbox, Contoy, Punta Cancún, Punta Nizuc y Puerto Morelos. En la tabla se indica la cantidad de sitios en los que se recolectó muestra y finalmente se reporta la concentración promedio de cromo de las muestras colectadas en cada lugar.

Las muestras colectadas en esta fecha muestran los niveles de cromo más altos de todos los que se reportan en este trabajo. El lugar que presenta la concentración de cromo más alta en esta fecha es Punta Cancún, que a su vez es el sitio más cercano a la ciudad de Cancún. Punta Nizuc es una playa ubicada al sur de la ciudad que no presenta niveles de cromo detectables.

En Holbox también se determinó una concentración elevada de cromo, mayor a la reportada en Puerto Morelos. Recordemos que este puerto se encuentra a más de 30 Km de la ciudad de Cancún, por lo que no se considera cercano a la Zona

Hotelera ni a la ciudad. Por último en Contoy nuevamente se encuentra un alta concentración del metal, a pesar de ser un área donde el turismo está controlado.



Año	Mes de colecta	Nombre del lugar	Cantidad de sitios en los que se recolectó muestra	Promedio de concentración de cromo (ppm)
				Hojas
2007	Enero-Febrero	Holbox	8	12.30
		Contoy	2	5.12
		Punta Cancún	1	13.30
		Punta Nizuc	2	N.D.
		Puerto Morelos	3	9.03

Figura 12. Datos con los que se realiza el análisis espacial de las muestras colectadas en el periodo de enero-febrero de 2007

La influencia antropogénica para la mayoría de los sitios se presenta con la misma tendencia. Al ser concentraciones superiores a las 4 ppm se considera que estos lugares ya presentan niveles semejantes a los determinados en áreas con altos niveles de contaminación con cromo.

Como conclusión de este análisis, se puede decir que el lugar más contaminado de los que se muestran en este estudio del estado de Quintana Roo es Punta Cancún (la playa más cercana a la ciudad de Cancún) en este periodo.

Es importante mencionar que otro lugar donde la contaminación por cromo ha alcanzado niveles similares a los reportados para Punta Cancún es Holbox. Las muestras colectadas en la laguna aledaña a esta isla muestran valores de concentración de cromo ligeramente menores a los de Punta Cancún. El sitio menos contaminado es Punta Nizuc, una pequeña playa que hasta 2008 era pública y de dimensiones considerables.

## ANÁLISIS LOCAL

---

### **¿Dónde se produce la contaminación en Holbox?**

En este análisis se comparan las concentraciones de cromo presentes en todos los sitios de un lugar, en todas las colectas allí realizadas. Se realizará únicamente para los sitios de Holbox, ya que es en este lugar donde se cuenta con la mayor cantidad de sitios de muestra.

Los sitios de colecta se presentan en la Figura 13. En la isla no hay fuentes naturales de cromo por lo que en el mapa se indican dos posibles fuentes de cromo en la localidad: el basurero y el río subterráneo.

En el basurero de la localidad de Holbox, los desechos no tienen ningún tratamiento y están expuestos directamente al ambiente. El sitio dos (Figura 13) se encuentra cerca del basurero y parece ser la causa en el incremento de la concentración de metales pesados de las muestras que se colectan en este sitio. (Martínez, 2007)(Nohpal, 2007)(Lavoisier, 2006)(Rosas, 2006)(Valdespino, 2005)(Ruiz, 2005).

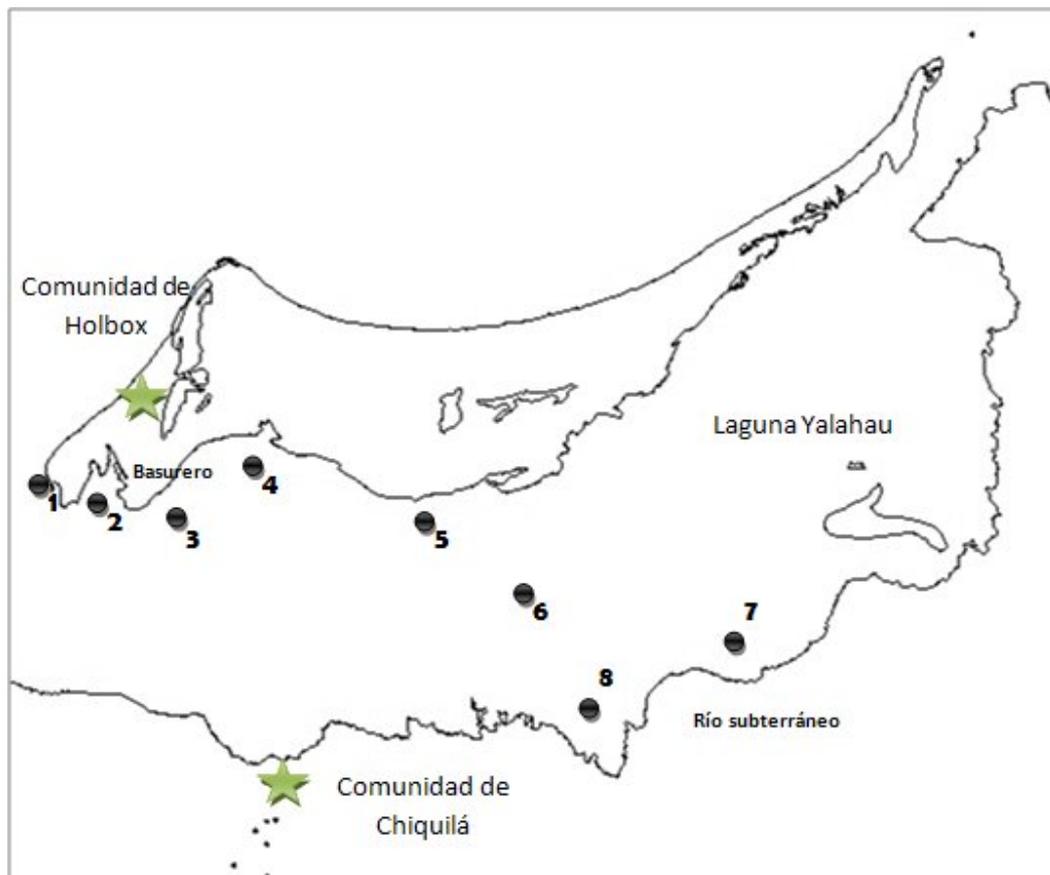
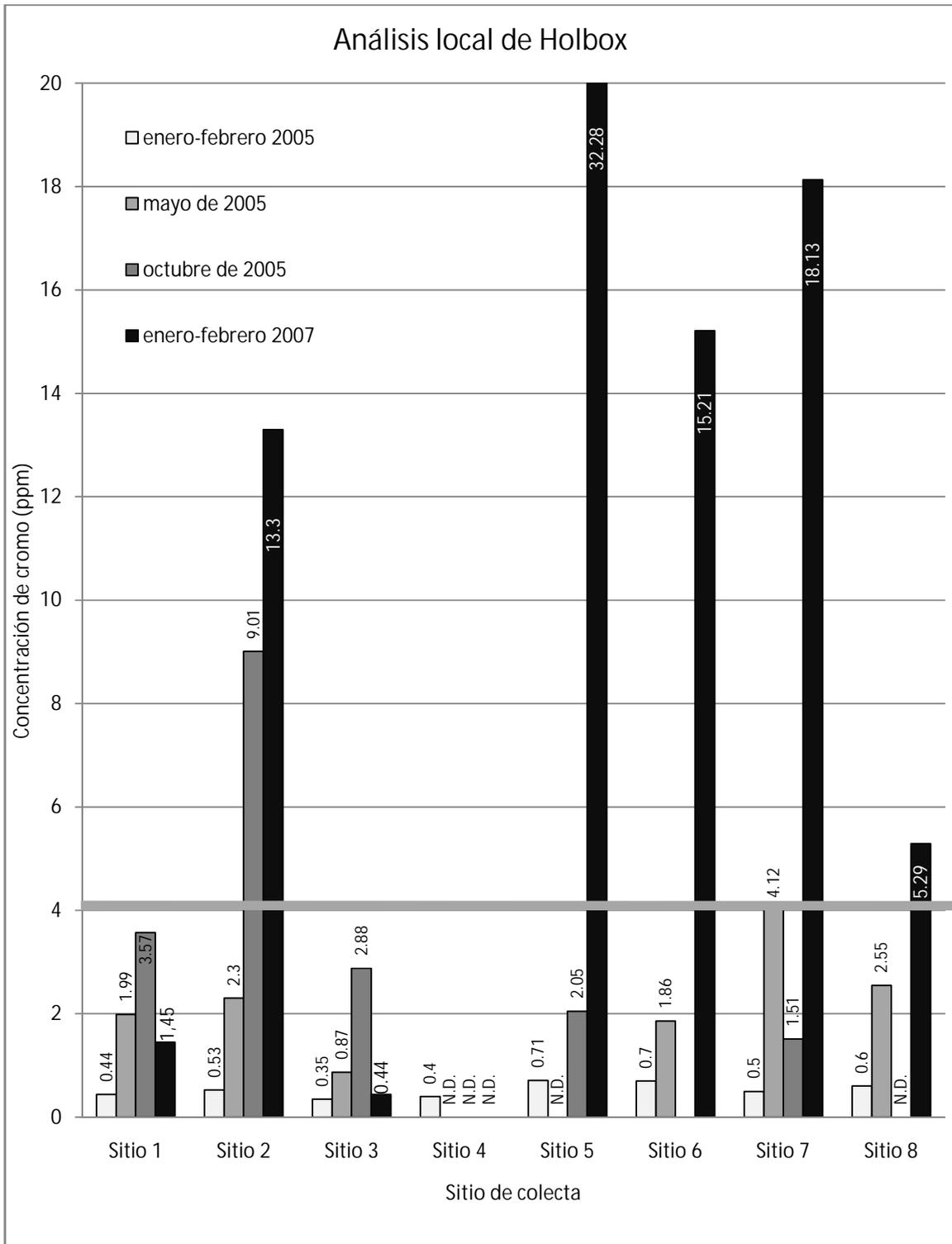


Figura 13. Ubicación de los sitios de colecta en la laguna Yalahau y las dos comunidades aledañas a la laguna

En general se conoce poco sobre la hidrogeología al noreste de Quintana Roo. Recientemente se ha determinado que en la Zona de Fracturas de Holbox se transportan grandes volúmenes de agua subterránea que finalmente son descargados en la Laguna Yalahau (Holliday, *et al.* 2007). En particular, los sitios 7 y 8 (Figura 13) son los más cercanos al río subterráneo. En trabajos previos se ha propuesto que este río subterráneo acarrea contaminantes que aumentan la concentración de metales pesados en las muestras colectadas en el sitio 7. (Rosas, 2006) (Martínez, 2007). La Zona de Fracturas de Holbox se extiende 100 km y es posible que a través de sus cauces subterráneos transporte contaminantes con cromo que desemboquen finalmente en la laguna.

En la Gráfica 4 se presenta el análisis local de Holbox. En la gráfica se muestran



Gráfica 4. Análisis local de Holbox

barras que indican las concentraciones de cromo de las colectas en las que la mayoría de los sitios han sido reportados (colectas más amplias). Las barras se

muestran en una escala de grises y en orden cronológico de acuerdo al año en que se realizó la colecta. En la parte inferior de la gráfica se indica el sitio en el que se tomó la muestra. Las colectas que se analizan son las de enero-febrero, mayo y octubre de 2005 y la del periodo de enero-febrero de 2007.

El **sitio 1** no presenta concentraciones superiores a 4 ppm. En octubre de 2005 la concentración de cromo para este sitio fue máxima e igual a 3.57 ppm. Al parecer la concentración de cromo en las muestras de este sitio está influenciada por el basurero. Recordemos que las muestras colectadas en el mes de octubre indican lo ocurrido en la temporada de lluvias, por lo que la mayor influencia del basurero sobre este sitio es durante la época de lluvias. Los valores más pequeños en la concentración de cromo se encuentran en las colectas de enero-febrero de 2005 y 2007. Las colectas realizadas en estas fechas reflejan lo ocurrido al inicio de la secas. Dado que el transporte de cromo está relacionado con las lluvias es posible que las sequía explique la disminución en los niveles del metal en esta época.

Para el **sitio 2** la concentración de cromo se ha incrementado de manera importante. Los altos niveles de contaminación por cromo se han presentado de manera regular en este sitio. En el periodo de enero-febrero alcanza niveles máximos con 13.3 ppm. En octubre de 2005 ya había presentado niveles de cromo muy superiores a los de un área severamente contaminada. El incremento en los niveles de cromo está relacionado con la presencia del basurero. La situación de contaminación en la que se encuentra este lugar ya es importante.

El **sitio 3** presenta una tendencia similar al sitio 1. Parece estar afectado por el basurero, aunque en menor grado. La concentración de cromo aumenta principalmente en época de lluvias. Todas las colectas de este sitio muestran que los niveles de cromo son inferiores a 4 ppm. En octubre de 2005 se presenta la mayor concentración del metal en este sitio con 2.88 ppm.

El sitio para el que se reportan los menores niveles de cromo es el **sitio 4**. En este punto de colecta prácticamente no se ha detectado la presencia de cromo.

La concentración de cromo en las muestras colectadas en el **sitio 5** muestran una tendencia de incremento. El nivel máximo de cromo reportado durante todo este estudio está reportado para este sitio. Se trata de la muestra colectada en el periodo de enero-febrero de 2007, la cual presentó una concentración de 32.28 ppm de cromo en sus hojas. Esta concentración es ocho veces mayor que la reportada para un área con alta influencia antropogénica. Es difícil decir que este sitio este influenciado por el basurero, por lo que la explicación del alto nivel de contaminación es el aporte directo de desechos con cromo al sitio.

El **sitio 6** también presenta el valor más alto de concentración de cromo en las muestras colectadas en el periodo de enero-febrero de 2007. La concentración de cromo en este sitio presenta una tendencia a aumentar.

El río subterráneo se encuentra cercano al **sitio 7** y parece que su influencia no depende de la presencia de lluvias. Es probable que el río traiga contaminantes con cromo y estos desemboquen finalmente en la laguna. El valor más alto de cromo para este sitio se reporta en las muestras colectadas en el periodo de enero-febrero de 2007. La concentración de cromo refleja que es una zona severamente contaminada por el metal (Montgomery & Price, 1979).

Por último en el **sitio 8** parece haber una influencia del sitio 7. La fluctuación en los niveles de cromo en este sitio es similar a la que presenta el sitio 7, aunque en menor escala. La concentración máxima reportada para este sitio es de 5.29 ppm y es similar al reportado para una zona con alto grado de influencia antropogénica.

Como conclusión de este análisis se puede decir que los sitios más contaminados en la laguna Yalahau son el 2, el 5, el 6, el 7 y el 8. Parece que en el caso de cromo también son fuentes de contaminación el basurero y los contaminantes acarreados por el río subterráneo. Durante el periodo de enero-febrero de 2007 se presentan los niveles más altos de contaminación en la laguna. Es necesario revisar los programas de manejo de esta Área Natural Protegida ya que presenta niveles de contaminación superiores a los de un área donde la contaminación por cromo es debida a la actividad industrial.

## CONCLUSIONES

---

Para concluir el diagnóstico sobre la contaminación con cromo en determinadas Áreas Naturales Protegidas del estado de Quintana Roo utilizando *Thalassia testudinum* como bioindicador es importante mencionar lo siguiente:

- La dispersión de los contaminantes con cromo puede verse favorecida por el tipo de suelo que predomina en la Península.
- Al comparar los niveles de cromo reportados en este estudio con los reportados previamente en la literatura se concluye que la contaminación con este metal se ha extendido en el estado de Quintana Roo y se ha incrementado hasta alcanzar niveles alarmantes durante el trienio de estudio.
- El transporte de cromo en el estado de Quintana Roo es favorecido por la presencia de las lluvias.
- Los resultados de este estudio muestran que el lugar más contaminado con cromo en el estado de Quintana Roo es Holbox. Los sitios donde se presenta de manera regular más contaminación son los cercanos al basurero y al río subterráneo.
- Las diferencias en los niveles de cromo entre los diferentes lugares de colecta del estado indican que la situación geográfica puede estar relacionada con la distribución de los contaminantes.
- Las muestras colectadas en lagunas presentan una concentración de cromo mayor que las muestras provenientes de los lugares que desembocan en mar abierto.

# ANEXO

## Espectroscopia de absorción atómica

### FUNDAMENTO

La espectroscopia se fundamenta en medir la cantidad de radiación que absorben las especies moleculares o atómicas de interés. Es posible relacionar la energía absorbida con su longitud de onda y frecuencia mediante la ecuación:

$$E = h \nu$$

donde  $h$  es la constante de Planck ( $6.63 \times 10^{-34}$  J s),  $\nu$  es la frecuencia,  $\lambda$  la longitud de onda y finalmente  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s).

En la espectroscopia se emplea la interacción de la radiación con la materia para obtener información sobre las muestras. En un primer paso el analito (es decir, la sustancia que se analiza) se encuentra en su estado de energía más bajo o fundamental. La muestra se estimula con alguna forma de energía lo que provoca que alguna especie del analito experimente una transición a un estado de mayor energía o estado excitado. Se obtiene información del analito al cuantificar la radiación electromagnética que absorbe como resultado de la excitación.

En la espectroscopia de absorción se mide la cantidad de luz absorbida en función de la longitud de onda, lo que proporciona información cuantitativa y cualitativa sobre la muestra. La caracterización se basa en que cada especie molecular puede absorber sus propias frecuencias características de radiación electromagnética. Este proceso transfiere energía a la molécula y disminuye la radiación electromagnética incidente. La absorción de la radiación se atenúa, es

decir se reduce la cantidad de fotones por segundo en el haz. Esta disminución de energía ocurre de acuerdo a la ley de Beer-Lambert.

Cuando la luz atraviesa un medio que tiene un analito absorbente, disminuye su intensidad como consecuencia de la excitación del analito. Cuanto mayor sea la concentración de los átomos o moléculas absorbentes tanto mayor será la atenuación debido a la interacción de los fotones con las partículas absorbentes. La reducción del haz va de una fuerza radiante inicial a una final cuya fracción se expresa como transmitancia. La absorbancia de una solución es una expresión logarítmica de la transmitancia por lo que en los instrumentos de medición actuales es posible determinarlas indistintamente.

Según la ley de Beer, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de la especie absorbente y la longitud de trayecto del medio de absorción.

$$=$$

Donde la constante de proporcionalidad se llama absortividad. Cuando se expresa la concentración como moles por litro, y en centímetros, la constante de proporcionalidad se llama absortividad molar y se denomina con el símbolo  $\epsilon$  ( $\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ). Entonces la expresión anterior se escribe como:

$$=$$

La espectroscopia de absorción atómica consiste en el paso de un haz de radiación ultravioleta o visible policromática a través de un medio que contiene átomos gaseosos, lo que resulta en la atenuación de algunas frecuencias debido a la absorción. En esta metodología sólo se mide la absorción atómica de una sola longitud de onda con una fuente monocromática.

## PROCESO

La espectroscopia de absorción atómica se usa en la detección de más de 70 elementos y es habitual que permita determinar cantidades en partes por millón o partes por billón en las muestras. El uso de esta técnica es rápido, conveniente y generalmente de alta selectividad.

En esta técnica las especies atómicas se encuentran en medio gaseoso donde los átomos o iones están muy separados entre sí. El paso más importante en todo procedimiento de espectroscopia atómica de absorción es la atomización (ver figura I), proceso en el cual la muestra se volatiliza y descompone de manera que se encuentre como átomos.

En particular durante este proyecto se utilizaron dos tipos de procesos para atomizar la muestra; el de flama de aire- acetileno y el de horno de grafito.

Un atomizador de flama consta de un nebulizador neumático, que convierte la solución de una muestra en una niebla o aerosol que posteriormente se conduce hasta un mechero. La muestra nebulizada se transporta a la llama en la cual finalmente se vaporizan y convierten en átomos gaseosos o iones elementales. (Limite de detección 0.01ppm).

En el caso del horno de grafito el atomizador es electrotérmico. En este proceso la muestra se introduce en un horno calentado eléctricamente. El volumen en el horno es limitado por lo que no se diluye tanto como la muestra que es tratada por flama. Por esto es útil cuando se cuenta con poca cantidad de muestra. El proceso requiere de una serie de pasos en el calentamiento que son deshidratación (secado), mineralización (calcinación de la materia orgánica) y atomización. (Limite de detección 0.00002ppm)



Figura I. Pasos de la muestra en la espectroscopia de absorción atómica

La fuente de radiación en la espectroscopia de absorción atómica es la lámpara denominada de cátodo hueco, que emite radiación a la misma longitud de onda que la que absorben los átomos del analito que se va a analizar.

En la medición de absorción atómica es necesario discriminar entre la radiación que proviene de la lámpara de cátodo hueco y la que se origina en el atomizador para lo cual se utiliza el monocromador.

El detector recibe la señal y la convierte en corriente eléctrica, para finalmente transferirla a un dispositivo electrónico donde se produce una señal que puede ser leída.

### Tratamiento de laboratorio

---

Las muestras secas fueron entregadas para su análisis en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) Laboratorio de Espectroscopia de Absorción Atómica a cargo de M en C. Araceli Tovar. Este laboratorio se encuentra certificado por las normas ISO 9001:2000 COPANT, ISO 9001-2000 y la NMX – CC– 900–IMNC–2000.

La metodología para determinar cromo en las muestras fue la siguiente:

#### Material

Todo el material empleado se lava en solución jabonosa y se enjuaga con agua corriente. A continuación se enjuaga por segunda vez con agua destilada y se deja secar. Posteriormente se coloca en ácido nítrico al 30% para oxidar cualquier residuo. Al terminar este proceso se enjuaga nuevamente con agua destilada para eliminar el exceso de ácido. El proceso concluye con un último enjuague con agua desionizada para eliminar sales.

#### Procedimiento

El tratamiento de laboratorio consiste primero en realizar una digestión ácida. En primera instancia las hojas y raíces secas fueron fragmentadas. Dependiendo de la cantidad de muestra se obtienen tres fracciones de 250 mg aproximadamente.

Las pesadas se realizan directamente en los vasos digestores. Se adicionan 2.5 ml de HNO<sub>3</sub> 1:1 y se comienza a calentar hasta que alcanza 70°C se mantienen a esa temperatura por 1 hora. Al concluir el procedimiento anterior se deja enfriar a temperatura ambiente. A continuación se agrega 1 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado y se calienta nuevamente hasta 65°C por dos horas. Durante este último proceso se verifica que la conclusión del calentamiento sea hasta que no se presente desprendimiento de gases (se observa una coloración marrón en la trampa del digestor). Se deja enfriar a temperatura ambiente. Finalmente se adicionan 5 gotas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 20%. En el proceso anterior se cuida que la temperatura sea menor a los 50°C para evitar proyecciones. La disolución obtenida es trasvasada a envases de polipropileno con tapa y etiquetada para su identificación. Cabe destacar que los blancos y los estándares también se tratan de la misma manera que las muestras.

#### Cuantificación de cromo

La técnica analítica empleada para cuantificar el cromo presente en las muestras de pastos marinos fue la Espectrometría de Absorción Atómica. Dependiendo de la cantidad de muestra algunos resultados se obtuvieron con espectrómetro de absorción atómica con horno de grafito o de flama. En las tablas A y B se muestran los parámetros utilizados en cada técnica.

Método de atomización	Horno de Grafito
Longitud de onda (nm)	357.9
Slit (ancho de ventana) (nm)	0.2
Método	Curva de calibración
Equipo empleado	Varian Spectr AA 220, con horno de grafito acoplado

Tabla A. Parámetros instrumentales de la cuantificación de cromo por AA con horno de grafito

Método de atomización	Flama Acetileno-Óxido Nitroso
Longitud de onda (nm)	357.9
Slit (ancho de ventana) (nm)	0.2
Método	Curva de calibración
Equipo empleado	Varian Spectr AA 220 con sistema autodilutor SIPS (Simple Introduction Pump System)

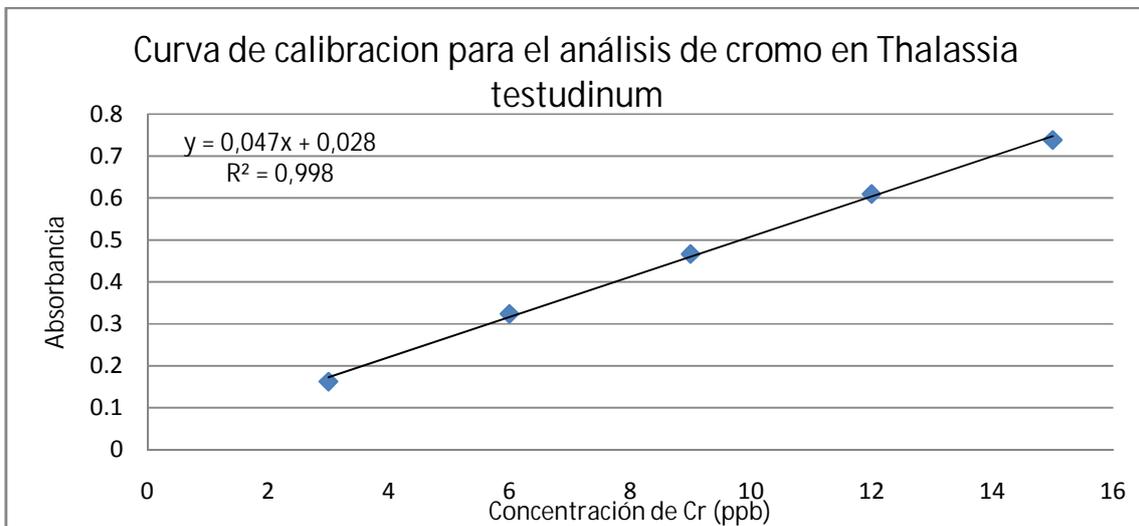
Tabla B. Parámetros instrumentales de la cuantificación de cromo por AA con atomizador de flama

Para la determinación en el equipo se realizaron mediciones de la curva de calibración, blanco y las muestras. Durante el proceso se verificaba la curva mediante el uso del estándar de cromo como Cr+6 de High-Purity Standards (concentración de 998 mg/l  $1000 \pm 3$  mg/l en H<sub>2</sub>O).

En los informes de servicio entregados por la USAI se presentan las curvas de calibración con las cuales se calcula la concentración de cromo en las muestras de pasto marino. A continuación se presenta un ejemplo (Tabla C y Gráfica A):

Concentración de cromo (ppb)	Absorbancia
3	0.1624
6	0.3237
9	0.4663
12	0.6095
15	0.7382

Tabla C. Valores con los que se elabora la curva de calibración



Gráfica A. Curva de calibración con la que se determina la concentración de cromo en *Thalassia testudinum*

Es importante mencionar que para cada análisis es necesario realizar una curva diferente. En el caso de que los valores de absorbancia estuvieran fuera de los límites se detiene el análisis y se construye una nueva curva de calibración. Todas las muestras se analizan por triplicado.

## REFERENCIAS

---

1. Adriano, D.C. *Trace elements in terrestrial environment, biogeochemistry, bioavailability and risk of metals*. Springer. USA (2001)
2. Alvarado-Gaméz, A. Blanco-Sáenz, R. Mora- Morales, E. *El cromo como elemento esencial en los humanos*. Revista Costarricense de Ciencias Medicas SciELO (2002) **23** 1-11
3. Anderson, R. A. *Chromium as an Essential Nutrient for Humans*. Regulatory Toxicology and Pharmacology (1997) **26** S35-S41
4. Armienta, M.A. Rodríguez, R. Cenicerros, N. Juárez, F. Cruz, O. *Distribution, origin and fate of chromium in soils in Guanajuato, Mexico*. Environmental Pollution (1996) **91** 391-397
5. Agency for Toxic Substances & Disease Registry (ATSDR). ToxProfiles Chromium TOXFAQ's disponible en: [[www.asth.gov/toxprofiles/toxfacts7.html](http://www.asth.gov/toxprofiles/toxfacts7.html)] USA (2008)
6. Back, W. Lesser J.M. *Chemical constraints of groundwater management in the Yucatan Peninsula, Mexico*. Journal of Hydrology (1981) **51** 119-130
7. Brown, T. L. LeMay, H. Eugene; B. B. *Química. La ciencia central*. Prentice Hall Hispanoamericana. México (1991)
8. Barcelo, J. Gunse, B. *El impacto del cromo en el medio ambiente. Presencia natural y antropogénica del Cr en el ambiente*. Circular Farmacéutica (1986) **290** 23-38

9. Botello, A.V. Rendon Von Osten, J. Gold-Bouchot, G. Agraz-Hernández, C. *Golfo de México contaminación e impacto ambiental. Diagnóstico y tendencias*. UNAM. México (2005)
10. Caldeira, K. Wickett M. E. *Anthropogenic carbon and ocean pH. The coming centuries may see more ocean acidification than the past 300 million years*. Nature (2003) **425** 365
11. Carruthers, T. J. B. van Tussenbroek, B.I. Dennison W.C. *Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows*. Estuarine Coastal and Shelf Science (2005) **64** 191-199
12. Castellanos Trujillo, L. *El origen marino de las anomalías por cromo en el estado de Chiapas*. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (1982) **9** 45-54
13. Castellanos Trujillo, L. *La costa de cromo en los estados de Tabasco y Campeche, México*. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (1984) **13** 19-25
14. Catsiki, V. A. Panayotidis, P. *Copper, Chromium and Nickel in tissues of the Mediterranean seagrasses *Posidonia oceanica* & *Cymodocea nodosa* (Potamogetonaceae) from Greek coastal areas*. Chemosphere (1993) **26** 963-978.
15. Cervantes, C. Campos-García, J. Devars, S. Gutiérrez- Corona, F. Loza-Tavera, H. Torres- Guzman, J. C. Moreno-Sánchez, R. *Interactions of chromium with microorganism and plants*. FEMS Microbiology Reviews (2001) **25** 335-347

16. Chiou-Jong, C. Tung-Sheng, S. Ho-Yuan, C. Hsin-Su, Y. Jyun-De, W. Shiann-Cherng. Eheng- Eng, W. Tzu- Chieh, C. *The total burden of chromium associated with skin disease and smoking among cement workers* Science of Total Environment (2008) **391** 76-81
17. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Sistema Meteorológico Nacional (SMN) Productos. *Análisis Mensual de Precipitación por Entidad Federativa*. Años 2004, 2005, 2006 y 2007. Estado de Quintana Roo. Disponible en: [<http://smn.cna.gob.mx/>] México (2008)
18. Cruz Onofre, M. J. *Especiación de metales pesados y comportamiento microbiológico ante la presencia de plomo en lodos activados*. Tesis de maestría. FES-Cuautitlán. UNAM. México (2005)
19. Davenport, J. Davenport, J. L. *Impact of tourism and personal leisure transport on coastal environments: A review*. Estuarine Coastal and Shelf Science (2006) **67** 280-292
20. Duffus, J. H. *"Heavy Metals"- a meaningless term?* Pure and Applied Chemistry (2002) **74** 793-807
21. Duffus, J. H. *Glossary for Chemists of Terms Used in Toxicology*. Pure and Applied Chemistry (1993) **85** 2003-2122
22. Environmental Protection Agency (EPA). *Terms of Environment. Glosary, Abrebiations and Acronyms*. Disponible en: [[www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/chromium.html](http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/chromium.html)] USA (2000)
23. Fôster I. D. L. Charlesworth S. M. *Heavy metals in the hydrological cycle: Trends an explanation*. Hydrological Processes (1996) **10** 227-261

24. Frías- Espericueta, M.G. Osuna-López, J.I. Flores- Reyes, S. López-López, G. Izaguirre-Fierro, G. *Heavy metals in the Oyster Cassostrea corteziensis from Urias lagoon, Mazatlán, México, associated with different Anthropogenic discharges.* Bull. Environ. Ciontam. Toxicol. (2005) **74** 996-1002
25. Galindo Rosete C. A. *Histología comparativa de meristemas de vastagos cortos del pasto marino Thalassia testudinum Banks Ex Köing* Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México (2000)
26. Gallegos, M. E. Merino, M. Marbá, N. Duarte, C. M. *Biomass and dynamics of Thalassia testudinum in the Mexican Caribbean: elucidation rhizome growth.* Marine ecology Progress series (1993) **95** 185-192
27. Gasic, K. Korban, S. S. *Heavy metal stress.* Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. Springer. Holanda (2006)
28. Gutiérrez- Aguirre, M. De la Fuente-Betancourt, M. A. Cervantes Martínez, A. *Biomasa y densidad de dos especies de pastos marinos en el sur de Quintana Roo, México.* Revista de Biología Tropical. SciELO (2000) **42** 1-6
29. Hang Thi, N. Ki-Hyun, K. *Chromium concentration levels on the Korean Peninsula between 1991 y 2006.* Atmospheric Environment. (2008) **42.** 5015-5031
30. Hawkes, S. J. *What Is a "Heavy Metal"?* Journal Of Chemical Education (1997) **74** 1374
31. He, Z. L. Yang, X. E. Stoffella, P. J. *Trace elements in agroecosystems and impact in the environment.* Journal of Trace Elements in Medicine and Biology (2005) **19** 125-140

32. Holliday, L. Marin, L. Vaux, H. *Sustainable management of groundwater in México. The role of science in managing Yucatan's groundwater*. The National Academies Press. USA (2007)
33. Hodson, Mark E. *Heavy metals- geochemical bogey men?* Environmental pollution (2004) **129** 341-343
34. Instituto Nacional de Ecología (INE) *Atlas de reservas de la Biosfera y otras áreas naturales protegidas. Isla Contoy*. Disponible en: [<http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/2/contoy.html>] México (1994)
35. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) *Agenda Estadística de los Estados Unidos Mexicanos 2008*. Disponible en: [[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/agenda/2008/Agenda\\_2008.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/agenda/2008/Agenda_2008.pdf)] México (2008)
36. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) *Anuario Estadístico de Quintana Roo 2008. Población. II Censo Nacional de Población y Vivienda 2005*. Disponible en: [[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825001634&seccionB=bd](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825001634&seccionB=bd)] México (2008)
37. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) *Anuario Estadístico de Quintana Roo 2008. Medio Ambiente*. Disponible en: [[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825001634&seccionB=bd](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825001634&seccionB=bd)] México (2008)
38. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) *Anuario Estadístico de Quintana Roo 2008. Turismo*. Disponible en: [[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825001634&seccionB=bd](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825001634&seccionB=bd)] México (2008)

39. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)  
*Compendios Estadísticos Regionales. Región Sur- Sureste, 2008.*  
Disponible en:  
[\[http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/sisnav/default.aspx?proy=cer&edi=0000&ent=00\]](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/sisnav/default.aspx?proy=cer&edi=0000&ent=00) México (2008)
40. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)  
*Cuaderno estadístico municipal. Benito Juárez. Quintana Roo 2006.*  
Disponible en:  
[\[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825937454&seccionB=bd\]](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825937454&seccionB=bd) México (2008)
41. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)  
*Cuaderno estadístico municipal. Isla Mujeres. Quintana Roo 2006.*  
Disponible en:  
[\[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825937447&seccionB=bd\]](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825937447&seccionB=bd) México (2008)
42. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)  
*Cuaderno estadístico municipal. Lázaro Cárdenas. Quintana Roo 2006.*  
Disponible en:  
[\[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825937485&seccionB=bd\]](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825937485&seccionB=bd) México (2008)
43. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)  
*INEGI en su entidad Quintana Roo. Aspectos del territorio estatal.*  
Disponible en: [\[http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=geo&e=23\]](http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=geo&e=23)  
México (2008)

44. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) ]  
*ITER. Principales resultados por localidad 2005. II Censo Nacional de Población y Vivienda 2005.* Disponible en: [\[http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/default.asp?c=9448\]](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/default.asp?c=9448) México (2008)
45. Kotàs, J. Stasicka, Z. *Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation.* Environmental Pollution. (2000) **107** 263-283
46. Lavoisier, S. E. *Metales Pesados en la Laguna Yalahau.* Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM. México (2006)
47. Lees, P. S. J. *Chromium and disease: Review of Epidemiologic Studies with Particular Reference to Etiologic Information Provided by Measures of Exposure* Environmental Health Perspectives (1991) **92** 93-104
48. Lehninger A. L. Nelson, D. N. Nelson, D. L. Cox, M. M. Cuchillo Foix; C. M. *Principios de Bioquímica.* Omega. México (1995)
49. Lewis, M. A. Dantin, D. D. Chancy C. A. Abel K. C. Lewis C. G. *Florida seagrass habitat evaluation: A comparative survey for chemical quality.* Environmental Pollution (2007) **146** 206-218
50. Li, Y. Xu, X. Liu, J. Wu, K. Gu, C. Shao, G. Chen, S. Chen, G. Huo, X.. *The hazard of chromium exposure to neonates in Guiyu of China.* Science of the Total Environment. (2008) **403** 99-104
51. Martínez Vázquez, A. M. *Metales Pesados (Fe, Cd y Cr) en pastos marinos (Thalassia testudinum) de la laguna Yalahau Quintana Roo: evidencia de posible contaminación del agua subterránea.* Tesis de maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. México (2007)

52. Mocanu, R. Cucu-Man, S. Steinnes, E. *Heavy Metals pollution: An everlasting Problem*. Environmental Simulation Chambers: Application to Atmospheric Chemical Processes. Springer. Holanda (2006)
53. Montgomery, J. R. Price, M. T. *Release of trace metals by sewage sludge and subsequent uptake by members of a Turtle Grass Mangrove Ecosystem*. Environmental Science & Technology (1979) 546-549
54. Neff, J. M. *Bioaccumulation in Marine Organisms. Effect of Contaminants from oil well Produced Water*. Elsevier. USA. (2002)
55. Nicolaud, A. Nott J.A. *Metals in sediment, seagrass and gastropods near nickel smelter in Greece. Possible interaction*. Marine Pollution Bulletin (1998) **36** 360-365
56. Nienhuis, P.H. *Background levels of heavy Metals in Nine Tropical Seagrass Species in Indonesia*. Marine pollution Bulletin (1986) **17** 508-511
57. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) *Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Chromium(VI)*. Disponible en: [<http://www.cdc.gov/niosh/pdfs/76-129b.pdf>] (2008)
58. Nohpal Jiménez, X. *Presencia de cadmio en el norte de la Península de Yucatán: de Campeche a Cancún*. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. UNAM. México (2007)
59. Noriega Escobar, E. *Metales pesados en Thalassia testudinum (pasto marino), en el Sistema Arrecifal Veracruzano*. Tesis de licenciatura. FES-Iztacala. UNAM. México (2001)

60. Nriagu, J. O. *Human influence on the global cycling of trace metals*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Global and Planetary Change Section (1990) **82** 113-120
61. Nriagu, J. O. Pacyna, J. M. *Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals*. *Nature* (1988) **333** 134-140
62. Nugent, R. S; Jordan, E. De la Torre, R. *Investigaciones preliminares de la biomasa de *Thalassia testudinum* koing, en la costa del Caribe Mexicano: nota científica*. *Anales del centro de Ciencias del Mar y Limnología* (1977) **5** 290-296
63. Phillips, D. J. H. *The use of biological indicator organism to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments- a review*. *Environmental Pollution* (1970) **13** 281-317
64. Prange, J.A. Dennison, W.C. *Physiological Responses of Five Seagrass Species to Trace Metals* (2000) **41** 327-336
65. Prol-Ledesma, R. M. *El calor de la tierra*. Fondo de Cultura Económica. 1ª. México (1996)
66. Rayment, G. E. Barry, G. A. *Indicator Tissues for Heavy Metal Monitoring- Additional Attributes* (2000) **41** 353-358
67. Rosas Gutiérrez, B. A. *Evaluación de metales pesados en sedimentos y organismos de las lagunas costeras de Veracruz, Tabasco y Campeche, México*. Tesis de licenciatura. FES-Iztacala. UNAM. México (2004)

68. Rosas Sánchez, D. H. *Estudio de la acumulación de cadmio en Thalassia testudinum de la Laguna Yalahau, Quintana Roo*. Tesis licenciatura Facultad de Química. UNAM. México (2006)
69. Ruiz Noria, O. Z. *Presencia de Fe y Cr en Thalassia testudinum del Golfo de México y el Mar Caribe*. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. UNAM. México (2005)
70. Sadiq, M. *Toxic metal chemistry in marine environments*. 1a. Marcel Dekker. USA. (1992)
71. Sakar, B. *Heavy Metals in the environment*. Marcel Dekker. USA. (2000)
72. Sears, J. R. Pecci, K. J. Cooper, R. A. *Trace Metal Concentration in off shore, deep water seaweeds in the western North Atlantic Ocean*. Marine pollution Bulletin (1985) **16** 325-328
73. Sharpe, A. G. *Química Inorgánica*. Reverté. México (1993)
74. Skoog, D. A. *Fundamentos de Química Analítica*. 8ª Cengage Learning. México (2005)
75. Smardon, R. C. Faust, B. B. *Introduction: international policy in the biosphere reserves of Mexico's Yucatan peninsula*. Landscape and Urban Planning. (2006) **74** 60-192
76. Tapia González, F. U. Herrera-Silveira J. A. Aguirre-Macedo, M. L. *Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of Yucatán Peninsula*. Estuarine Coastal and Shelf Science (2008) **76** 418-430

77. Tomlinson; P. B. *Vegetative morphology and meristem dependence-the foundations of productivity in seagrasses*. *Aquaculture* (1974) **4** 107-130
78. Udy, M. J. *Chromium*. American chemical society. New York: Renhold. USA (1956)
79. Vajpayee, P. Sharma S. C; Tripathi R. D; Rai, U. N; and Yunus M. *Bioaccumulation of chromium an toxicity to photosynthetic pigments, nitrate reductase activity and protein content of Nelumbo Nucifera Gaertn*. *Chemosphere*. (1999) **12** 2159-2169
80. Valdespino Saenz, J. *Determinación de metales pesados en Thalassia testudinum en dos zonas de la Península de Yucatán*. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. UNAM. México (2005)
81. Van Der Weijden C.H. Reith M. *Chromium (III)- Chromium (VI) Interconversions in seawater*. *Marine Chemistry* (1982) **11** 565-572
82. Van Tussenbroek, B. I. Vonk, J. Stape, 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)
83. Vargas Maldonado, I. Yañez-Arancibia, A. *Estructura de las comunidades de peces en sistemas de pastos marinos (Thalassia testudinum) de la Laguna de Termino, Campeche México*. *Anales del instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. (1987) **2**.
84. Vázquez, G.F. Sharma, V. K. Magallanes, V. R. Marmolejo, A. J. *Heavy Metals in Coastal Lagoon of the Gulf of Mexico*. *Marine Pollution Bulletin* (1999) **38** 479-485

85. Wielgolaski, F.E. *Biological Indicators on pollution*. Urban Ecology (1975) **1**. 63-79

86. Whelan III, T. Espinoza, J. Villareal, X. Cotta Goma, M. *Trace metal partitioning in Thalassia testudinum and sediments in the Lower Laguna Madre Texas*. Environment International. (2005) **31** 15-24