



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**T E S I S:**

**DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN THALASSIA  
TESTUDINUM EN DOS ZONAS DE LA PENÍNSULA DE  
YUCATÁN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO**

**P R E S E N T A  
JOB VALDESPINO SAENZ.**



**EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA**



**MÉXICO, D.F.**

**2005**

m. 343826



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**Jurado Asignado:**

**Presidente**

Prof. Liliana Saldivar Osorio

**Vocal**

Prof. Maria Isabel Gracia Mora

**Secretario**

Prof. Ana María Martínez Vázquez

**1er. Suplente**

Prof. Erika María Ramírez Maya

**2do. Suplente**

Prof. Jorge Alberto Acosta Ramírez

**Sitio en donde se desarrolló el tema:**

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM

**Asesor**



Ana María Martínez Vázquez

**Sustentante**



Job Valdespino Saenz

*A Cecilia Valdespino Saenz*

*Agradecimientos:*

*Agradezco a la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONAMP) en especial al director del Área de Protección de Flora y Fauna Yum – Balam, el Dr. Francisco Remolina por su amplia cooperación.*

*Al Instituto de Física de la UNAM, específicamente a la Dra. Corina Solis, por el análisis de muestras y por sus valiosos comentarios.*

*A la Dra Liliana Saldivar, por el análisis de las muestras por medio de Absorción Atómica y sus comentarios acerca de este trabajo.*

*En especial quiero agradecer a la Dra. Ana Martínez por su profesionalismo y su muy grata amistad y compañía.*

*A Martha, Jovv, Cecilia, mis abuelos, tíos y Raquel. Gracias por su cariño, amor y apoyo. Ustedes son las personas que me hacen querer superarme. Los quiero mucho.*

*A Gabriel, José Francisco, Antonio, Jonathan, Edgar Rojas, Iván Herrera, Anayeli, Mauricio, Erik Guzmán, Miguel Efrén y Adrián Valdés. Su invaluable amistad a lo largo del tiempo significa mucho para mí.*

*A Aarón, Irene, Isolda y Nicolás. Es un orgullo ser amigo de ustedes.*

*A Luis Humberto, Carlo Iván, Christian Israel, Ilsa, Adrián, Cuahutémoc, Karina, Luis Lima, Catalina, Edwin, Mariana Urbina, Lorena, Luis Armando, Eric Lavoisier, Saúl, Jacquelynne, Carlos Alberto, David, Allan y Danae. Amigos, ustedes causaron que los momentos amargos fueran menos pesados. Gracias por dejarme compartir mi vida con ustedes.*

*Quiero agradecer también a mis compañeros junto a los que conformamos el grupo de trabajo de la Dra. Ana Martínez. ¡Somos un gran equipo!*

# ÍNDICE

<b>Introducción</b>	1
El Arsénico y <i>La Comarca Lagunera</i>	3
El Cadmio y la historia de <i>Itai Itai</i>	6
El Plomo y el <i>saturnismo</i>	8
El Mercurio y la historia de <i>Minamata</i>	11
El Vanadio y el Níquel, <i>compañeros del petróleo</i>	13
El Cromo	14
El Hierro	16
El Cobre	17
El Zinc, <i>un micronutriente necesario</i>	18
Posibles causas de contaminación por Metales Pesados	19
Zonas de Estudio	
Isla Holbox	22
Puerto Morelos	23
<b>Objetivos</b>	25
<b>Hipótesis</b>	25
<b>Antecedentes</b>	26
<b>Metodología Experimental</b>	
Sitios de Muestreo	27
Recolección de las Muestras	29
Preparación de las Muestras	30
Análisis de las Muestras	30

<b>Resultados y Discusión</b>	31
Níquel	39
Zinc	40
Cobre	42
Arsénico	44
Cromo	45
Plomo	46
Cadmio y Mercurio	48
<b>Conclusiones</b>	51
<b>Apéndice I</b>	52
<b>Apéndice II</b>	57
<b>Bibliografía</b>	62

# INTRODUCCIÓN

En la segunda mitad del siglo XX se comienza a documentar una alarmante degradación del medio ambiente y el tema se convierte en el punto crucial dentro de los foros científicos, políticos, sociales y económicos. Desde entonces, el principal reto es encontrar mecanismos adecuados para el uso sustentable de los recursos naturales, que en principio son de libre acceso para toda la población.

Inicialmente la problemática ambiental se centró en medidas dirigidas sobre todo a evitar un daño directo en la salud humana. Cuando la preocupación ambiental se extendió a otros ecosistemas surgieron los parques y reservas naturales, además de otros instrumentos preventivos.

Hoy día, los impactos ecológicos de la actividad humana tienen una dimensión sin precedente. Tasas altas de deforestación, contaminación de lagos, lagunas y mares, intensos procesos de erosión en zonas costeras y forestales, accidentes ambientales catastróficos (como derrames de petróleo o impactos de barcos con arrecifes de coral), son algunos de los problemas que desafiamos. Dentro de los contaminantes peligrosos se encuentran los metales pesados, como el mercurio, el cadmio y el plomo.

El análisis de metales pesados en ambientes marinos se ha realizado desde hace tiempo (Lyngby and Brix, 1983; Neinhuis, 1986; Schoeder y Thoraug, 1980). Sin embargo, es necesario hacer un análisis continuo de la situación, dada la dinámica de los ecosistemas, porque así se podrán detectar cambios y situaciones peligrosas con oportunidad. Además, es importante analizar los datos reportados para con eso tratar de proponer medidas para la restauración de los ecosistemas.

Se sabe que la corteza terrestre es la fuente de todos los elementos metálicos encontrados en el ambiente. Los metales son redistribuidos naturalmente por ciclos geológicos y biológicos. En muchas de las actividades que realizamos los seres

humanos se utilizan los metales, para lo cual se efectúa la reducción de la fase mineral del metal. La corrosión es la parte del ciclo en la que los metales se oxidan para formar otra vez la fase mineral. Con las actividades tecnológicas se han introducido metales en lugares donde naturalmente no existían, y se ha incrementado su presencia en lugares donde antes la concentración era baja. Por ejemplo, metales como el cadmio se utilizan desde hace tiempo para fabricar pilas y baterías eléctricas. Esto lleva al cadmio de un lugar a otro y cuando se desecha la pila se convierte en un material tóxico y peligroso en zonas donde antes no se encontraba.

Alrededor de 40 elementos se clasifican como metales en el ambiente. Algunos, como el grupo de los alcalinotérreos y otros elementos traza, son esenciales para la vida, mientras que otros tienen un gran potencial para ejercer un efecto tóxico. Los macro nutrientes como el calcio, el magnesio, el hierro, el potasio y el sodio son particularmente importantes para sostener la vida, pero pueden ser tóxicos en concentraciones excesivas. Los elementos traza como el cromo (en su estado de oxidación 3+), el cobalto, el cobre, el manganeso, el níquel, el selenio y el zinc forman parte de la estructura de ciertas moléculas y pueden servir como cofactores de enzimas en procesos metabólicos. Sin embargo, estos elementos en altas concentraciones son también tóxicos. Algunos elementos como el plomo, el cadmio y el mercurio pueden deteriorar los tejidos cuando están presentes en cualquier concentración, por lo que se consideran altamente peligrosos. De cada uno de los metales de la tabla periódica se tiene información química y toxicología, como veremos a continuación, donde se presentan los principales efectos tóxicos de los metales y otros elementos de interés para este trabajo.

## El arsénico y la *Comarca Lagunera*

El arsénico (As) es un citotóxico que causa lesiones en la mayoría de las células y órganos. Es trivalente, tiene una alta afinidad por los grupo sulfhídricos (-SH), se une con el ácido  $\alpha$ -lipóico y da lugar a una estructura en forma de anillo. El ácido  $\alpha$ -lipóico es un cofactor esencial de la piruvato deshidrogenasa, una enzima requerida para la producción de energía en el ciclo de Krebs.

El arseniato ( $\text{AsO}_3^{-1}$ ), la forma usual en que se encuentra en los sistemas biológicos, es un oxianión muy parecido al oxianión fosfato encontrado en las células. La sustitución del fosfato por arseniato interrumpe una variedad de reacciones metabólicas, como el reemplazo de fosfato por arsenato en la síntesis de ATP (trifosfato de adenosina) que da como resultado en la inhibición de la formación de ATP y la "toxicidad" de las células. Se ha encontrado que probablemente se biomagnifica, lo que significa que la concentración de este elemento aumenta conforme se avanza en la cadena trófica o cadena alimenticia.

El As normalmente se encuentra en bajas concentraciones en el agua. Algunos ejemplos de la cantidad de As encontrada en algunas partes del mundo se resumen en la Tabla 1. La concentración máxima permitida en agua potable es de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  y el valor recomendado por la EPA (Environmental Protection Agency) y WHO (World Health Organization) es de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ . El agua oceánica comúnmente contiene  $0.008 \text{ mg L}^{-1}$  de As. La forma termodinámicamente más estable es el ión arsenato ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ). La concentración de As en agua dulce no contaminada se encuentra entre 1 y  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ , subiendo hasta el intervalo entre  $100\text{-}5000 \mu\text{g L}^{-1}$  en áreas donde hay actividades mineras (Smedley y Kinniburgh 2002).

Tabla 1. Concentración de As encontrada en el agua subterránea de algunos países afectados por el As  
(Kumar y Suzuki 2002)

Lugar	Concentración ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
Hungría	68 (1 - 74)
Sureste de Finlandia	17 - 98
Nueva Jersey, USA	1 (mediana)
Suroeste de USA	16 - 62
Comarca Lagunera, México	8 - 624
Córdoba, Argentina	>100
Chile	470 - 770
Pampa, Argentina	100 - 3810
Shanxi, China	0.03 - 1.41
Hsinchú, Taiwan	<0.7
Calcuta, India	<50 - 23080
Bangladesh	<10 - >1000
Fukuoka, Japón	0.001 - 0.293
Hanoi, Vietnam	159 (1 - 3050)

El As se acumula en los tejidos vivos. En una planta su presencia depende solamente de la exposición al metal. Su concentración varía de menos de 0.01 a cerca de  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  (en peso seco). Es baja la probabilidad de que los animales se envenenen por su consumo, ya que la planta generalmente se daña y muere antes de tener concentraciones tóxicas para los consumidores primarios.

Las fuentes antropogénicas del As superan a las fuentes naturales en el ambiente por una relación de 3 a 1. El hombre, en su utilización de los recursos naturales libera As en el aire, el agua y el suelo. Estas emisiones pueden afectar los niveles residuales en plantas y animales. El As se puede acumular en el suelo a través de plaguicidas, de la aplicación de fertilizantes, del polvo de la combustión de combustibles fósiles y de los desechos industriales. Los principales productores de As son China, la ex Unión de Repúblicas Soviéticas Socialistas, Francia, México, Alemania, Perú, Namibia, Suecia y Estados Unidos de América (Kumar y Suzuki 2002). Estos países contribuyen al 90%

de la producción mundial. La relación de As (V) / As (III) basado en cálculos termodinámicos es 1026:1 para agua oxigenada a pH 8.1. La concentración inusualmente alta de As (III) es causada en parte por la reducción biológica.

En México se reporta un evento protagonizado por el As en la *Comarca Lagunera*, que se encuentra en los estados de Coahuila y Durango en el norte del país (Kumar y Suzuki 2002). Entre 1963 y 1983, seis zonas de la *Comarca Lagunera*, con una población cercana a 200,000 habitantes, sufrieron una exposición crónica a concentraciones altas de As por medio del agua potable. El As de la región proviene de yacimientos naturales, que estaban suficientemente profundos como para no generar problemas. La explotación del agua subterránea en el acuífero principal de la *Comarca Lagunera* provocó el descenso de niveles piezométricos, que condujo a la migración de aguas subterráneas con concentraciones de As superiores a la establecida por la NOM vigente (NOM-127-SSA1-1994) para uso y consumo humano. Con ésto se contaminó el agua potable, provocando serios problemas de salud a los habitantes de la región. El intervalo de concentración de As en los individuos alcanzó niveles altos, entre 0.008 – 0.624 mg L<sup>-1</sup> y se encontraron concentraciones mayores a 0.05 mg L<sup>-1</sup> en el 50% de la población. La mayoría del As está en su forma inorgánica pentavalente (93% de las muestras). Sin embargo, en 36% de las muestras presenta un porcentaje variable (20 – 50%) de arsénico trivalente. Los síntomas observados en los pobladores fueron: manifestaciones cutáneas (cambios de pigmentación, queratosis y cáncer cutáneo), enfermedades vasculares periféricas y problemas gastrointestinales. Se encontró que la proporción de individuos (por grupo de edad) afectada por lesiones cutáneas se incrementaba con la edad hasta los 50 años.

Para corregir este problema, en la década de los 90's se implementó un programa de recarga artificial mediante embalses de infiltración construidos sobre el lecho del río Nazas. El diseño de los proyectos contemplaba que el agua utilizada para la recarga proviniera de la Presa Francisco Zarco. El líquido se conduciría a través del canal Sacramento para después desviarse por los canales de desfogue y descargar en los embalses de infiltración. Con ésto se esperaba corregir el problema de contaminación por arsénico y cumplir la demanda de agua de la *Comarca Lagunera*. El proyecto se

llevó a cabo hasta donde se sabe, está funcionando como se esperaba. Sin embargo, es necesario monitorear el agua y la zona para asegurarse de que no se vuelva a presentar el problema de contaminación por arsénico.

### El Cadmio y la historia de *Itai Itai*

El cadmio (Cd) es ampliamente usado en el plateado de metales. Químicamente es muy parecido al Zn y estos dos metales frecuentemente realizan los mismos procesos geoquímicos. Ambos elementos se encuentran en agua en su estado de oxidación 2+.

Se conoce que el cadmio causa lesiones en los riñones, los pulmones, el esqueleto, los testículos y el sistema nervioso. La citotoxicidad del Cd depende fuertemente de la producción celular de la proteína que se une al cadmio, conocida como metalotioneína (M). Las células renales tubulares epiteliales pueden “guardar” altas concentraciones de Cd cuando se forma el compuesto cadmio-metalotioneína (Cd-M) sin mostrar señales de daño. El rompimiento del complejo Cd-M dentro de las células libera al metal en sitios sensibles, como las enzimas que dependen de zinc. En la célula da lugar a una lesión, particularmente en el túbulo proximal del riñón de los mamíferos.

El cadmio es altamente tóxico para el consumo humano ya que produce la enfermedad conocida como *Itai Itai*.

La enfermedad *Itai Itai* (que significa auch auch en japonés) se debe al envenenamiento por cadmio. Detectada por primera vez en Japón, las altas concentraciones de este metal en la región se debieron a la actividad minera en la prefectura de Toyama, en particular en la minera Kamioka. En esta zona, los registros más antiguos de extracción de oro datan del año 710. La extracción de plata empezó en el año de 1589 y enseguida comenzó la del plomo, el cobre y el zinc. El incremento en la demanda de materiales para la guerra entre Japón y Rusia durante la Primera Guerra Mundial, y las nuevas tecnologías mineras de Europa, incrementaron la producción de las minas y pusieron a la minera Kamioka entre las primeras del mundo. La producción se incrementó aún más antes de la Segunda Guerra Mundial. El cadmio se liberó en cantidades significativas desde 1910 hasta aproximadamente 1945 y el

primer caso de enfermedad apareció en 1912. Antes de la Segunda Guerra Mundial, la minera, controlada por *Mitsui Mining and Smelting Co., Ltd*, incrementó su producción para satisfacer la demanda de la guerra. Esto aumentó subsecuentemente la contaminación del río Jinzu, que era usado principalmente para la irrigación de los campos de arroz, pero también para beber, lavar, pescar y otros usos que le daba la población. De esta forma, el Cd alcanzó a los habitantes de la zona.

Debido al envenenamiento por cadmio, los peces comenzaron a morir y el arroz no crecía correctamente. El arroz absorbió todos los metales presentes en las descargas de la minera, principalmente el cadmio. Este también se acumuló en las personas que consumieron el arroz. Las causas del envenenamiento no estaban completamente entendidas y hasta 1946 se creía que era una enfermedad regional o causada por una bacteria. Los estudios médicos en los años cuarenta, sugirieron inicialmente que se trataba de envenenamiento por plomo debido a la minera de plomo que se encontraba cerca de la región. Solamente en 1955, el Dr. Hagino (Kohno *et. al.* 1955) y sus colegas sospecharon que la causa de la enfermedad era el cadmio y fue entonces cuando se acuñó el término de *Itai Itai*. La prefectura de Toyama también empezó una investigación en 1961, determinando que la estación minera de Kamioka era la responsable de la contaminación por cadmio.

El principal problema actualmente en México con respecto al Cd es que este metal es uno de los componentes principales de las pilas y baterías de uso común. Actualmente no se conoce ningún estudio que evalúe el impacto al medio ambiente ocasionando por el manejo inadecuado de pilas y baterías.

A pesar de la percepción del riesgo que tiene la sociedad, se ha hecho muy poco con respecto al reciclado de las pilas y baterías en nuestro país, debido a diferentes causas de tipo legal y económico. En México existen pocas empresas que se dedican a reciclar las pilas y baterías. La principal razón es que el costo de la energía invertida en el proceso no se compensa con el valor de los materiales recuperados.

## El Plomo y el *satumismo*

El principal mineral en el que se encuentra este metal es la galena (PbS), que es poco soluble en agua. El 85% de este metal se asocia al sedimento. El plomo es un metal carente de valor biológico, es decir, no es requerido para el funcionamiento normal de los seres vivos. El ión  $Pb^{2+}$  es el más estable en el ambiente. La mayoría del Pb en ambientes acuáticos forma compuestos organometálicos solubles. Se bioacumula en bacterias, plantas, invertebrados y peces. Su estabilidad disminuye en aguas con concentraciones elevadas de dióxido de carbono y sulfatos.

Dado que los iones Pb tienen una estructura iónica parecida a la de los iones calcio (Ca), puede ser llevado a las células del sistema nervioso. Entonces, "mimetizando" al Ca, el Pb reemplaza o desplaza al Ca en sus diversas funciones de las rutas metabólicas, lo que produce una reducción en la producción de ATP e irregularidades celulares generalizadas. Esta alteración en la función es particularmente importante por sus efectos en la transmisión sináptica.

El efecto tóxico del Pb es particularmente alarmante en los niños, que debido a su crecimiento incorporan altas cantidades de calcio y de plomo cuando se ingieren dosis elevadas. El plomo cuando está en altas concentraciones dentro del organismo es "removido" de los tejidos óseos y pasa al torrente sanguíneo. Una vez ahí puede inducir nefrotoxicidad, neurotoxicidad e hipertensión. Cuando los niveles de plomo en sangre son iguales a  $0.48 \mu\text{g L}^{-1}$  se pueden inducir en los niños daños durante el desarrollo de los órganos del feto, daños en el sistema nervioso central, reducción de las habilidades mentales e iniciación de desórdenes de comportamiento. A su vez, niveles del orden de  $1.2 \mu\text{g L}^{-1}$  pueden inducir descenso del coeficiente intelectual (CI), problemas de desarrollo cognitivo y del comportamiento, déficit neurológico que puede persistir hasta la adolescencia, elevación de los umbrales auditivos, peso reducido en recién nacidos y desarrollo cognitivo temprano anormal (Manahan 2000).

En adultos que trabajan en ambientes expuestos a la contaminación con plomo, el metal puede acumularse en los huesos donde su vida media es superior a los 20 años. La osteoporosis, el embarazo o las enfermedades crónicas pueden hacer que este

plomo se incorpore más rápidamente a la sangre. Los problemas relacionados con la sobre-exposición al plomo en adultos incluyen daños en riñones, en el tracto gastrointestinal, en el sistema reproductor, en los órganos productores de sangre, daños neurológicos y puede producir aborto en las mujeres embarazadas.

Como se mencionó anteriormente, la mayoría del Pb en ambientes acuáticos se encuentra como compuesto órgano metálico. Los compuestos órgano metálicos del Pb más comunes en el ambiente son el tetraalquilplomo ( $R_4Pb$ ) que no es muy tóxico hasta que es desalquilado a trialquilplomo ( $R_3Pb$ ). Se cree que el  $R_3Pb$  interrumpe el flujo de iones cloruro a las neuronas. Esto finalmente incrementa el metabolismo de la glucosa lo que conlleva a una acumulación de ácido láctico y pirúvico, que son extremadamente dañinos para las neuronas. Tanto el organoplomo, como el Pb inorgánico, interrumpe el metabolismo celular y mitocondrial del calcio. Los síntomas que se presentan por la exposición a tetraetilplomo ( $Et_4Pb$ ) y trietilplomo ( $Et_3Pb$ ) se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Signos clínicos y síntomas que siguen a la exposición de  $Et_4Pb$  o  $Et_3Pb$

Fase I	Letargo
Fase II	Tremor, hipermotilidad, hiperexcitabilidad, agresión
Fase III	Hipotermia, Convulsión, ataxia, parálisis
Fase IV	Muerte

La intoxicación crónica con plomo produce una enfermedad conocida como *saturnismo*, que se debe a la ingestión diaria de bajas concentraciones de este metal. Esto produce cuadros crónicos por acumulación en vísceras, huesos y dientes. También daña células sanguíneas. La acumulación paulatina del plomo se lleva a cabo en tres períodos: el simple de absorción, no tóxico o de exposición; el de impregnación o saturnismo latente; y el de manifestaciones clínicas o saturnismo confirmado. En el período de latencia, la detección se hace por medio de laboratorio. Ya en el tercer período de confirmación hay manifestaciones clínicas como el adelgazamiento por alteraciones digestivas, las encías color pizarra por depósito de

plomo, manchas del mismo color en la cara interna de las mejillas, tumefacción o dolor de las glándulas salivales, gastritis, constipación y a veces diarreas. Se llega al cuadro de dolor cólico abdominal que dura días enteros y aún semanas. Junto con el cólico disminuye la emisión de orina, la que aumenta al desaparecer el cólico. También acompaña al cólico un cuadro de hipertensión arterial con bajas pulsaciones, que remite al ceder el dolor. Hay adinamia (decaimiento) y piel pálida con tinte grisáceo. En sangre se presenta una anemia de tipo hemolítico. Por alteración del sistema nervioso central se pueden presentar cuadros comatosos, delirantes o convulsiones. En el sistema nervioso periférico se ocasiona una parálisis de los extensores de los dedos uni y bilateral. Los ojos pueden sufrir una neuritis óptica con ambliopía y hasta amaurosis (ceguera).

México figura entre los 15 países de mayor producción de plomo, utilizado en diversos procesos industriales: desde tetraetilo de plomo hasta baterías, pigmentos, pinturas y soldaduras. Más de la mitad de la producción nacional se exporta.

El tetraetilo de plomo se usaba ampliamente como antidetonante en la gasolina. Mejorar la calidad de la gasolina fue precisamente uno de los programas oficiales que recibieron atención prioritaria a partir de los años 80 del siglo pasado, en especial para eliminar el tetraetilo de plomo. Hoy las gasolinas mexicanas no contienen plomo, lo cual ha mejorado la calidad de vida principalmente de los habitantes de las grandes ciudades, y en particular, de los niños de la calle que antes tenían altas concentraciones de plomo en sangre y hoy ya no las presentan. También fue importante controlar las emisiones industriales, como las de fundición, las fábricas de acumuladores y los cientos de talleres de reparación de baterías y acumuladores, que emitían al aire variadas cantidades de ese metal, que luego se depositaban en el polvo, el agua y el suelo, y terminaban finalmente en el cuerpo humano. Hace 20 años también la pintura que se usaba, por ejemplo, para señalamientos de vialidad y ciertos útiles escolares (como los lápices de colores) tenían altas concentraciones de plomo que finalmente afectaba a la población expuesta. Además, los mexicanos estábamos expuestos al plomo a través de los vidriados de la cerámica. La mayoría de los vidriados de todo el mundo contienen plomo como principal reactivo fundente. El problema se presenta cuando las vasijas se utilizan para guardar alimentos o para

calentarlos y cocinarlos, porque algunos vidriados de plomo después de cocidos con la cerámica, son solubles en disoluciones ácidas. En consecuencia pueden disolverse cantidades apreciables de plomo en alimentos como jugos de frutas, salsas o vinagre. Ésto sólo ocurre cuando los vidriados no se trabajan de manera adecuada, porque se les agrega un exceso de plomo. Hoy los vidriados de los utensilios para guardar alimentos están libres de plomo (Martínez y López 1994).

Aunque el plomo no ha sido del todo eliminado de las fuentes que lo originan y continúa causando daños a la salud, los logros han sido muy importantes y se puede decir que, por lo que hace a las áreas metropolitanas de las ciudades de México, Guadalajara, Monterrey, Puebla, León y Tijuana, es un contaminante menor y cada vez más, bajo control (La Jornada 2005; Fortoul *et al.*, 2004).

### El Mercurio y la historia de *Minamata*

El Mercurio (Hg) es uno de los metales tóxicos conocido por el hombre desde la antigüedad. Forma parte como elemento traza de muchos minerales. Las rocas continentales lo contienen en una concentración de alrededor de 80 ppb.

El Hg metálico se usa como electrodo en la generación electrolítica de cloro gaseoso, en aparatos generadores de vacío en laboratorios y como amalgama de zinc. El mercurio orgánico se usa comúnmente en la fabricación de plaguicidas, particularmente fungicidas.

El Hg metálico no cruza la barrera encefálica eficazmente, y es principalmente un nefrotóxico que daña el túbulo renal proximal. En cambio, el vapor de Hg y los compuestos orgánicos que forma (como el metilmercurio) entran fácilmente al Sistema Nervioso Central y son, por tanto, potentes neurotóxicos. El mecanismo tóxico del metilmercurio se explica por su alta afinidad por los ligandos sulfhidrilos. El Hg se enlaza fácilmente con la cisteína (rica en -SH) quien lo acarrea hacia el Sistema Nervioso Central (SNC). La barrera encefálica es un sistema complejo que regula el paso entre los metabolitos de la sangre y el SNC. Ésta puede ser destruida a medida que el metilmercurio la atraviesa. Una vez dentro de las células nerviosas, el

metilmercurio se une con otros componentes ricos en  $-SH$ , particularmente las estructuras membranosas en el citoplasma. Más aún, la estructura del complejo cisteína-metilmercurio se asemeja a la metionina, un aminoácido esencial muy importante en la iniciación de la cadena polipeptídica en la síntesis de proteínas. Por tanto, la presencia de este complejo interrumpe la síntesis normal de proteínas.

El envenenamiento por metilmercurio (MeHg) fue reconocido por primera vez en *Minamata*, Japón, en los años sesenta. Cientos de pescadores y sus familias fueron severamente envenenados durante los años cincuenta por el metilmercurio bioacumulado en los peces, debido a la liberación de mercurio a la bahía por una planta química local. En 1956, la población afectada reconoció que su envenenamiento era debido al consumo de peces y dejaron de consumir el producto proveniente de la bahía. A pesar de lo anterior, los casos continuaron acumulándose y para 1960, la enfermedad grave y misteriosa que afectaba tanto a adultos como a niños, fue reconocida como envenenamiento por MeHg. La epidemia de *Minamata* fue reportada por primera vez por Kurland *et al.* en 1960. Poco más tarde se descubrió que la fuente era el mercurio que provenía de la planta productora de acetaldehído *Chisso*. A pesar de saberlo, la fábrica siguió operando hasta que en 1968 se les obligó a reducir la liberación de mercurio. Las actividades pesqueras se renovaron en los años noventa. La exposición a altas concentraciones de MeHg produjo serias enfermedades neurológicas en adultos, pero la manifestación más grave fue la enfermedad congénita de *Minamata* en infantes nacidos de madres con altos niveles de Hg. Estos bebés nacieron con parálisis cerebral severa, ceguera y retraso mental profundo. Muchas de estas víctimas sobrevivieron hasta 20 años y otras de las víctimas adultas sobreviven hasta hoy. Las autopsias revelan lesiones destructivas en el cerebelo y en muchas partes de la corteza cerebral.

## El Vanadio y el Níquel, *compañeros del petróleo*

El vanadio (V) es un elemento metálico que se presenta en seis estados de oxidación. Algunos de los compuestos importantes que contienen V son el pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ), el metavanadato de sodio ( $NaVO_3$ ), el ortovanadato de sodio ( $Na_3VO_4$ ), el sulfato de vanadilo ( $VOSO_4$ ) y el vanadato de amonio ( $NH_4VO_3$ ). Este metal se usa principalmente como aleación en aceros y otros metales, y como catalizador.

Los compuestos de V se absorben parcialmente en el sistema gastrointestinal (0.5-2% de la cantidad ingerida). El V absorbido se distribuye por todo el cuerpo, pero se acumula principalmente en los huesos, los riñones y el hígado. En el cuerpo, el V puede sufrir cambios en su estado de oxidación (interconversión entre vanadilo y vanadato) y puede unirse con una proteína de la sangre (transferrina).

La toxicidad del V depende de su estado fisicoquímico, principalmente de su estado de oxidación y solubilidad. Basado en estudios de toxicidad aguda, el ión pentavalente resultó ser el más tóxico. En humanos, una intoxicación subcrónica vía oral causa calambres intestinales y diarrea.

El níquel (Ni) es un elemento que se encuentra de manera natural y que existe en muchos minerales. Su uso incluye procesos metalúrgicos y componentes eléctricos, como las baterías. Existen evidencias de que el Ni puede ser un elemento traza esencial para los mamíferos. Su absorción depende de la forma fisicoquímica en la cual se absorben mejor las formas más solubles. La mayoría del Ni en el cuerpo se introduce mediante los alimentos y el consumo de agua, pero causa una mayor toxicidad si se inhala.

Los órganos blanco por inhalación de Ni son los pulmones y el tracto respiratorio, mientras que los riñones son el órgano blanco por exposición oral. Se ha demostrado en estudios epidemiológicos que la inhalación de los trabajadores en las plantas de Ni incrementa la incidencia en cáncer pulmonar y nasal.

Se ha visto que cuando la concentración V/Ni se encuentra en el intervalo de 3.25 a 6.78 su presencia está relacionada con los derrames petroleros (Villanueva y Botello 1992). Lo anterior es importante porque la mayor parte del petróleo se usa en lugares muy alejados de sus puntos de extracción, por lo que debe ser transportado por petroleros u oleoductos a lo largo de muchos kilómetros, lo que provoca espectaculares accidentes de vez en cuando. Alrededor del 0.2% de la producción mundial de petróleo acaba vertido al mar. El porcentaje puede parecer pequeño pero son casi 3 millones de toneladas las que acaban contaminando las aguas cada año, provocando daños en el ecosistema marino. Estas fuentes de contaminación son las más conocidas y tienen importantes repercusiones ambientales, pero la mayor parte del petróleo vertido procede de la tierra, de desperdicios domésticos, automóviles y gasolineras, refinerías e industrias.

## El Cromo

El cromo (Cr) se encuentra en forma mineral principalmente en la cromita ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ ). Los estados de oxidación más importantes debido a su estabilidad, a los efectos en el medio ambiente y a su toxicidad en humanos y animales son el Cr (III) y el Cr (VI).

El Cr juega un papel en el metabolismo de la glucosa y el colesterol y por lo tanto es un elemento esencial para el hombre. La exposición al metal ocurre a través del consumo de alimentos y bebidas contaminadas.

El Cr (III) se absorbe difícilmente, sin importar la ruta de exposición, mientras que el Cr (VI) se absorbe fácilmente. El Cr se acumula en los pulmones, el hígado, los riñones, el plasma, la médula ósea y los glóbulos rojos. El cromo hexavalente, los cromatos y dicromatos y el ácido crómico son considerados contaminantes sumamente peligrosos para la salud humana (Costa, 2003). De estos residuos sobresale el primero, mismo que se genera durante el proceso de cromado, donde una corriente eléctrica ocasiona que el cromo hexavalente se emita como aerosol y ya en el aire es capaz de causar daño irreversible a la salud humana, a los animales y a la vegetación, contaminado el agua, el suelo y el aire.

En México se reporta desde hace tiempo un problema de contaminación por cromo. La población de *Lechería*, en el Estado de México, se ve afectada desde hace varias décadas por la exposición continua a los residuos de cromo, generados por la empresa *Cromatos de México, S. A.* Esta compañía, establecida en 1958, se dedicaba a producir compuestos de cromo, en un proceso a cielo abierto, sin control sobre las emisiones de polvos ni las descargas de aguas residuales y tampoco contemplaba un adecuado manejo de los residuos tóxicos. Los residuos de polvo generados en el proceso de cromado se utilizaron para pavimentar las calles y las avenidas en diferentes colonias de *Lechería*. La colonia *Recursos Hidráulicos* es el caso más crítico, ya que sus calles fueron "emparejadas" con el polvo amarillo por carecer de pavimento. De esta forma, la contaminación por cromo se diseminó por distintos lugares, afectando en mayor o menor medida a toda la región.

Las emisiones de cromo son de particular preocupación cuando las empresas de cromado se encuentran cerca de zonas residenciales y escuelas. Este fue el caso de la escuela primaria federal "*Reforma*", situada cerca de la empresa *Cromatos de México, S. A.*, donde perecieron algunas alumnas por causa de los desechos de cromo. A raíz de esta situación, la población exigió el cierre de esta empresa en 1975, logrando la clausura en 1978.

Después de la clausura, se inició la construcción de un cementerio industrial que inició sus operaciones en 1983. El cementerio está formado por un depósito de concreto que tiene una capacidad de 30,000 metros cúbicos aproximadamente y que está cubierto con una tapa de asfalto. En el depósito se almacenaron 75 mil toneladas de residuos de cromo, de los que antes se encontraban a cielo abierto.

Con el tiempo y la falta de mantenimiento, el depósito se comenzó a deteriorar hasta que empezaron a aparecer fugas. Con esto el problema resurgió hace varios años, provocando la contaminación del aire, el agua y el subsuelo de la zona, afectando con esto la salud de los habitantes de esta localidad. Esta situación volvió a levantar una serie de protestas. Debido a lo anterior, en mayo de 2002 se creó la *Mesa de Coordinación para la Restauración Ambiental del Cementerio Tóxico de Cromatos de*

*México.* Bajo la dirección de esta organización, se concluyó la primera fase del proyecto de contención de la contaminación por cromo en Tultitlán, con el cercado total del área de cromatos y la instalación de una caseta de vigilancia. En la segunda fase pretenden determinar, a través de estudios técnicos, las dimensiones de afectación al subsuelo y de los mantos acuíferos de la región, para detectar la posible contaminación de los pozos de agua potable. Además, se analizará la factibilidad de crear un nuevo cementerio de cromatos, reubicado en un sitio de confinamiento más seguro (Gaceta Parlamentaria 2003).

## El Hierro

El hierro es un elemento esencial para la nutrición humana. Se encuentra en una serie de proteínas de importancia biológica, entre ellas la hemoglobina y los citocromos, y también en muchas enzimas que participan en reacciones de oxidación-reducción. La mayor parte de los alimentos, exceptuando la leche, lo contienen en cantidades suficientes como para que no exista déficit de este metal en la dieta. Sin embargo, el hierro se absorbe con dificultad y la mayoría de los individuos apenas cubre sus necesidades diarias.

De todo el Fe que se ingiere sólo se absorbe un 10% aproximadamente. Además, la composición de la dieta condiciona su absorción; la presencia de los iones carbonato, fosfato, oxalato y fitatos dificultan este proceso. Los fitatos se encuentran presentes en los cereales, el cacao, las nueces y las mandarinas, mientras que los oxalatos abundan en las espinacas, el cacao, los plátanos, el café, el té y el ajonjolí. Los agentes reductores como la vitamina C aumentan la absorción.

Las necesidades de Fe varían según la edad, el sexo y el estado fisiológico del individuo. El organismo es capaz de regular la absorción de acuerdo con las necesidades. Se han establecido niveles entre 7 y 14 mg día<sup>-1</sup> para un individuo adulto. Las mujeres gestantes necesitan además 15 mg día<sup>-1</sup>. La deficiencia de hierro da lugar a desórdenes musculares y disminución de la capacidad física al esfuerzo, anomalías en el comportamiento como apatía, somnolencia e irritabilidad, disminución

del rendimiento intelectual, así como una incidencia más elevada de infecciones en niños.

Su ingestión en exceso produce hemosiderosis (acumulación de Fe en los pulmones) y hemocromatosis (acumulación de Fe en el hígado). Hoy se piensa que esta última se produce por un defecto congénito del metabolismo, el cual origina un aumento en la absorción del hierro. Además, el aporte desmesurado interfiere en el proceso de absorción y la utilización consiguiente de cobre, zinc y manganeso (Mireles, 2004).

## El Cobre

El cobre es un elemento esencial para el hombre. Interviene en el desarrollo de los huesos y del tejido elástico, en el funcionamiento del sistema nervioso central y en la síntesis de hemoglobina. La dosis diaria se recomienda que sea de 2 mg. Dada su gran distribución en los seres vivos, es prácticamente imposible preparar una dieta que contenga menos de esta cantidad.

El Cu se absorbe en un 30% pero esta cantidad puede disminuir si además hay altas ingestas alimentarias de hierro, molibdeno y zinc. Este elemento se almacena preferentemente en el hígado, el riñón, los músculos, el corazón y el cerebro. Su deficiencia produce anemia, neutropenia (disminución de la concentración de neutrófilos) y desmineralización ósea, mientras que la ingestión en exceso es tóxica.

No son frecuentes las intoxicaciones agudas por este metal, porque tiene efectos laxantes y es eliminado rápidamente del organismo. Sin embargo, cuando se llega a acumular produce náuseas, vómitos, dolor de cabeza y debilidad. En los casos más graves causa taquicardia e hipertensión, que pueden acompañarse por ictericia, anemia hemolítica, uremia y la muerte (FAO/WHO).

## El Zinc, *un micronutriente necesario*

El zinc es un micronutriente y por lo general se le considera como uno de los elementos metálicos menos peligroso. La absorción gastrointestinal es del 20 al 30%, si bien existen factores que la condicionan. Se ve favorecida por los aminoácidos cisteína, metionina e histidina, por los azúcares fructosa y lactosa y por la vitamina C. Por el contrario, es entorpecida por dosis elevadas de fitatos, fósforo, cobre, manganeso, hierro y estaño. Se acumula en el hígado, el páncreas, los riñones y la próstata.

La presencia de zinc en una amplia variedad de enzimas demuestra su importante papel en el metabolismo. La *Food and Nutrition Board* de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América, recomienda una ingesta diaria de este elemento de 15 mg para adultos. Su carencia provoca disminución del crecimiento, hipogonadismo marcado y piel áspera y seca.

A pesar de ser un elemento esencial para el hombre, a dosis elevadas resulta tóxico. Entre los síntomas de toxicidad se incluyen vómitos, deshidratación, desequilibrio electrolítico, dolor abdominal, letargo, mareos y pérdida de coordinación muscular. Dosis diarias de 150 mg interfieren con el metabolismo del cobre y del hierro.

La toxicidad de este elemento se incrementa por la presencia de cobre y níquel. Hay que resaltar que el zinc tiene un papel antitóxico muy importante como antagonista metabólico del cadmio. Esto significa que en un organismo contaminado por cadmio, donde el Cd está unido a las enzimas, se puede tratar con grandes cantidades de zinc. Como estos dos metales tienen propiedades químicas similares, el Zn en exceso desplaza el equilibrio provocando que el Cd se desuna de las enzimas. Con esto se elimina el cadmio y se corrigen los efectos tóxicos (FAO/WHO).

## Posibles causas de contaminación por Metales Pesados

La combustión de combustibles fósiles libera en el ambiente cerca de 20 metales toxicológicamente importantes, incluyendo arsénico, berilio, cadmio, plomo y níquel. Los productos y residuos industriales pueden contener altas concentraciones de metales tóxicos. Por ejemplo, el mercurio se utiliza en la industria que produce cloro y sosa cáustica para producir papel y pulpa, baterías, bulbos fluorescentes, pinturas, productos agrícolas, preparaciones dentales y fármacos.

El cadmio, un producto secundario de la extracción del zinc y del plomo, es un contaminante importante. Sus usos industriales incluyen pinturas, pigmentos, baterías y plásticos. También se utiliza como agente anticorrosivo para el acero, el hierro, el cobre y otras aleaciones.

Los metales pesados que se incluyen en los fertilizantes son el cadmio, el cromo, el cobre, el manganeso, el molibdeno, el níquel y el zinc. Las fuentes más importantes del arsénico presente en el ambiente son los plaguicidas, herbicidas y otros productos agrícolas. Los fungicidas que contienen mercurio contribuyen a la contaminación ambiental (Manahan 2000).

Para los humanos, la ingestión de alimentos y sus aditivos representa la mayor fuente de exposición a los metales. La ingestión de metales sigue dos rutas primarias. La primera incluye contacto directo con el alimento que contiene el metal. Un ejemplo es la ingestión de plomo que hubo durante el reinado del Imperio Romano (509 a. C. a 476 d. C.). Los romanos usaban tubería con plomo para acarrear agua a las casas de las familias importantes del imperio. Por tanto el plomo fue ingerido en grandes cantidades por estas familias, provocando problemas de salud a la población de entonces (Cockerham, *et. al.* 1994). Lo mismo ocurrió con la cerámica vidriada en México.

La segunda ruta de ingestión de metales se presenta por la bioacumulación en la cadena alimenticia. El problema con esta ruta de ingestión es que los metales a lo largo de la cadena trófica o alimenticia pueden acumularse, llegando a los niveles

superiores de la cadena en cantidades realmente peligrosas para los consumidores. Para el análisis de la presencia de metales pesados en la red alimenticia se utilizan bioindicadores, que son organismos biológicos que pueden acumular los contaminantes y con eso servir como señal de advertencia sobre posibles problemas de contaminación, en particular con metales pesados.

Un organismo es un buen indicador de contaminación si cumple con los siguientes requisitos: es de tamaño razonable, es sedentario, es fácilmente colectable y es abundante en el área de estudio (Brix y Lyngby, 1983). Los bioindicadores, se han utilizado desde hace tiempo (Brix y Lyngby, 1983, Nienhuis, 1986; Schoeder y Thoraug, 1980; Noriega, 2001, Whelan III, 2005), pero cabe mencionar que los estudios sobre la determinación de los niveles de metales pesados se han desarrollado preferentemente en sedimentos marinos, peces y agua de mar. Existen pocos estudios en plantas acuáticas, sobre todo en el caso de la especie *Thalassia testudinum*, que es una de las principales en las comunidades de pastos marinos asociados a estuarios y ecosistemas arrecifales del Atlántico tropical. Las comunidades de pastos marinos se distribuyen en dos grandes zonas oceánicas: el Indo-Pacífico y la cuenca del Caribe y el Golfo de México. *Thalassia testudinum*, se distribuye desde el Golfo de México y el mar Caribe hasta las Bermudas. Son sumamente importantes ya que son sitios de alta sedimentación debido a la captura de material particulado orgánico e inorgánico, por lo que contribuyen a la estabilización del sustrato. Las comunidades de estos pastos representan áreas de crianza, reproducción y protección para diversas poblaciones de peces e invertebrados. En particular, el pasto marino *Thalassia testudinum*, también es una fuente directa de alimento para una gran variedad de especies de invertebrados macrobentónicos (Noriega 2001). Además, estos pastos interaccionan con otras fuentes de producción primaria que soportan la estructura trófica estuarina y arrecifal, ya que por sus hojas anchas permiten el desarrollo de un gran número de organismos epífitos. Por otro lado, tienen un papel importante en el reciclaje de nutrientes y contribuyen al contenido orgánico del sedimento, por el crecimiento continuo de sus rizomas y la descomposición de los mismos en el sustrato.

Morfológicamente, *Thalassia testudinum* tiene rizomas y tallos horizontales que suelen estar bajo la superficie del sustrato. Del rizoma se desarrollan hojas. Su tejido característico en hojas, raíces y rizoma es un aerénquima (tejido vegetal con grandes espacios intercelulares), que consta de espacios de aire que ayudan a la flotación de las hojas y permiten el intercambio gaseoso en toda la planta. Los cloroplastos están limitados a la capa epidérmica de la hoja, no se observan estomas en las hojas y la osmorregulación está dada por las numerosas mitocondrias en las células epidérmicas. La planta es dioica (plantas con flores unisexuales) y la floración es común durante todo el año, pero no al mismo tiempo en todas las plantas, produciendo frutos con 4 ó 5 semillas. Este pasto está adaptado a sedimentos blandos y se encuentra en aguas relativamente tranquilas, hasta profundidades de 25 metros, y áreas cuya salinidad fluctúa entre 25 y 40%. En el estudio de la concentración de metales pesados se puede utilizar a *Thalassia testudinum* como bioindicador de contaminación, ya que acumula elementos de interés ambiental en su tejido y cumple con las condiciones de un organismo indicador (Noriega 2001, Nienhuis 1986).

Figura 1. Pradera del pasto marino *Thalassia testudinum*.



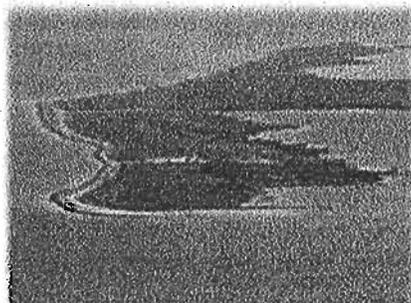
Para este trabajo se seleccionaron dos áreas de estudio: La isla Holbox y Puerto Morelos, ambas en el estado de Quintana Roo, en la Península de Yucatán. Las zonas de estudio se describen a continuación.

## Zonas de Estudio

### Isla Holbox

Una de las áreas de estudio, la isla de Holbox y la adyacente laguna Yalahau, empieza a experimentar los efectos que conlleva el aumento del turismo. La isla y la laguna se encuentran en el estado de Quintana Roo, al noreste de la Península de Yucatán. La laguna Yalahau, también conocida como la laguna Conil, está localizada en medio de las comunidades pesqueras de Chiquilá al sur, y la isla Holbox al norte, entre los paralelos 21°12'60" y 21°13'60" latitud norte y los meridianos 87°10'80" y 87°12'90" longitud oeste, en el Golfo de México. Esta área es un sitio de reposo y reproducción para el tiburón ballena (*Rhincodon typus*) y muchas otras especies. El ecosistema adyacente a la laguna es un manglar. La laguna está parcialmente aislada del océano por una franja costera, conocida como la isla Holbox. El área de la isla es de aproximadamente 80 km<sup>2</sup>, de forma elíptica y paralela a la costa. Tiene una población de 1200 habitantes (INEGI 2000) y la infraestructura urbana que existe en la isla es limitada. Los caminos no están pavimentados y no hay vehículos motorizados (sólo tricicletas y carros de golf). Los únicos edificios existentes, aparte de las viviendas de los moradores, son pequeñas tiendas locales, mini – supermercados, pequeños hoteles, escuela, Palacio municipal y cabañas. A pesar de esto, el turismo en la isla se desarrolló rápidamente en los últimos 10 años, lo que condujo a una acelerada construcción de nuevos edificios (Tran, 2002). El aumento de la urbanización puede tener un efecto dañino en la calidad del agua en el área. La laguna Yalahau y la isla Holbox forman parte del Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam. El desarrollo no controlado que puede alcanzarse en la isla sólo podría tener un efecto negativo en la laguna y los ecosistemas que la rodean.

Figura 2. Foto aérea de la Isla Holbox



## Puerto Morelos

La región conocida como “Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos” forma parte de la barrera arrecifal denominada “Gran Cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental” que forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano, considerada como la segunda barrera arrecifal más grande del mundo. Así mismo, esta sección de la barrera, ubicada frente a Puerto Morelos, se extiende al norte hasta la colindancia con el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. El arrecife sustenta ricas comunidades biológicas que se encuentran bien conservadas y tienen valor ecológico, económico, recreativo, comercial, histórico, educativo, estético y para investigación, lo que le confiere al área una importancia singular en el contexto nacional. Adicionalmente, la economía del poblado de Puerto Morelos y su área de influencia, depende de su conservación, ya que un alto porcentaje de la población se dedica a la pesca, al turismo y a la investigación sobre el ambiente marino, las cuales están estrechamente influenciadas por la salud del ecosistema.

La comunidad de Puerto Morelos y su arrecife forman parte del corredor turístico, de aproximadamente 120 kilómetros, conocido actualmente como “La Riviera Maya”, ubicado entre Cancún y Tulum en la costa del Caribe del estado de Quintana Roo. Esta zona actualmente es objeto de una acelerada transformación, inducida por los numerosos proyectos turísticos que ahí se desarrollan. Por otro lado, los índices de inmigración-colonización en el área son considerablemente superiores a los registrados en el resto del país.

Por sus características costeras, Puerto Morelos ha sido un antiguo punto de enlace marítimo con la Isla de Cozumel, hacia donde se embarcan productos alimenticios, materiales de construcción, combustibles y otras mercancías que llegan por vía terrestre provenientes de diversas regiones del país.

Puerto Morelos se ha caracterizado, desde la década de los setenta, por la presencia de instituciones, organizaciones y personas dedicadas a actividades de investigación y

conservación de la naturaleza, así como de promoción del uso sustentable de los recursos naturales.

El Parque Nacional "Arrecife de Puerto Morelos", se ubica en la Costa Caribe del municipio de Benito Juárez, frente al poblado de Puerto Morelos en el Estado de Quintana Roo. Sus coordenadas geográficas extremas son: 21°00'00" y 20°48'33" latitud norte y 86°53'14.40" y 86°46'38.94" longitud oeste. Algunas de las especies registradas dentro del Parque Nacional están consideradas bajo algún estatus de protección, como es el caso de los corales cuerno de alce y cuerno de ciervo y de las tortugas marinas.

Actualmente, la delegación Puerto Morelos cuenta con tres comunidades: Central Vallarta, Joaquín Zetina Gasca y Puerto Morelos, que en conjunto tienen una población no mayor a 5000 habitantes.

El clima en la región de Holbox y Puerto Morelos es cálido sub-húmedo, con una temperatura del aire promedio anual de 26.3°C, un máximo en el verano de 32.5°C y una mínima en el invierno de 13° C. Las lluvias son más abundantes en el verano y la humedad relativa promedio anual es de 84%. La zona costera presenta un relieve muy escaso y no hay ríos superficiales. Los vientos alisios dominan, aunque son interrumpidos por "nortes" normalmente de octubre a mayo. La temporada de huracanes comprende los meses de junio a noviembre, de los cuales agosto y septiembre son los meses de más alta incidencia.

La isla Holbox y Puerto Morelos son poblados pequeños, donde impera la calma y la hospitalidad, que además están bordeados por hermosas playas. Asimismo, Puerto Morelos es parte del segundo arrecife más grande del mundo. Ambos lugares cuentan con ecosistemas de manglar, duna y selva. Estos ecosistemas son pilar de la economía de la localidad, que se basa en el turismo y la pesca. En estas zonas es donde llevamos a cabo la investigación para determinar la concentración de metales pesados, utilizando el pasto marino *Thalassia testudinum* como bioindicador.

## OBJETIVOS

- Determinar la concentración de metales pesados en el pasto marino *Thalassia testudinum* procedente de dos zonas de Quintana Roo en la Península de Yucatán: la laguna Yalahau y la costa de Puerto Morelos.
- Comparar los resultados con los previamente reportados para otras zonas, para establecer si existen concentraciones comparativamente altas de estos metales.
- En caso de encontrarse altas concentraciones de metales, determinar las posibles causas.

## HIPÓTESIS

En ambos casos se trata con lugares que forman parte de las Áreas Naturales Protegidas (ANP), por lo que no se efectúan actividades humanas que pudieran actuar en el detrimento del medio ambiente. Con este antecedente, la hipótesis que se plantea es que se trata de sitios que no tienen una concentración comparativamente alta de metales pesados.

En caso de encontrar altas concentraciones, éstas pueden deberse a factores de tipo local (turismo, pesca, disposición de la basura, fertilizantes) o bien a variables globales como las corrientes, que podrían provocar la acumulación de metales provenientes de otras regiones. En particular, si se encuentra que la relación V/Ni está entre 3.25 y 6.78 (Villanueva y Botello, 1992), la contaminación puede provenir de la extracción de petróleo crudo que se realiza en Venezuela y que es arrastrada por las corrientes hasta la zona de estudio.

## ANTECEDENTES

En la Tabla 3 se presentan las concentraciones de algunos metales pesados encontrados en diversas especies de pastos marinos, reportadas previamente por otros autores.

Se puede observar en la siguiente tabla que las concentraciones más altas de Cu son las reportadas por Botello en la laguna de Términos en Campeche, la concentración más alta de Cd fue encontrada en el SAV por Noriega. Para el Ni se encuentra de nuevo la concentración más alta en la laguna de Términos. Con respecto al Zn, encontramos que las concentraciones se encuentran en el mismo intervalo y no existe mucha diferencia entre los datos reportados. Guven cita en Turquía la concentración más alta para el Cr y para la concentración de As sucede algo parecido que con el Zn, donde todas las concentraciones encontradas se encuentran en un intervalo muy cerrado.

Como se observa, existen pocos estudios en relación al pasto marino *Thalassia testudinum*. La mayoría de los estudios provienen de los pastos marinos encontrados en zonas costeras europeas, por lo que es muy importante que se cuente con un estudio sobre el estado del pasto marino en costas mexicanas y sobre todo debido a la biodiversidad de la zona de estudio. Usaremos para la obtención de resultados cuantitativos la técnica de absorción atómica, ampliamente usada para determinaciones de metales pesados y una técnica llamada Particle Induced X – Ray Emission (PIXE).

En el Instituto de Física de la UNAM se cuenta con el equipo necesario para hacer el análisis de metales por la técnica de Emisión de Rayos X inducidos por partículas, PIXE que se basa en el estudio de los Rayos X emitidos a causa de la interacción entre el ión incidente y los electrones atómicos de la muestra. La técnica PIXE es idónea porque es “multielemental simultánea”, lo que permite la detección de todos los elementos del sistema periódico a partir del sodio. Se pueden detectar a la vez muchos elementos incluyendo aquellos de especial relevancia en estudios

Tabla 3. Concentración de Metales Pesados en diversos pastos marinos encontrados por diferentes autores.

Sitio	Especie		Cu ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Cd ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Ni ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Zn ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Co ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Cr ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Pb ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	As ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Referencia
EUA	<i>Thalassia testudinum</i>	h	0-25	--	0-4.5	--	0-7.0	0-8.0	0-5.0	--	Montgomery y Price 1979
Golfo de México	<i>Thalassia testudinum</i>	h	13	--	11	18	--	--	--	--	Botello 1993, No publicado
		r	20	--	8	21	--	--	--	--	
Turquía	<i>Zostera marina</i>		--	--	--	--	--	13.6	32.1	--	Güven <i>et. al.</i> 1993
Golfo de México	<i>Thalassia testudinum</i>	h	--	--	--	--	--	--	--	1.84	Fourqurean y Cal, 2001
EUA	<i>Thalassia testudinum</i>	h	7.1	--	--	24.6	--	--	1.21	1.97	Whelan <i>et. al.</i> , 2005
		r	4.9	--	--	23.4	--	--	1.2	1.21	
Australia	<i>Zostera capricorni</i>	h	11.5	--	--	--	--	5	--	--	Prange, J.A. y W.C. Denison, 2000
		r	2.1	--	--	24.2	--	12.8	--	--	
Indonesia	Nueve especies	h	3.9-7	0.16-0.68	--	15-24	--	--	1.7-2.8	--	Nienhuis, P.H. 1986
		r	2.6-6.8	0.12-0.25	--	6.0-27.0	--	--	1.1-6.1	--	
Sistema Arrecifal Veracruzano	<i>Thalassia testudinum</i>	h	2.8	1.3	7.7	41.6	--	--	8.7	--	Norlega, 2001
		r	1.4	--	2.2	32.8	--	--	7.5	--	

h = hojas

r = raíz y rizoma

medioambientales, como son el vanadio (V), el níquel (Ni), el cobre (Cu), el zinc (Zn), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg), el arsénico (As) y plomo (Pb). Los límites de detección son del orden de partes por millón (ppm), con poca variabilidad de elemento a elemento. Además, la cantidad de muestra requerida para el análisis es pequeña (menos de 1 mg) con una buena precisión. La técnica no es destructiva y es de fácil automatización, como se explica con detalle en el Apéndice I.

El análisis por espectroscopia de absorción atómica en horno de grafito se realizó en la Facultad de Química de la UNAM, con la colaboración de la Dra. Liliana Saldivar.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### SITIOS DE MUESTREO

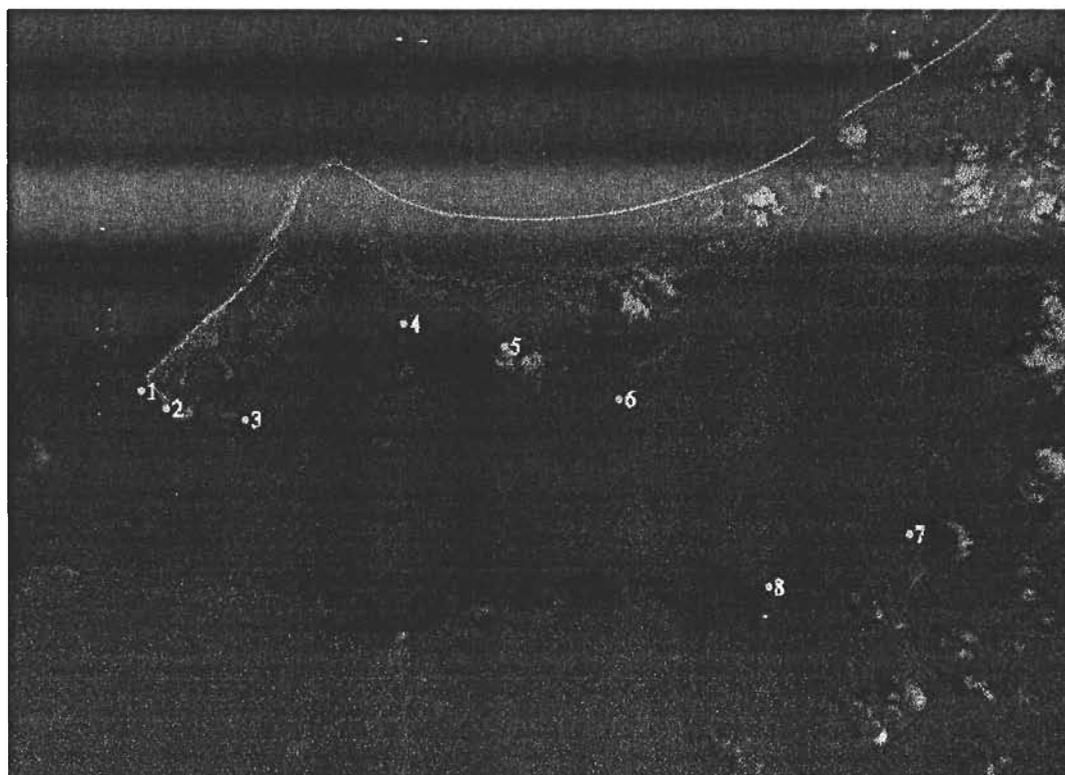
#### Isla Holbox y Puerto Morelos

Como se explicó en la Introducción, el área de estudio está ubicada en las inmediaciones de la isla Holbox, en diferentes puntos de la laguna Yalahau y en las costas de Puerto Morelos. Las dos localidades se encuentran en la Península de Yucatán. Los sitios de muestreo en Holbox son lugares muy conocidos por la comunidad e incluso se han realizado estudios de la calidad de agua de la región a través del muestreo en esa misma zona. En la Tabla 4 se reportan los datos específicos de los sitios de muestro, y en la Figura 3 se muestran los sitios con respecto a su posición geográfica.

Tabla 4. Localización y nombre común de los sitios donde se realizó el muestreo del pasto marino *Thalassia testudinum*.

Sitio	Nombre	Localización	Profundidad (m)
1	Isla Pasión	N 21°30.997' W 87°23.880'	2.5
2	Basurero	N 21°30.255' W 87°23.525'	1.8
3	Boya Recalada	N 21°29.890' W 87°22.208'	1.2
4	Isla Pájaros	N 21°31.044' W 87°19.248'	1.4
5	Punta Catalán	N 21°60.427' W 87°17.576'	50 cm
6	<i>En medio Laguna</i>	N 21°29.291' W 87°15.776'	1.1
7	Yalikin	N 21°26.351' W 87°11.174'	1.2
8	Río Bomba	N 21°25.847' W 87°13.742'	Somero

Figura 3 .Foto aérea de la Isla Holbox, con los sitios de muestreo georeferenciados.



En Puerto Morelos, la recolección de muestras se llevó a cabo a lo largo de la playa a profundidades no mayores de 2 m. En este caso se tomaron cuatro muestras en diferentes puntos en la playa cercana a la comunidad. El primer sitio localizado enfrente del Faro, el segundo en el primer muelle (aprox. A 70 m del Faro), el tercero en el muelle llamado Pasión y la última muestra fue tomada a 100 m de la intersección de la calle principal con la playa. Para nuestro estudio sólo contamos con los resultados obtenidos del primer y último sitio.

## RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

La colecta de muestras se llevó a cabo durante dos muestreos en Holbox, comprendidos en los meses de julio y octubre de 2004 y un muestreo en Puerto Morelos realizado en el mes de julio del mismo año. Las muestras fueron recolectadas del sustrato manualmente, tomando alrededor de 50 g. Sólo se seleccionaron las de apariencia saludable y con poco material adherido a la planta. Las epifitas calcáreas se retiraron manualmente. En cada sitio nos aseguramos de tomar las plantas separadas por lo menos 10 metros una de otra y las colocamos en una bolsa debidamente marcada con el sitio del cual provenían. Esto limita los cálculos de las medidas de dispersión, pero asegura la independencia y aleatoriedad de las muestras, con lo que podemos considerar que son representativas.

Una vez tomadas las muestras, se lavaron en agua del medio separando las hojas de la raíz y el rizoma y se colocaron en bolsas de polietileno debidamente marcadas.

Todas las muestras se secaron bajo los rayos del Sol y se trasladaron secas al laboratorio para su análisis, donde se colocaron en la estufa para evaporar el agua residual. Esta forma de secar las muestras es más sencilla porque no se descomponen, el traslado es más simple y se gasta menos energía eléctrica durante el secado.

## PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Todas las muestras de julio y octubre se secaron en la estufa a 50°C por 48 horas, hasta peso constante. Las muestras secas se molieron en un molino de café y se tamizaron para obtener un tamaño de partícula homogéneo. El residuo contenido en el tamiz se usó para preparar tabletas de aproximadamente 500 mg, que fueron las que se utilizaron para el análisis. Se elaboraron 3 réplicas por muestra.

## ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Se utilizaron dos técnicas de análisis, que se explican con detalle en el Apéndice I y II. Todas las muestras se analizaron mediante la técnica PIXE (Particle Induced X-ray Emission) y algunas seleccionadas se analizaron por medio de absorción atómica (AA), para comparar los resultados. El análisis con PIXE se llevó a cabo con el acelerador PELETRON NEC 9SDH de 3 MV del Instituto de Física de la UNAM. Los blancos gruesos fueron bombardeados al aire con protones de 3 MeV con una corriente de 50 nA durante 5-10 minutos.

Los rayos X emitidos fueron detectados con un detector de germanio Canberra LEGe. Debido a que este trabajo sólo se basó en la detección de elementos pesados y traza fue necesario colocar un filtro de aluminio de 38  $\mu\text{m}$  de espesor frente al detector para disminuir los conteos en la parte de baja energía del espectro de PIXE. La calibración del sistema de detección se llevó a cabo utilizando pastillas de material certificado de sedimento lacustre Buffalo River NIST AIEA SL-7 y Peach Leaves NIST 1547a.

Además de las determinaciones por PIXE, se realizó una digestión ácida de tres sitios de Holbox (Sitio 2, Sitio 4 y Sitio 7) y dos de Puerto Morelos (Sitio 1 y Sitio 4), ambos del muestreo de julio y se determinó su concentración por espectrofotometría de absorción atómica en horno de grafito. Esto se realizó en la Facultad de Química de la UNAM.

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para validar los resultados de los análisis, en la Tabla 5 se muestran los valores que se obtuvieron para la muestra de referencia, mismos que se utilizaron en la calibración de las mediciones por PIXE. También se reporta el porcentaje de recuperación. En la Tabla 6 se muestran las concentraciones del estándar de cada metal y las absorbancias obtenidas en cada caso, con las cuales se obtuvieron las curvas de calibración. Para la absorción atómica, al final de la tabla se reportan los coeficientes de correlación, que son aceptables en todos los casos. Como se puede observar, se tiene un alto porcentaje de recuperación, con lo cual se establece que las mediciones son confiables.

Con el fin de demostrar la equivalencia de los métodos se muestra en la Tabla 7 y en la Figura 4 la concentración de cromo obtenida mediante el análisis por PIXE y por absorción atómica de tres muestras de *Thalassia testudinum*. Las muestras pertenecen al mismo sitio físico y corresponden al mismo muestreo, pero no se realizó el análisis sobre la misma muestra. De lo observado en la figura se demuestra que los resultados son comparables y del mismo orden de magnitud. Se espera que estos no sean exactamente iguales debido a que no se trata de la misma muestra, pero tienen que estar dentro del mismo orden de magnitud. En este caso se observa cierta dispersión de los datos, pero se considera dentro de lo esperado ya que son muestras de sistemas biológicos que, como se sabe, normalmente presentan una gran dispersión.

**Figura 4. Comparación entre Métodos  
(Concentración encontrada de Cromo en ppm)**

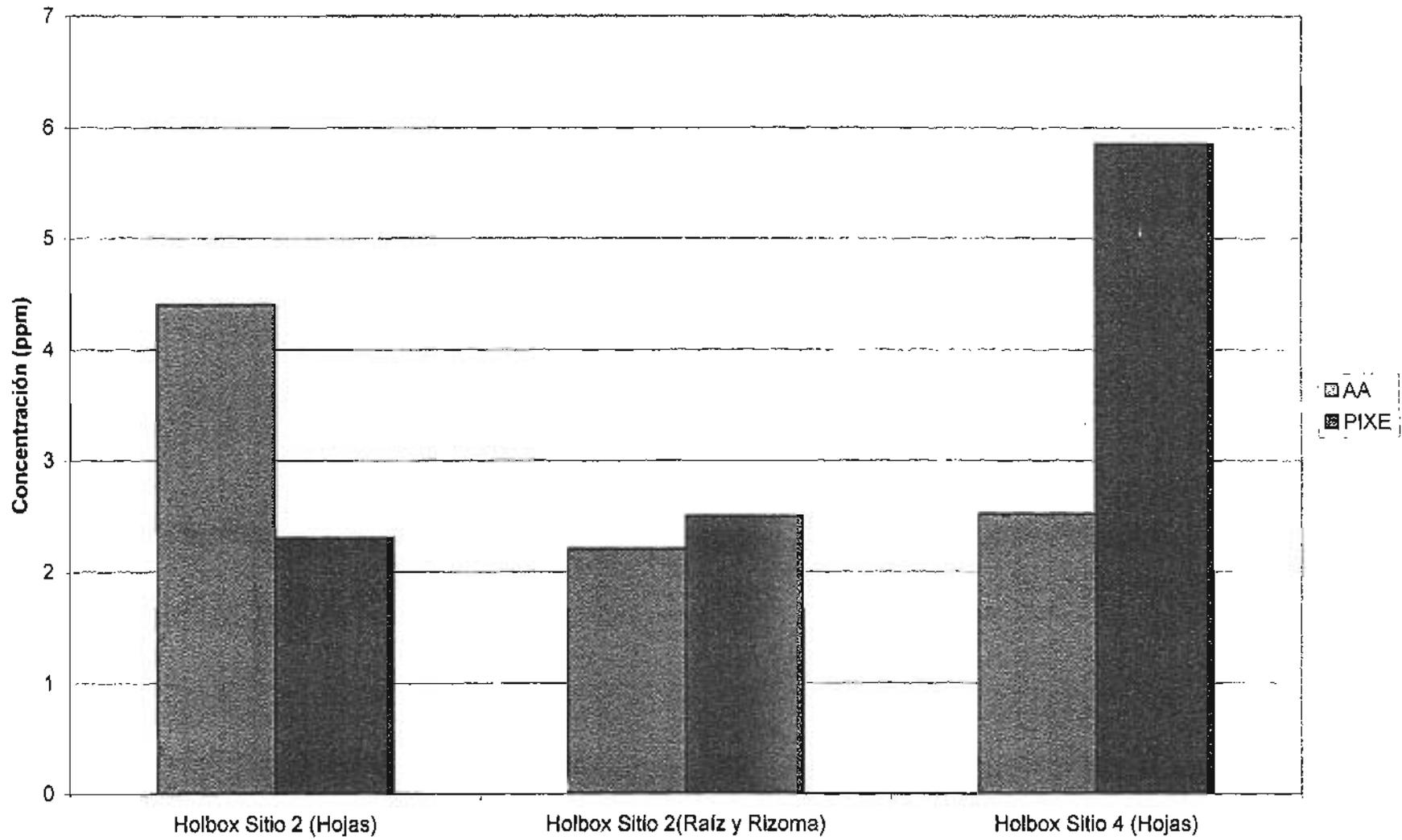


Tabla 5. Porcentaje de recuperación en trazas de hojas de durazno y sedimento lacustre Buffalo.

Hojas de Durazno NIST 1547a			
Elemento	Certificado ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Observado PIXE ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	%Recuperación
Mn	98(4.9)	98(19)	100
Fe	218(10)	216(19)	99.1
Ni	0.69(0.03)	1.4(0.26)	202.9
Cu	3.7(0.19)	4(1.7)	108.1
Zn	17.9(0.9)	20.3(0.6)	113.4
Br	11*	10.4(1.6)	94.5
Sr	53(2.65)	58.2(9.6)	109.8
Sedimento Lacustre Buffalo Estándar AIEA SL-7			
Elemento	Certificado ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Observado PIXE ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	%Recuperación
V	95(4)	107.73(16.1595)	113.4
Cr	135(5)	108.2(16.23)	80.1
Mn	555(19)	550.7(82.6)	99.2
Fe	42100(1000)	42881.6(6432.24)	101.9
Co	14(0.6)	18.3(2.745)	130.7
Ni	44.1(3)	42.8(6.42)	97.0
Cu	98.6(5)	104.4(15.66)	105.9
Zn	438(12)	445.2(66.78)	101.6
Ga	15*	17.9(2.685)	119.3
As	23.4(0.8)	24.8(3.72)	106.0
Br	7*	10(1.5)	148.8
Rb	100*	105.7(15.855)	105.7
Sr	130*	140.6(21.09)	108.2
Pb	161(17)	171.9(25.785)	106.8

\* No certificado

Tabla 6. Curva de calibración usada para la determinación de las muestras problema en Absorción Atómica.

Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Abs	Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Abs	Cr ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Abs
5	0.059	4	0.204	3	0.057
10	0.109	8	0.371	6	0.111
15	0.135	12	0.527	9	0.171
20	0.178	16	0.644	12	0.237
25	0.222	20	0.718	15	0.299
r = 0.9965		r = 0.9892		18	0.348
r = 0.9992					

Tabla 7. Determinación de la concentración de cromo ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) en *Thalassia testudinum* por las técnicas de PIXE y A.A. en dos sitios de Holbox

Método	Sitio 2 (Hojas) ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Sitio 2 (Raíz y rizoma) ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Sitio 4 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
AA	4.40	2.2	2.52
PIXE	2.30	2.5	5.85

Con base en los resultados anteriores podemos considerar que los valores obtenidos por PIXE son comparables a los obtenidos por medio de absorción atómica, por lo que se continuará la discusión con los resultados obtenidos por PIXE. En el caso de elementos como Cd y Hg, los resultados se obtuvieron mediante absorción atómica ya que no fue posible determinar su concentración con los detectores usados en PIXE debido a las condiciones en que se realizó el estudio. Cabe señalar que el objetivo de este trabajo es realizar un diagnóstico acerca de la concentración de ciertos metales pesados en dos zonas del Caribe mexicano, por lo tanto los resultados se usarán para un estudio comparativo.

En la Figura 5 se muestran nuevamente los ocho sitios georeferenciados donde realizamos los muestreos durante los meses de julio y octubre. En la Tabla 8 y las Figuras 6 y 7 se mencionan los resultados del análisis de metales pesados en *Thalassia testudinum* de las muestras recolectadas en esos muestreos. La Figura 6 corresponde a hojas, mientras que la Figura 7 muestra los resultados para raíz y rizoma.

Figura 5 .Foto aérea de la Isla Holbox, con los sitios de muestreo georeferenciados.

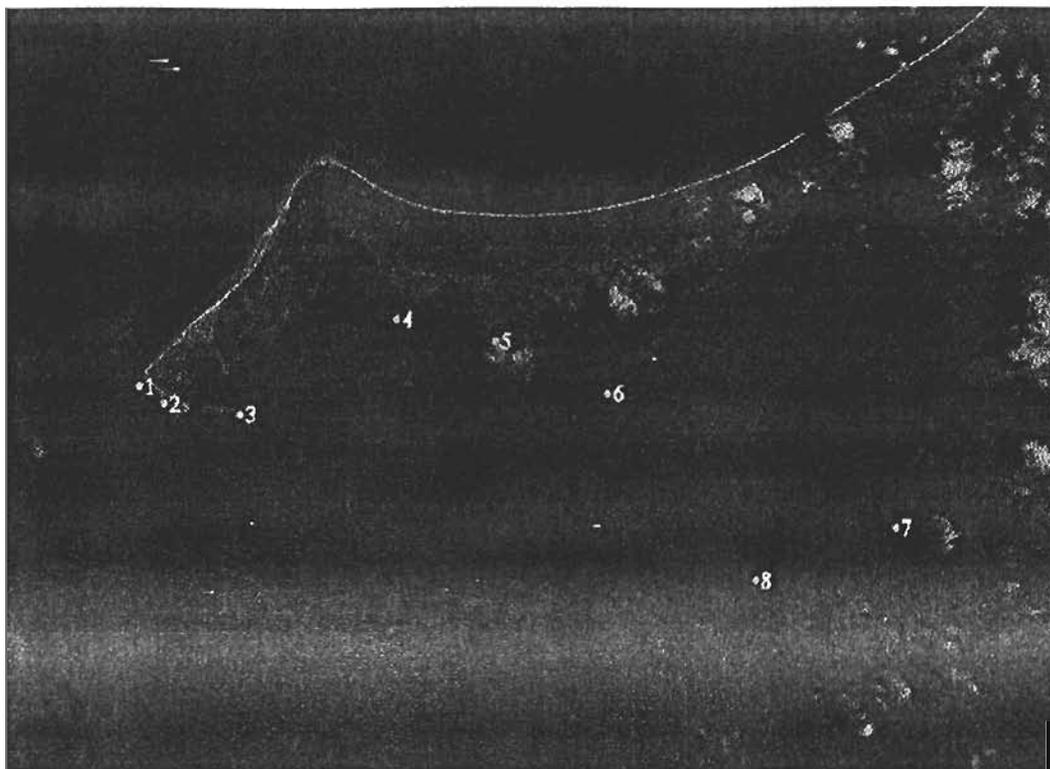


Tabla 8. Promedio de concentración de metales pesados ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) en *Thalassia testudinum* de los 8 sitios muestreados en la laguna Yalahau en dos tiempos de muestreo.

Metal	Julio				Octubre			
	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )		Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )		Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )		Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	
	Promedio	$\sigma$	Promedio	$\sigma$	Promedio	$\sigma$	Promedio	$\sigma$
V	3.16	2.7	5	2.9	4.2	4.4	3.1	3.4
Cr	4.40	2.9	4.2	1.3	3.5	4.7	7.7	6.6
Co	4.91	5.1	3.2	3.7	3.1	1.5	2.7	2.2
Ni	3.04	2.3	2.2	1.1	3.2	1.4	4.7	3.1
Cu	8.66	3.9	8.2	3.4	6.9	1.1	6.1	3.7
Zn	28.46	16.5	16.7	5.7	9.7	2.9	8.4	5.1
As	2.97	2.1	2.5	2.1	3.3	1.9	2	1.8
Pb	7.03	5.51	6.01	2.80	7.17	5.59	4.19	2.03

$\sigma$  = Desviación estándar

Figura 6. Concentración de metales en hojas de *Thalassia testudinum* en la laguna Yalahau

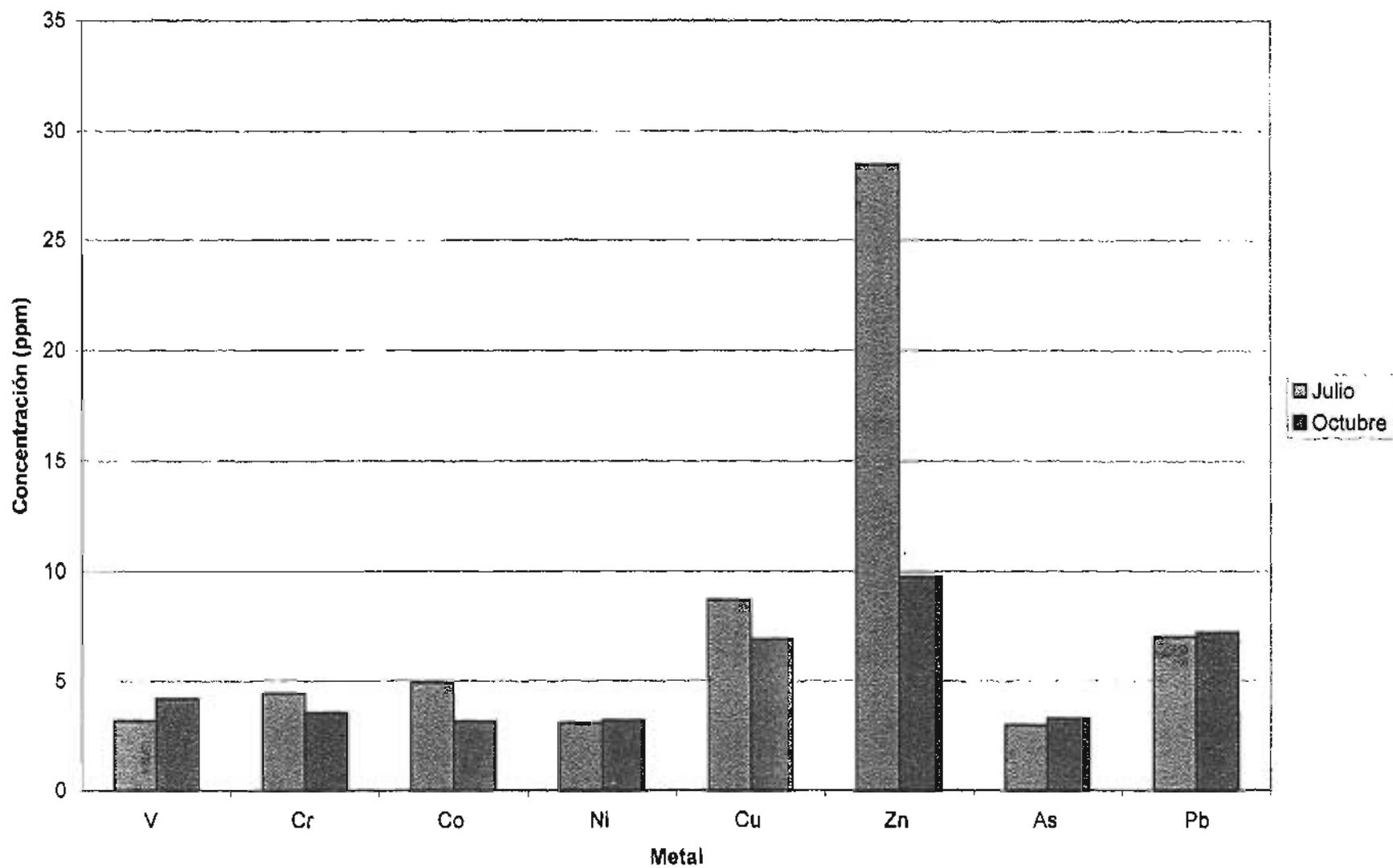
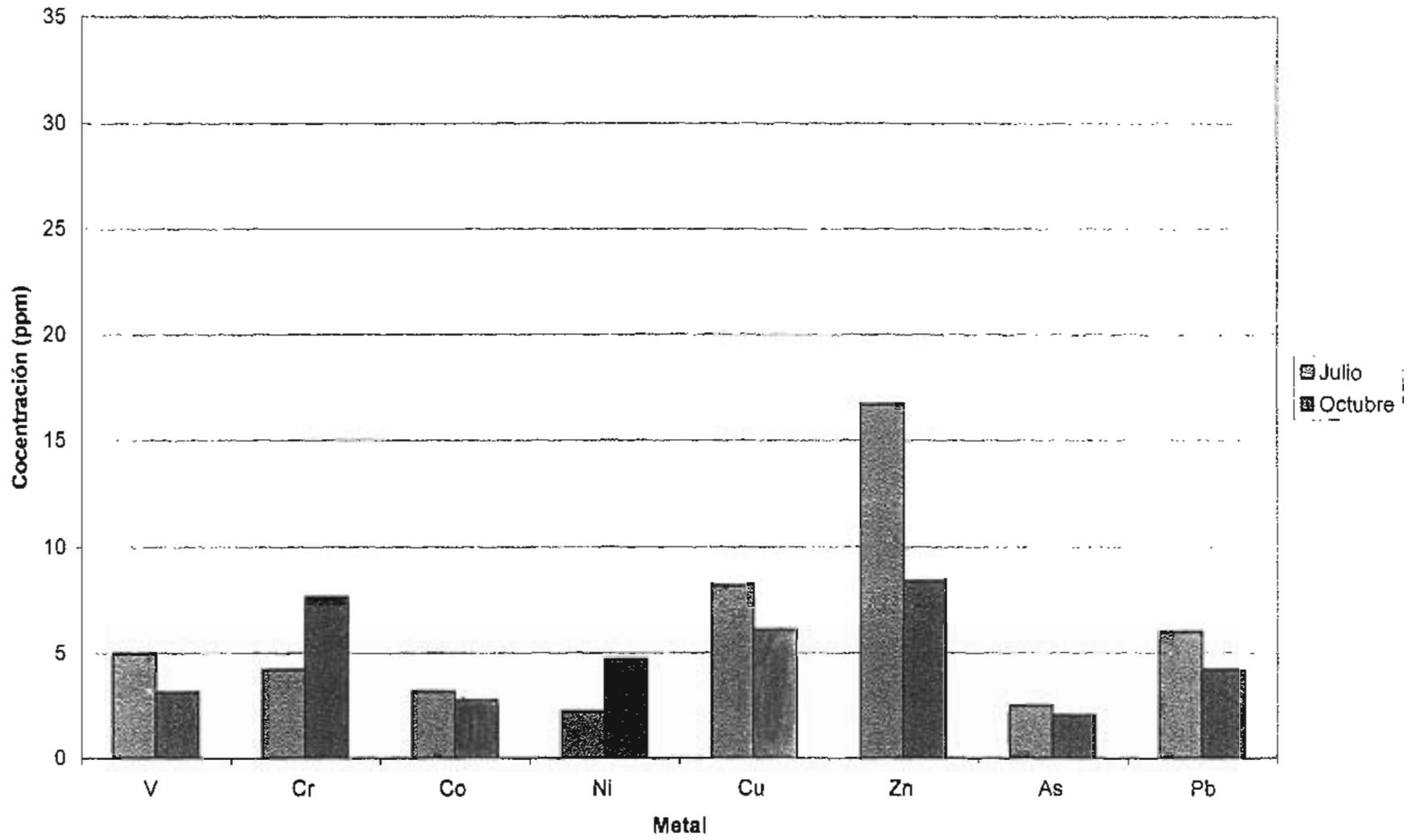


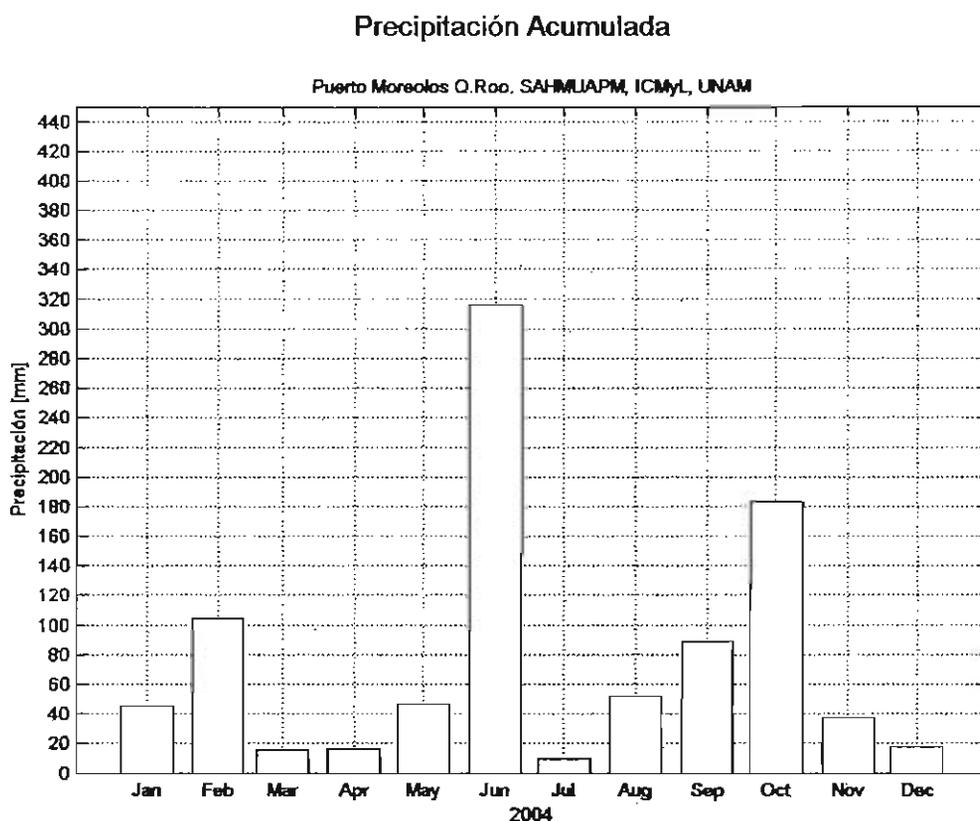
Figura 7. Concentración de metales en raíz y rizoma de *Thalassia testudinum* en la laguna Yalahau



Recordemos que si la relación  $V/N_i$  se encuentra entre 3.25 y 6.78 existe una posible contaminación por la extracción de petróleo crudo proveniente de la zona de Venezuela. De los datos de la Tabla 8 se observa que, en hojas para el mes de julio esta relación es de 1.04 y para el mes de octubre 1.31, mientras que para raíz y rizoma la relación en julio es de 2.27 y para octubre es de 0.66. Con esto podemos concluir que no existe influencia de la extracción de petróleo crudo en la zona de estudio.

Con el fin de asignar un comportamiento estacional a los muestreos realizados en este estudio, contamos con los datos reportados por el Servicio de Hidrografía y Meteorología de la Unidad Académica de Puerto Morelos (SAHMUAPM) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), UNAM – CARICOMP los cuales indican que durante el mes de junio se reportó mucha precipitación (más de 300 mm), en julio se reportó poca precipitación (10 mm), mientras que para el mes de octubre se reportó una precipitación media de 180 mm, todo citado para la zona de Puerto Morelos. Lo anterior puede observarse en la Figura 8. Esta zona suponemos que tiene la misma tendencia que en Holbox. Así se puede estimar que el muestreo de julio se identifica con un periodo de lluvias seguido por uno de secas, mientras que el de octubre se identifica con un periodo de lluvias.

Figura 8. Precipitación Acumulada en el año 2004 para la localidad de Puerto Morelos.



Volviendo a los datos de la Tabla 8, y las Figuras 6 y 7, en general se puede decir que la concentración en hojas de octubre es menor que las de julio, para casi todos los elementos menos V, Ni, Pb y As. Para el V el cambio es mayor, encontrando más concentración en las hojas de octubre. Para los otros tres la diferencia entre los resultados de cada muestreo es muy pequeña. Para las raíces y rizomas, la concentración de octubre es menor que la de julio, salvo para el cromo y el níquel.

Los estudios de contaminación por metales pesados en zonas costeras muestran que, en general, durante la época de lluvias la concentración de contaminantes aumenta debido a un crecimiento en las escorrentías. El agua que fluye hacia el mar arrastra metales y contaminantes a su paso. En estos muestreos no se observa aumento de la concentración en la época de lluvias (muestreo de octubre), salvo en el caso de la concentración de Cr y Ni, que presentan un aumento en la concentración de metales

en la raíz y el rizoma de octubre y V que está presente en mayor cantidad en las hojas de octubre. Esto podría indicar una posible contaminación debida a estos tres metales. Sin embargo, este patrón no se observa en todas las partes de la planta, es decir, cuando se presenta en hojas no lo hace en raíces y rizomas y viceversa. Además y como veremos más adelante, al comparar estos resultados con el de otros autores no se puede decir que representen un problema de contaminación.

De manera global, el cambio más notable tanto en hojas como raíz y rizoma, se observa en la concentración de Zn. El Zn es un micronutriente importante. Lo que observamos es una disminución de la cantidad de zinc en el pasto proveniente de las muestras de octubre. Esto muestra una menor actividad metabólica del pasto durante este mes. Una posible explicación es que el zinc llegó al ambiente marino a través de las escurrientías después de las lluvias de junio y fue rápidamente asimilado por el pasto. Esto incrementó su actividad metabólica y con ello los niveles de Zn presentes en la *Thalassia testudinum* del mes de julio. Las lluvias de septiembre y octubre no fueron tan altas como las de junio, con lo cual la concentración de zinc en la laguna Yalahau fue menor y se refleja en la cantidad que se encuentra en los pastos marinos. Para corroborar esta hipótesis, se realizan estudios de la densidad y del estado biológico de las muestras de pastos de julio y octubre en colaboración con investigadores del CINVESTAV – Mérida.

Resulta de especial interés el Sitio 2 localizado en la salida del basurero de la población de Holbox, por su cercanía a la comunidad y por el posible efecto de la misma en el ambiente marino. Este basurero está abierto al aire y cercano a la laguna Yalahau. Por lo tanto se piensa que de encontrarse en el Sitio 2 altas concentraciones de los metales bajo estudio, que puede deberse al basurero de la comunidad. Los resultados para el Sitio 2 se presentan en la Tabla 9 y en las Figuras 9 y 10

Figura 9. Concentración en Hojas de *Thalassia testudinum* en el Sitio 2 de Holbox

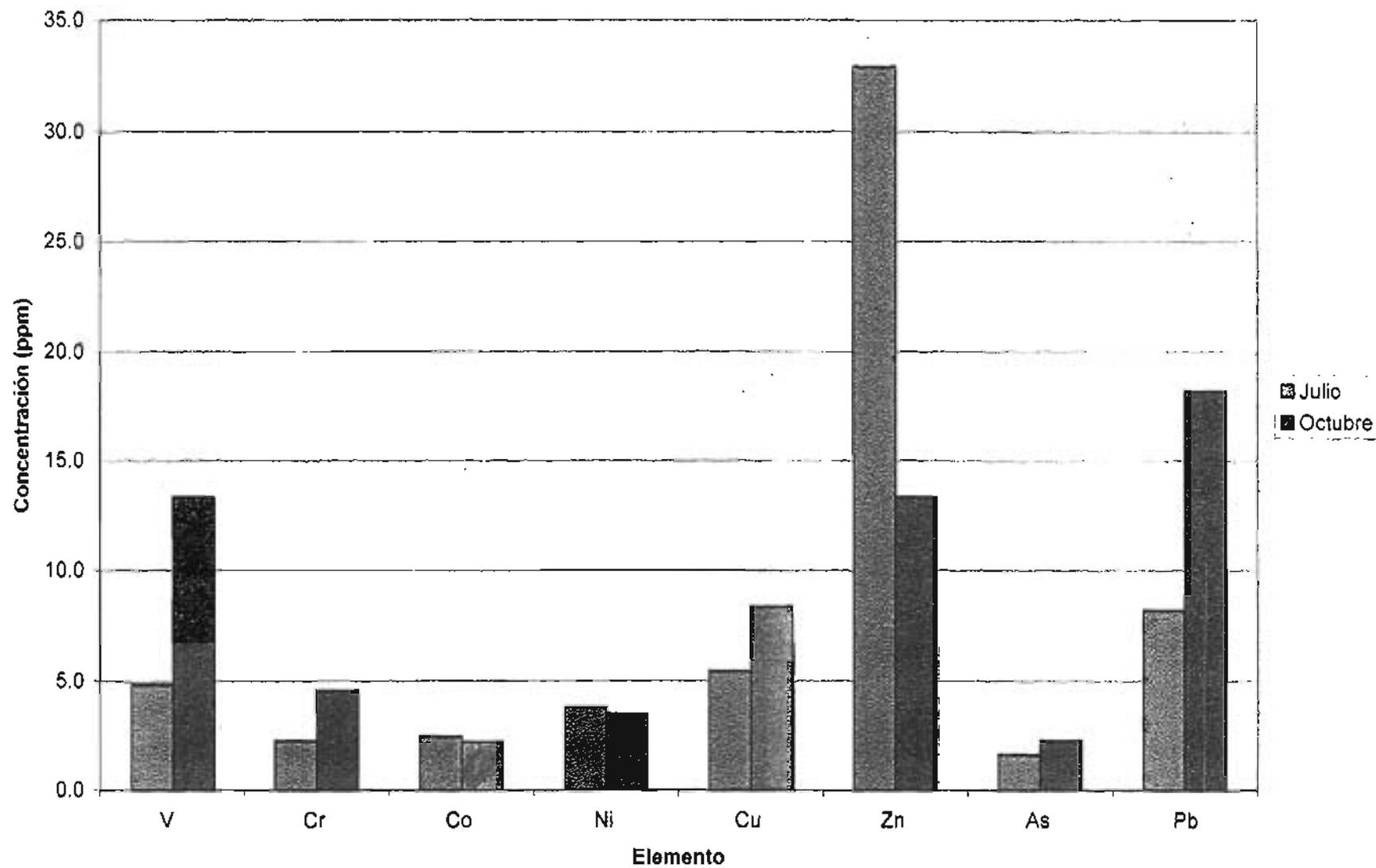


Figura 10. Concentración en Raíz y rizoma de *Thalassia testudinum* en el Sitio 2 de Holbox

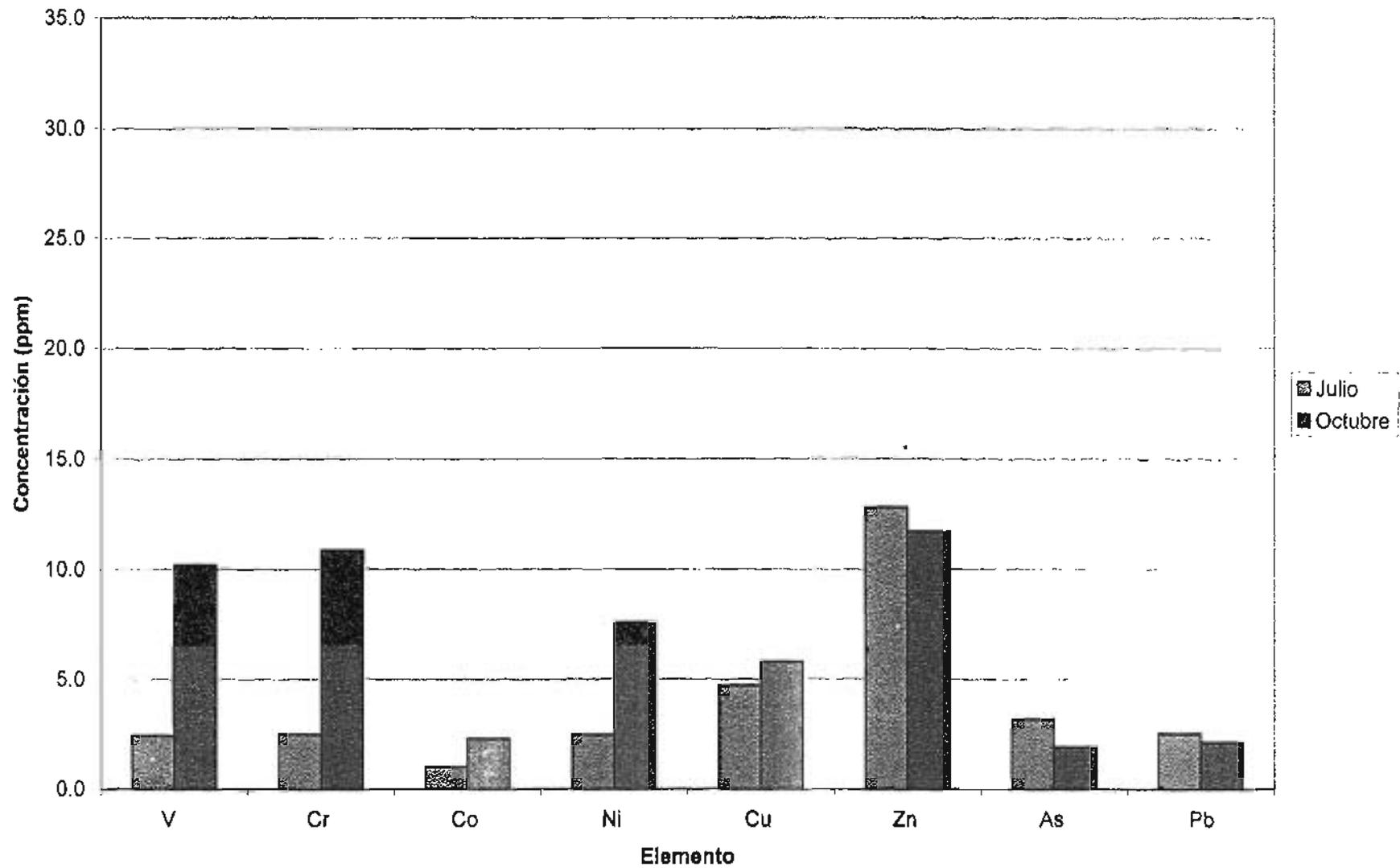


Tabla 9. Concentración de metales pesados ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) en *Thalassia testudinum* en el Sitio 2 (basurero)

Metal	S2-Julio				S2- Octubre			
	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )		Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g}$ )		Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )		Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g}$ )	
	Promedio	$\sigma$	Promedio	$\sigma$	Promedio	$\sigma$	Promedio	$\sigma$
V	4.9	2.0	2.4	3.9	13.3	2.6	10.1	2.1
Cr	2.3	3.3	2.5	3.2	4.6	5.5	10.8	3.2
Co	2.5	2.5	1.0	1.2	2.2	2.9	2.3	0.2
Ni	3.8	2.0	2.5	1.8	3.5	0.4	7.5	2.2
Cu	5.5	0.5	4.7	2.2	8.4	1.8	5.8	0.3
Zn	32.9	13.3	12.8	2.6	13.3	0.8	11.7	3.9
As	1.62	2.05	3.15	1.41	2.3	0.3	1.9	0.4
Pb	8.20	1.84	2.49	2.21	18.2	—	2.1	1.9

Se observa que el zinc es el que se encuentra en mayor concentración en julio, lo que concuerda con lo presentado a lo largo de la laguna Yalahau. El vanadio, el cromo y el cobre muestran una mayor concentración en octubre que en julio, tanto en hojas, como en raíz y rizoma. En las hojas de julio hay prácticamente la misma cantidad de Co y Ni que en las hojas de octubre, mientras que en raíz y rizoma se encuentra una mayor concentración de estos metales en las muestras de octubre que en las de julio. El arsénico y el plomo se encuentran en una mayor concentración en raíz y rizoma de la muestra de julio que en octubre, mientras que para las hojas la situación es inversa.

Los análisis en sistemas biológicos presentan una gran cantidad de variables no controlables y por lo tanto presentan una gran dispersión. No se cuenta con valores oficiales para *Thalassia testudinum* que determinen si la concentración encontrada de metales representa un riesgo al ecosistema o a la salud humana, por lo que se considera necesario comparar los valores encontrados en este estudio con otros citados anteriormente por otros autores. Con ésto se logra tener un diagnóstico de las zonas. Dada la importancia de la comparación, se hará de manera individual para cada uno de los metales. Aunado a la comparación con otras fuentes, se comparan el Sitio 2, de gran importancia dada su cercanía con el basurero, con el promedio de los 7 sitios restantes de la laguna Yalahau. De esta manera podremos observar tendencias y detectar la influencia de la comunidad de Holbox.

## Níquel

En la Tabla 10 y en la Figura 11 se reporta la concentración de Ni encontrada en este trabajo. Para la comparación se presentan los datos reportados por otros autores. Las muestras de Noriega pertenecen a un análisis realizado en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) y las muestras de Botello pertenecen a la Laguna de Términos en Campeche.

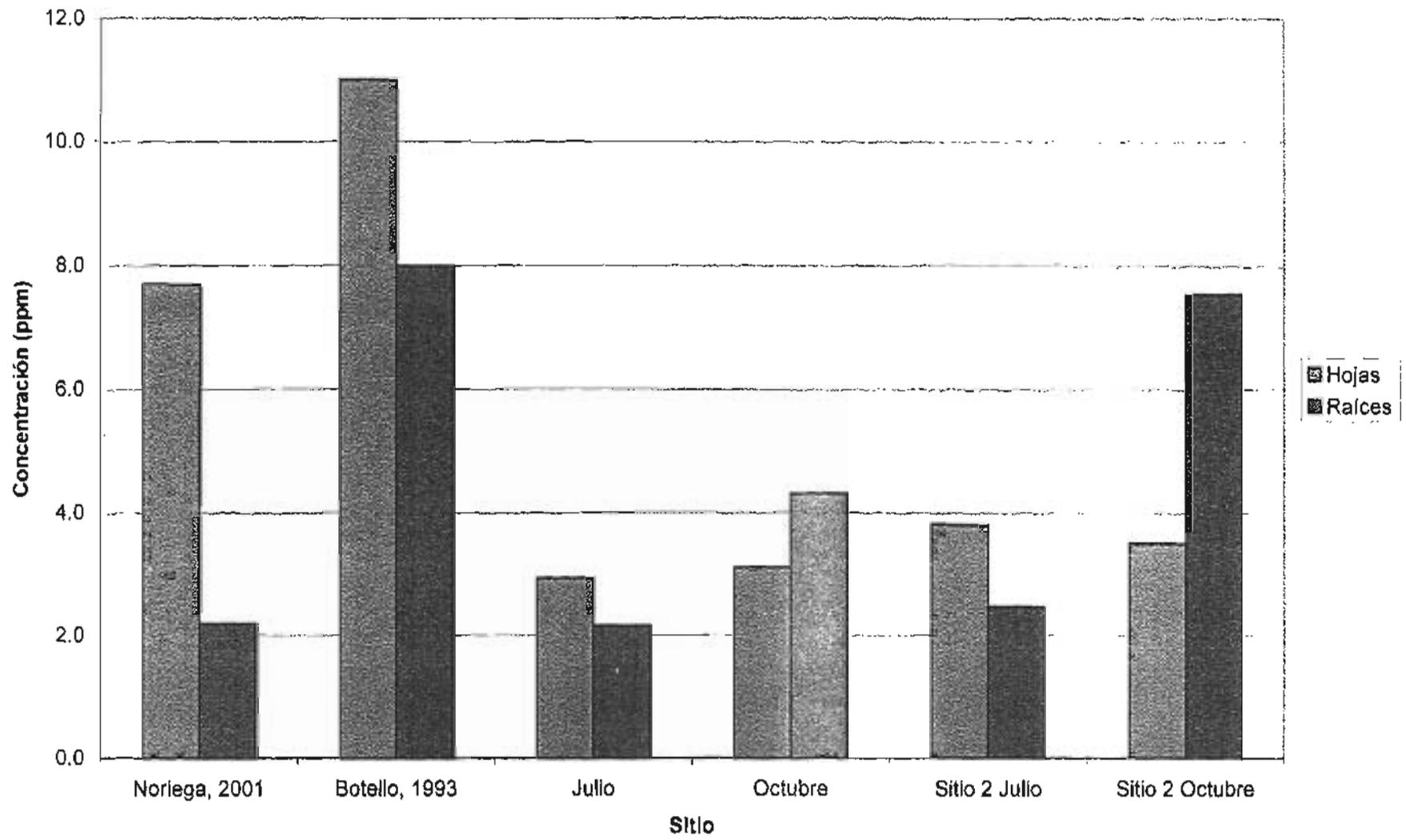
Las muestras de julio y octubre corresponden a la concentración promedio de los 7 sitios de muestreo (todos menos el sitio 2).

Como se observa en la figura y en la tabla, en la raíz y el rizoma la concentración de Ni en octubre es casi el doble que la concentración en julio. Sin embargo, la concentración en raíz y rizoma del Sitio 2 es tres veces mayor en octubre que en julio. En las hojas no se observan estos cambios asociados con la época del año, siendo similar la concentración encontrada en los dos muestreos.

Cabe recordar que en octubre hubo más precipitación, con lo cual hay más escorrentías que en el mes de julio. El incremento en la cantidad de Ni que se encuentra en octubre puede deberse a esta condición. Si el Ni es un contaminante que proviene del basurero, en la época de lluvias este metal llegará más fácilmente al mar, con lo cual se explican los resultados que encontramos.

Según lo reportado por Noriega, con las concentraciones que se encontraron para el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), determina que ese ecosistema se encuentra contaminado. Las concentraciones en este trabajo se mantienen por debajo cuando se observan las hojas. En cambio, si se toman en cuenta la raíz y el rizoma, se observa que las obtenidas en los 7 sitios en octubre y las tomadas en el Sitio 2 son mayores que en el SAV, por lo que se puede decir que existe un enriquecimiento de este metal en el sedimento. Sin embargo, las concentraciones más altas fueron encontradas por Botello en una zona altamente contaminada por derrames de petróleo, como es la Laguna de Términos en Campeche. Con estos resultados podemos decir que se

Figura 11. Concentración de níquel encontrada por diversos autores en comparación con el estudio presentado.



encontró enriquecimiento del sedimento con níquel acentuado en la zona del basurero, y que la situación se acerca a la que se encuentra en la Laguna de Términos. Cabe mencionar que el níquel se utiliza en la fabricación de baterías portátiles, por lo que el enriquecimiento en la muestra de octubre de las raíces del Sitio 2 puede provenir de las pilas y baterías de deshecho.

Tabla 10. Concentración de níquel ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) encontrada por este trabajo y otros autores.

Estudio	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
Noriega, 2001	7.7	2.2
Botello, 1993	11	8
Julio	2.9	2.2
Octubre	3.1	4.3
Sitio 2 Julio	3.8	2.5
Sitio 2 Octubre	3.5	7.5

## Zinc

En la Tabla 11 y en la Figura 12 se reporta la concentración de Zn encontrada en este trabajo. Se presentan de nuevo los trabajos realizados por Noriega y Botello, el trabajo presentado por Whelan III corresponde a la parte baja de Laguna Madre, Prange y Denison reportan lo encontrado en dos centros urbanos costeros de Queensland en Australia y Nienhuis reporta niveles base de metales pesados en pastos marinos de Indonesia.

En todos los estudios previos y en el presente estudio se observa una tendencia de este elemento a acumularse más en hojas que en raíz y rizoma, con la excepción de los realizados por Botello y Nienhuis. Se puede observar también que las concentraciones obtenidas en el Sitio 2 son más altas que las del promedio de los 7 sitios, tanto en julio como en octubre, y tanto en hojas como en raíz rizoma. Esto puede deberse a la eutrofización del ambiente por la basura que se filtra del basurero.

El zinc llega al ambiente marino a través de las escurrentías después de las lluvias de junio, y es rápidamente asimilado por el pasto. Esto incrementa su actividad metabólica y con ello los niveles de Zn presentes en la *Thalassia testudinum* del mes de julio. Las lluvias de septiembre y octubre no fueron tan altas como las de junio, con lo cual la concentración de zinc en la laguna Yalahau fue menor, y esto se refleja en la cantidad que se encuentra en los pastos marinos. En caso de que el enriquecimiento de este metal en el ambiente marino fuera de manera natural, su fuente sería el desgaste de minerales y suelos (EPA – Australia, 1995). Sin embargo, se sabe que la zona del Caribe es oligotrófica por lo que los nutrientes deben provenir de fuentes externas. Debido a que en la temporada de lluvias se presenta una mayor erosión, la viabilidad del pasto para concentrar este metal aumenta. Aquí en julio se presenta una mayor concentración que en octubre, porque la precipitación tuvo un máximo anual en el mes de junio, poco antes del primer muestreo del 2004. Debido a esto se observa mayor concentración durante el mes de julio.

Nienhuis reporta valores base para nueve especies de pastos marinos en climas tropicales. Como se observa, esos valores son menores que los publicados por Noriega en 2001, quien concluye que el SAV es un ecosistema contaminado al igual que Botello en la laguna de Términos. Los resultados obtenidos en las hojas de los 7 sitios de la laguna Yalahau y del Sitio 2 en julio muestran valores mayores a los de referencia de Nienhuis y a los reportados por Whelan III para un sitio que reporta como no contaminado, pero menores en todos los casos a los publicados por Noriega. Las hojas de octubre y las raíces y rizomas de todas las muestras tienen concentraciones por debajo de los valores de referencia de Nienhuis. Prange y Denison reportan lo encontrado en sitios urbanizados, lo que nos dice que existen desechos de origen antropogénico en el sistema hidrológico. Los resultados encontrados en este estudio son menores en todos los casos a los encontrados por Prange y Denison, con lo cual podemos concluir que existe poca contaminación de este micronutriente debido a actividades antropogénicas.

**Figura 12. Concentración de zinc encontrada por diversos autores en comparación con el estudio presentado.**

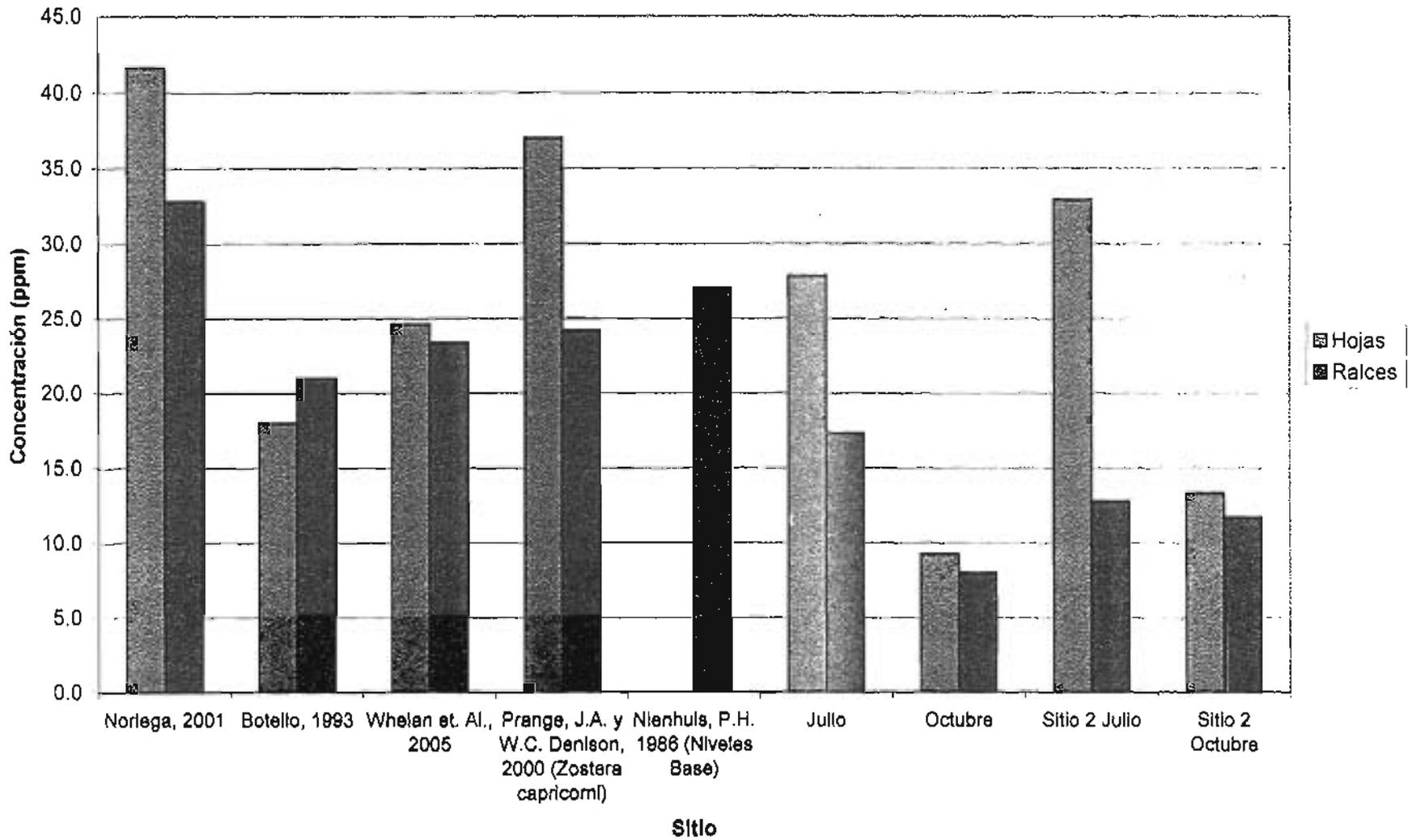


Tabla 11. Concentración de zinc ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) encontrada por este trabajo y otros autores.

Estudio	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
Noriega, 2001	41.6	32.8
Botello, 1993	18	21
Whelan III <i>et. al.</i> , 2005	24.6	23.4
Prange, J.A. y W.C. Denison, 2000 ( <i>Zostera capricorni</i> )	37	24.2
Nienhuis, P.H. 1986 (Niveles base)	24	27
Julio	27.8	17.3
Octubre	9.2	8.0
Sitio 2 Julio	32.9	12.8
Sitio 2 Octubre	13.3	11.7

## Cobre

En la Tabla 12 y en la Figura 13 se reporta la concentración de Cu encontrada en este trabajo. Se presentan de nuevo los trabajos realizados por Noriega, Botello, Whelan III, Prange y Denison y por último el trabajo presentado por Nienhuis. Aunado a ellos se presenta el trabajo publicado por Montgomery y Price.

Se cuenta con que la concentración más alta en la especie de estudio, *Thalassia testudinum*, la reporta Botello en 1993. En la mayoría de los estudios se encuentra que la concentración en hojas es mayor que en raíz – rizoma, lo que concuerda con lo señalado por este estudio. Las concentraciones encontradas en este trabajo no son mucho más altas que las reportadas como niveles base por Nienhuis. Noriega, en sus estudios en el SAV determina las concentraciones más bajas de cobre a pesar de que determinó que el SAV es un ecosistema contaminado, en contraste con lo reportado por Botello, cuyas concentraciones son las más altas.

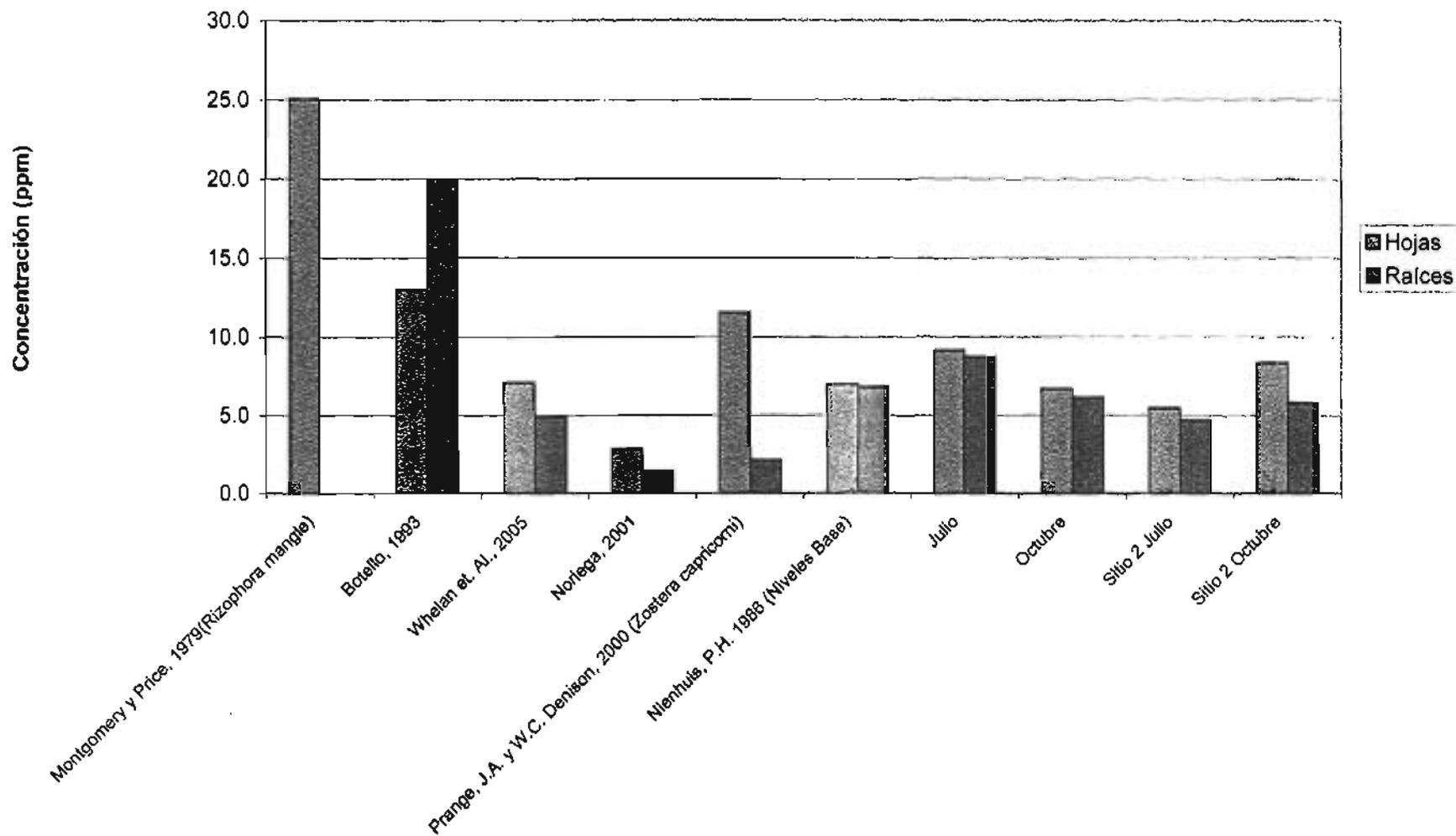
Si comparamos nuestros resultados con lo encontrado por Whelan III para un sitio no contaminado, encontramos en este estudio que sólo las concentraciones de metales

en el Sitio 2 de julio (tanto en hojas, como en raíz y rizoma) son menores. Prange y Denison por otra parte, reportan un valor comparativamente alto de Cu en hojas y bajo en raíces, pero cabe señalar que este estudio se realizó en zonas urbanas y en otra especie de pasto marino. Por lo tanto se puede decir que existe un enriquecimiento de este metal en la zona de estudio, con respecto a sitios no contaminados, pero los niveles encontrados están por debajo de aquellos reportados por otros autores para lugares contaminados.

Tabla 12. Concentración de cobre ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) encontrada por este trabajo y otros autores.

Estudio	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
Montgomery y Price, 1979 ( <i>Rizophora mangle</i> )	25	
Botello, 1993	13	20
Noriega, 2001	2.8	1.4
Whelan III <i>et. al.</i> , 2005	7.1	4.9
Prange, J.A. y W.C. Denison, 2000 ( <i>Zostera capricorni</i> )	11.5	2.1
Nienhuis, P.H. 1986 (Niveles base)	7.0	6.8
Julio	9.1	8.7
Octubre	6.7	6.1
Sitio 2 Julio	5.5	4.7
Sitio 2 Octubre	8.4	5.8

Figura 13. Concentración de cobre encontrada por diversos autores en comparación con el estudio presentado.



Fuente

## Arsénico

En la Tabla 13 y en la Figura 14 se reporta la concentración de As encontrada en este trabajo. Para la comparación se presentan los datos reportados por otros autores: Whelan III en la parte baja de Laguna Madre y Fourqurean y Cai en seis estuarios de la costa oeste de Florida en EUA.

El arsénico es un metaloide de mucha importancia debido a su toxicidad, cuya principal fuente antropogénica se encuentra en los plaguicidas que se utilizan en los cultivos. El arsénico que se encontró en la mayoría de nuestros resultados en mayor cantidad que en las otras fuentes reportadas. Tanto Fourqurean y Cai, como Whelan III mencionan que las zonas de estudio reportadas por ellos no están contaminadas, por lo tanto en este estudio podemos decir que existe un enriquecimiento en el ecosistema marino de este metaloide.

Este elemento presenta en general una concentración mayor en hojas que en raíz y rizoma, a excepción de la muestra obtenida en el Sitio 2 en julio. Las concentraciones encontradas en el promedio de los siete sitios son mayores que en el Sitio 2, a excepción de las raíces y rizomas en el Sitio 2 en julio. En este caso no se cumple la tendencia esperada, en la cual el basurero cercano al sitio de muestreo 2 afecta la concentración de los metales en el pasto marino. Por lo tanto, parece que la comunidad no ha tenido un efecto en el aumento de la concentración de este elemento. El enriquecimiento que se observa en los datos no se puede explicar por la presencia del basurero, y son necesarios más estudios para poder esclarecer las razones del incremento en la concentración de este elemento.

Figura 14. Concentración de arsénico encontrada por diversos autores en comparación con el estudio presentado.

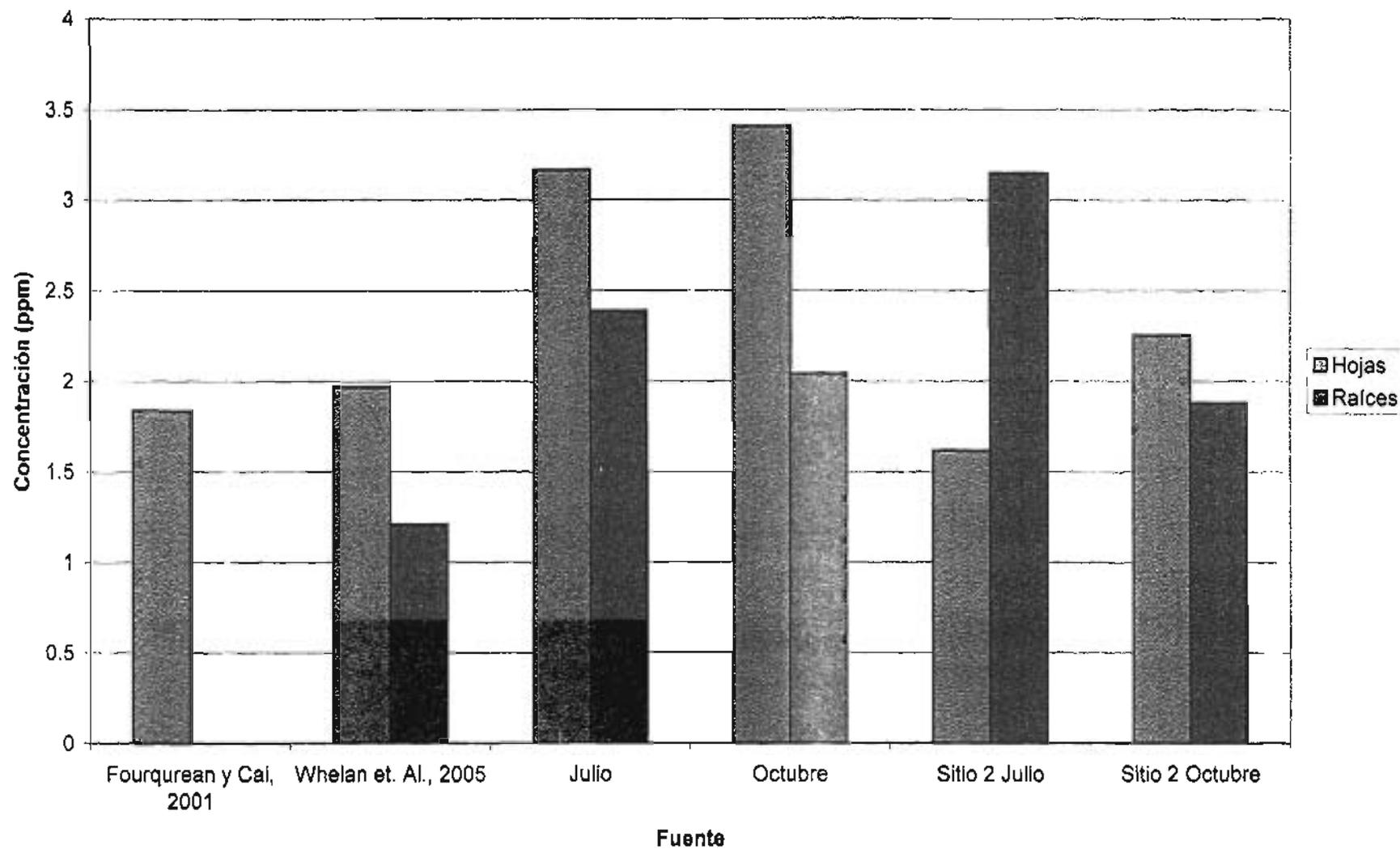


Tabla 13. Concentración de arsénico ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) encontrada por este trabajo y otros autores.

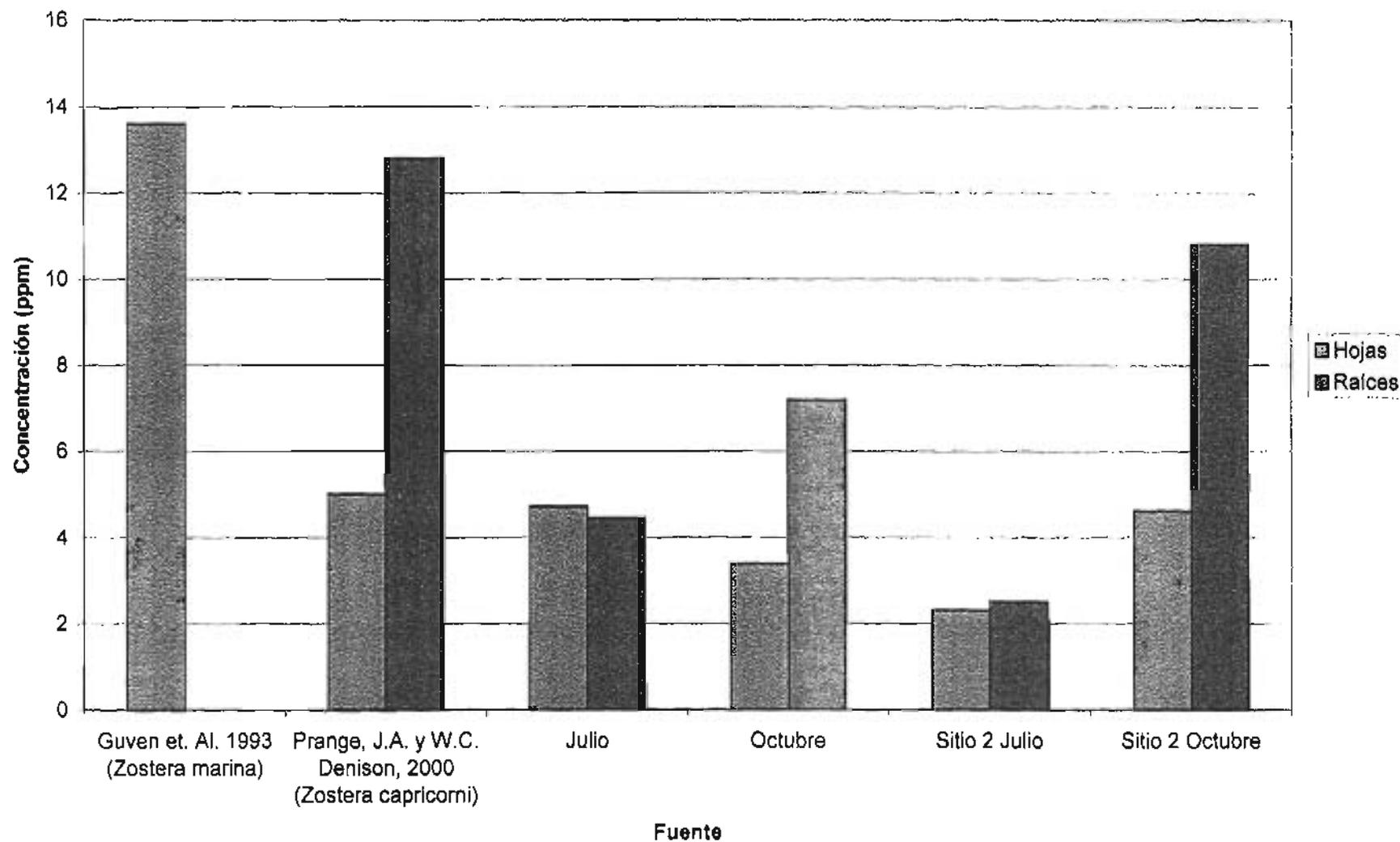
Estudio	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
Whelan III <i>et. al.</i> , 2005	1.97	1.21
Fourqurean y Cai, 2001	1.84	—
Julio	3.2	2.4
Octubre	3.4	2.0
Sitio 2 Julio	1.6	3.2
Sitio 2 Octubre	2.3	1.9

## Cromo

En la Tabla 14 y en la Figura 15 se reporta la concentración de Cr encontrada en este trabajo. En comparación, se presentan los trabajos de Prange y Denison y Guven que realizó su investigación en Turquía. Para este metal, ninguno de los estudios encontrados son para la especie *Thalassia testudinum*. Los mencionados por Guven son para el pasto marino *Zostera marina* y Prange y Denison reportan lo encontrado en *Zostera capricorni*. Se usan estas comparaciones debido a que se trata de pastos marinos de características similares al que se estudió en este trabajo.

Como generalidad, se observa una mayor concentración en raíz y rizoma que en las hojas, salvo en la muestra de julio. No existe una tendencia clara en la relación de los siete sitios con respecto al Sitio 2, ya que la concentración en octubre es mayor en el Sitio 2 que en el promedio de los siete sitios y ocurre de manera inversa en el mes de julio (el promedio de los siete sitios es mayor que el Sitio 2) En los muestreos realizados se puede presentar el fenómeno de escurrentías, que provoca que el Sitio 2 en octubre tenga una mayor concentración de este metal que en los demás sitios. El cromo encontrado podría provenir de los desechos del basurero.

Figura 15. Concentración de cromo encontrada por diversos autores en comparación con el estudio presentado.



Las muestras obtenidas por Prange y Denison son de una zona industrial y urbana, por lo que parece natural que las cantidades en los sitios de este estudio se encuentren por debajo de esos valores. Aún así se encuentran dentro del mismo intervalo de valores, lo que indica un enriquecimiento del ecosistema por este metal.

Tabla 14. Concentración de cromo ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) encontrada por este trabajo y otros autores.

Estudio	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
Güven et. Al. 1993 ( <i>Zostera marina</i> )	13.6	—
Prange, J.A. y W.C. Denison, 2000 ( <i>Zostera capricorni</i> )	5	12.8
Julio	4.7	4.4
Octubre	3.4	7.2
Sitio 2 Julio	2.3	2.5
Sitio 2 Octubre	4.6	10.8

## Plomo

En la Tabla 15 y en la Figura 16 se presenta la concentración de Pb encontrada en este trabajo. Aunado a lo encontrado en este estudio se presentan los resultados encontrados por Noriega, Whelan III, Nienhuis y Montgomery y Price.

La mayor concentración en hojas se encontró en este estudio en el mes de octubre, pero es necesario mencionar que en este mes sólo se contó con la lectura de una réplica debido a la pérdida de la muestra, por lo que este dato se debe tomar con precaución. Noriega reporta lo encontrado para una zona contaminada y los datos presentados en este estudio se encuentran en el mismo intervalo que los encontrados en el SAV. Los otros datos citados se encuentran en sitios no contaminados (Whelan III et. al., 2005) o se consideran niveles basales (Nienhuis, 1986). En comparación, todas las muestras en este trabajo superan las concentraciones encontradas por Whelan III. Sólo el promedio de las raíces y rizomas de los siete sitios de octubre y del Sitio 2 de julio están por debajo de los niveles de referencia reportados por Nienhuis.

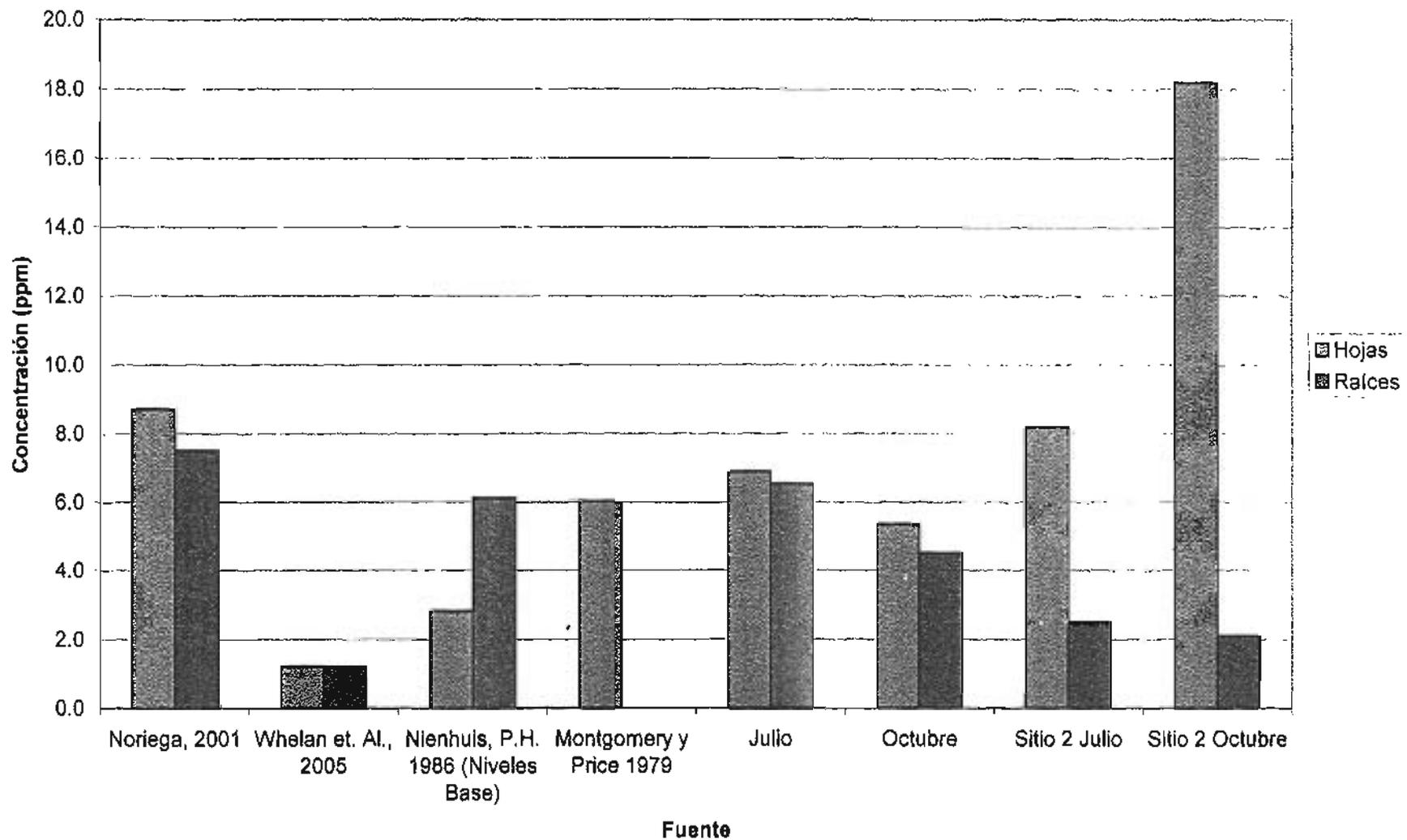
Lo anterior parece demostrar que el sistema presenta un exceso de plomo debido a actividades humanas. Como se ha mencionado anteriormente para el comportamiento en otros metales, la perturbación de este metal parece estar acentuada en el Sitio 2.

De todo lo anterior se concluye que existe un efecto local debido a las escurrentías en el sitio que se localiza a la salida del basurero, ya que en general se observa que en los siete sitios la concentración de metales en la laguna Yalahau es mayor en julio que en octubre, caso contrario a lo observado en el Sitio 2, donde se observa en general una mayor concentración de metales en el mes de octubre que en el mes de julio. Esto nos dice que las lluvias de los meses anteriores al muestreo de julio tuvieron un efecto en la concentración de metales en los pastos marinos a lo largo de la laguna Yalahau, mientras que a la salida del basurero, las lluvias que ocurrían en ese momento durante el mes de octubre tuvieron un efecto local notable en la concentración de metales pesados.

Tabla 16. Concentración de plomo ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) encontrada por este trabajo y otros autores.

Estudio	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Raíz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
Noriega, 2001	8.7	7.5
Whelan III <i>et. al.</i> , 2005	1.2	1.2
Nienhuis, P.H. 1986 (Niveles base)	2.8	6.1
Montgomery y Price 1979	6.0	—
Julio	6.9	6.5
Octubre	5.3	4.5
Sitio 2 Julio	8.2	2.5
Sitio 2 Octubre	18.2	2.1

**Figura 16. Concentración de plomo encontrada por diversos autores en comparación con el estudio presentado.**



## Cadmio y Mercurio

Para la determinación de estos metales contamos con las muestras de obtenidas de Puerto Morelos en Quintana Roo, adicionales a las muestras de Holbox. La determinación de estos metales se realizó por medio de absorción atómica, debido a que no contamos con las condiciones necesarias para realizar su determinación por medio de PIXE. Para la determinación de cadmio y mercurio por absorción atómica seleccionamos las muestras más importantes de Holbox (Sitio 2, Sitio 4 y Sitio 7). La concentración de todas las muestras de Puerto Morelos usadas en este estudio fue determinada mediante absorción atómica y no contamos con resultados por medio de PIXE.

En la Tabla 16 y en la Figura 17 se reporta la concentración de Cd encontrada en este trabajo. Para la comparación se presentan los datos reportados por otros autores. Las muestras de Noriega pertenecen a un análisis realizado en el SAV y las muestras de Nienhuis son los niveles base de metales en pastos marinos de Indonesia. Las Muestras de Guven pertenecen a Turquía.

El cadmio y el mercurio son dos de los elementos más peligrosos para la salud humana. Ambos metales pertenecen a la familia 12 de la tabla periódica junto con el zinc, por lo que poseen propiedades similares entre sí y son capaces de reemplazar al zinc en algunas enzimas y producir así su efecto tóxico en los organismos. En este estudio se analizó la presencia de mercurio y cadmio en pastos marinos.

Para el mercurio no se detectó su presencia en ningún sitio de muestreo y en caso de que exista, se encuentra en concentraciones menores a  $3 \mu\text{g L}^{-1}$ , que es el límite de detección. En cambio, la presencia del cadmio fue notoria como se muestra en la Figura 14. El cadmio es un metal regularmente usado en pilas desechables desde hace tiempo. El uso de este tipo de pilas parecería ser bajo en una comunidad como la estudiada, pero dado que es una población cuya actividad laboral principal es la pesca (23.4%, Tran *et. al.*, 2002) este tipo de baterías se utilizan comúnmente para radios, linternas y principalmente para los geo – posicionadores (GPS, Global Positioning System) que se usan para la localización de los bancos de peces. Después de su uso,

estas baterías son desechadas sin ningún tratamiento especial al basurero de la comunidad.

La concentración de los metales en los estudios realizados por Noriega y Guven resultan mucho mayores que los encontrados por este trabajo y por el de Nienhuis. En un caso particular, Noriega no detectó concentración alguna en raíces. Este metal parece estar más concentrado en hojas que en raíz y rizoma a excepción del Sitio 1 tomado en Puerto Morelos.

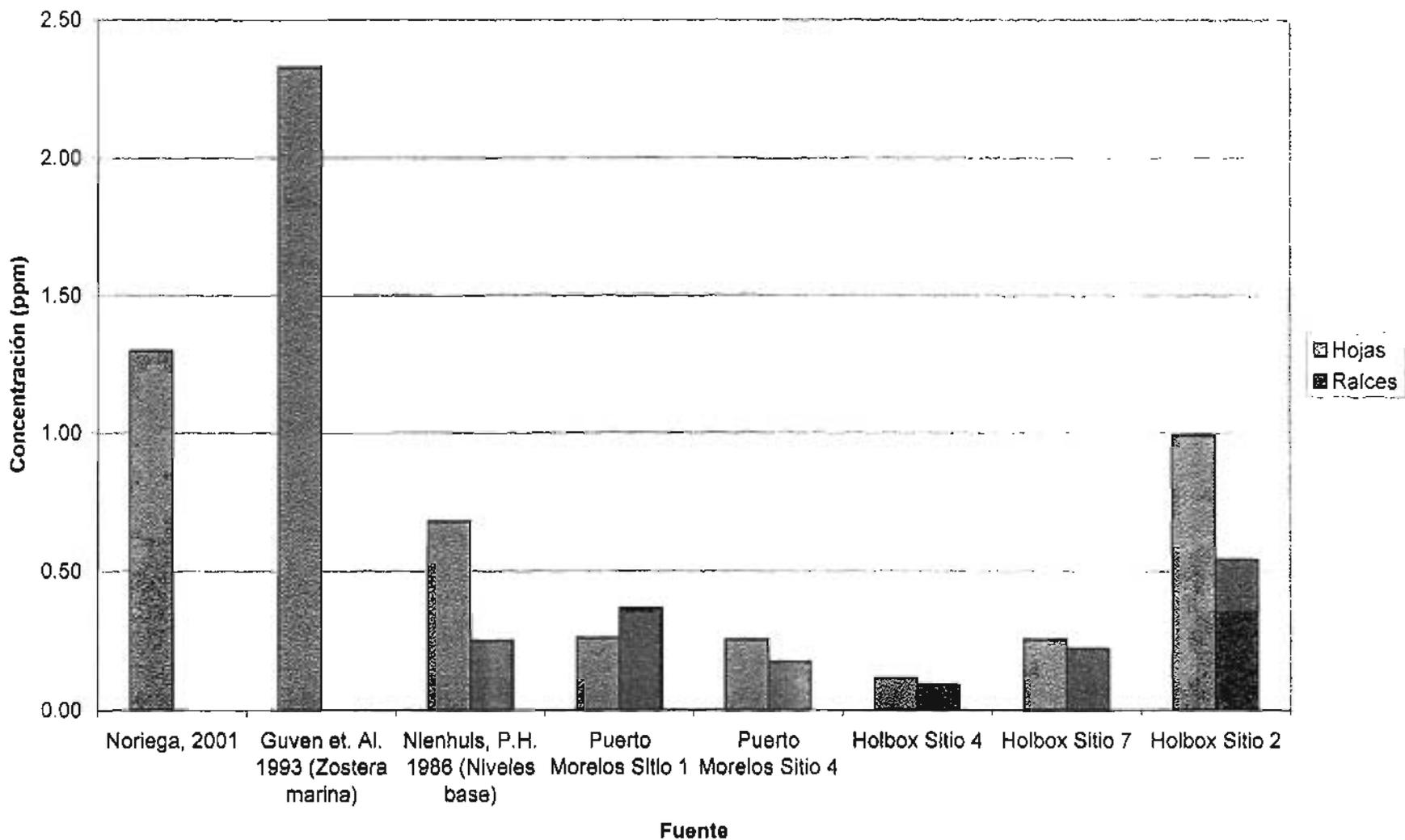
Los valores encontrados en los diferentes sitios de muestreo presentan niveles por debajo de la referencia de Nienhuis en 1986, a excepción de los encontrados en raíz y rizoma en el sitio 1 de Puerto Morelos y los encontrados en el Sitio 2 en Holbox. Todos los resultados están por debajo de ecosistemas contaminados como el SAV.

Es de notar que el Sitio 2 de muestreo en Holbox se encuentre por arriba de los niveles encontrados en Puerto Morelos, que es una población que está mucho más en contacto con centros urbanos como Cancún y Playa del Carmen. Esto nos dice que a pesar de encontrarse por debajo de ecosistemas contaminados, este metal puede ser un problema de contaminación en el futuro ya que es clara la influencia de la comunidad de Holbox en su concentración. Se observa de esta manera como el impacto del tratamiento de la basura, aún perteneciendo a una localidad pequeña, puede perturbar al medio ambiente cuando no se trata de manera conveniente.

Tabla 15. Concentración de cadmio ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) encontrada por este trabajo y otros autores.

Estudio	Hojas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Raiz y Rizoma ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
Noriega, 2001	1.3	ND
Güven et. Al. 1993 ( <i>Zostera marina</i> )	2.33	—
Nienhuis, P.H. 1986 (Niveles base)	0.68	0.25
Puerto Morelos Sitio 1	0.26	0.37
Puerto Morelos Sitio 4	0.25	0.17
Holbox Sitio 4	0.12	0.09
Holbox Sitio 7	0.25	0.22
Holbox Sitio 2	0.85	0.54

Figura 17. Concentración de cadmio encontrada por diversos autores en comparación con el estudio presentado.



# CONCLUSIONES

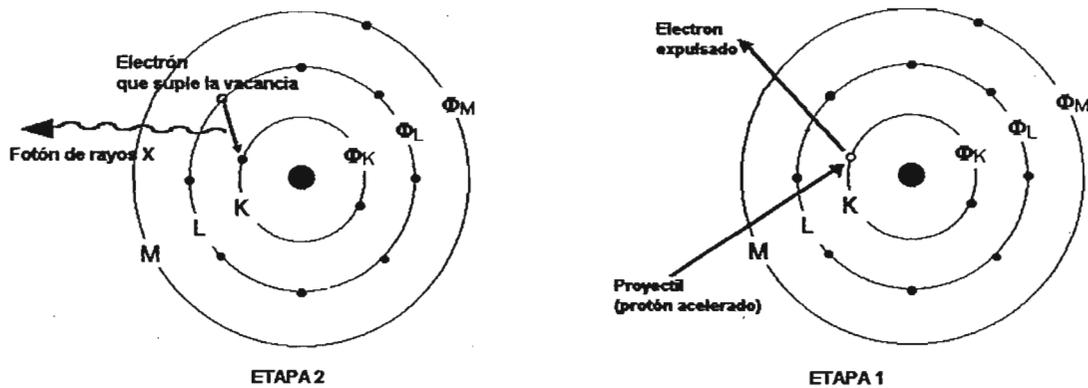
- Se determinó la concentración de metales pesados en el pasto marino *Thalassia testudinum*.
- La concentración de los diversos metales pesados no indica contaminación. Esto se deduce al comparar nuestros resultados con los encontrados por otros autores en otros lugares que presentan contaminación.
- No se encontró evidencia de que exista enriquecimiento de metales pesados por la extracción de petróleo crudo, en especial de la región de Venezuela.
- El área delimitada por la laguna Yalahau no se encuentra contaminada y los niveles de contaminantes encontrados en Puerto Morelos son aún menores. Sin embargo encontramos que existe un efecto local cerca de la comunidad de Holbox que incrementa los niveles de ciertos metales pesados.
- Consideramos que el foco de la perturbación es el basurero de la localidad, que se encuentra a cielo abierto y en contacto con la laguna Yalahau.
- El problema de la contaminación ambiental no termina con el diagnóstico del mismo, es este caso es necesario tomar medidas preventivas para que no ocurra un daño mayor.

# APÉNDICE I

## Emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE)

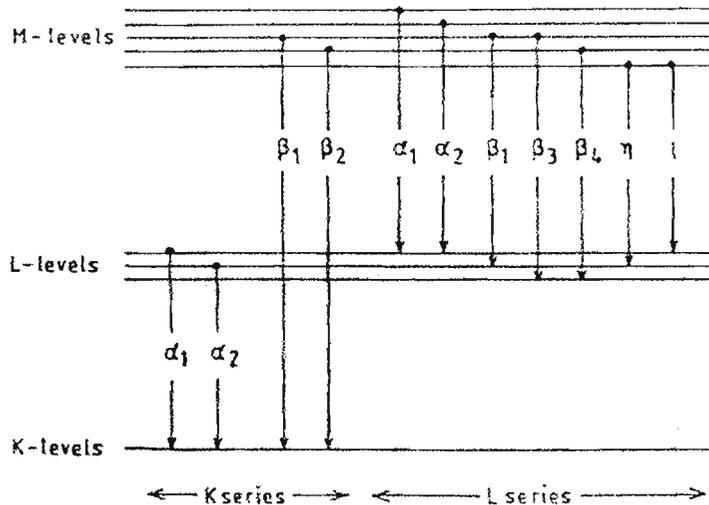
PIXE es un método analítico basado en la en la emisión de rayos X. Cuando protones con energías usualmente entre (1-4) MeV arrancan electrones de las capas internas de los átomos, ocurre un rápido proceso de reordenamiento, donde las vacantes producidas son ocupadas con electrones de niveles exteriores. El exceso de energía es liberado mediante la emisión de rayos X y/o electrones Auger. Este último es un proceso no radiativo y compite con la emisión de rayos X.

Figura 18. Etapas de producción de rayos X característicos.



La contribución relativa de cada uno de los procesos se caracteriza generalmente con el campo de fluorescencia, que no es más que la probabilidad de que se emita un fotón cuando se llena una vacante. Este campo de fluorescencia es cercano a 1 para elementos pesados y es una fracción muy pequeña para los elementos ligeros. Cuando se ocupa una vacante, de acuerdo con la teoría cuántica, en la que sólo algunas transiciones entre niveles están permitidas, se produce según se muestra en la Figura 19 para elementos medios y pesados.

Figura 19. Transiciones permitidas para la ocupación de vacantes en átomos medios y pesados.



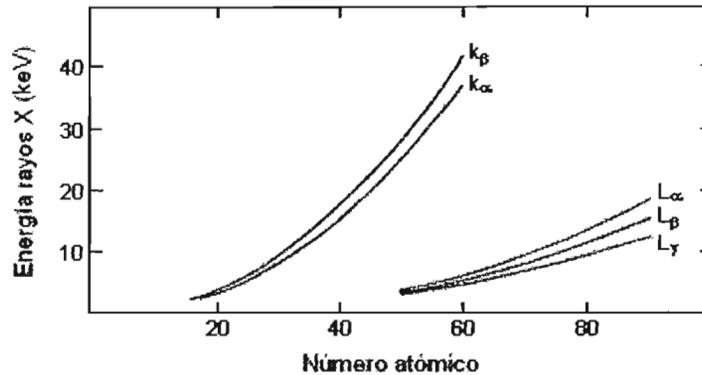
El espectro de rayos X está determinado por los niveles de energía de los electrones en el átomo, por lo que son característicos de cada elemento, permitiendo la identificación del mismo.

Las transiciones hasta la capa K se denominan  $K_\alpha$  cuando provienen de la capa L y  $K_\beta$  cuando provienen de la capa M. Las transiciones hasta la capa L se denotan como  $L_\alpha$ ,  $L_\beta$ , etc. y tiene muchas componentes sobre todo en el caso de los elementos pesados. El espectro completo de rayos X es bastante complicado, aunque algunas de las componentes tienen aproximadamente la misma energía, por ejemplo la  $K_{\alpha_1}$  y  $K_{\alpha_2}$ , por lo que aparecen en el espectro como un solo pico, además algunas transiciones son de poca intensidad.

La eficiencia de los detectores usados Si(Li) o Ge(Li) permanece casi constante en el intervalo de energías de 5-25 keV, pero decae bruscamente para energías menores o mayores, es esta propiedad, junto con la disminución de la sección eficaz de

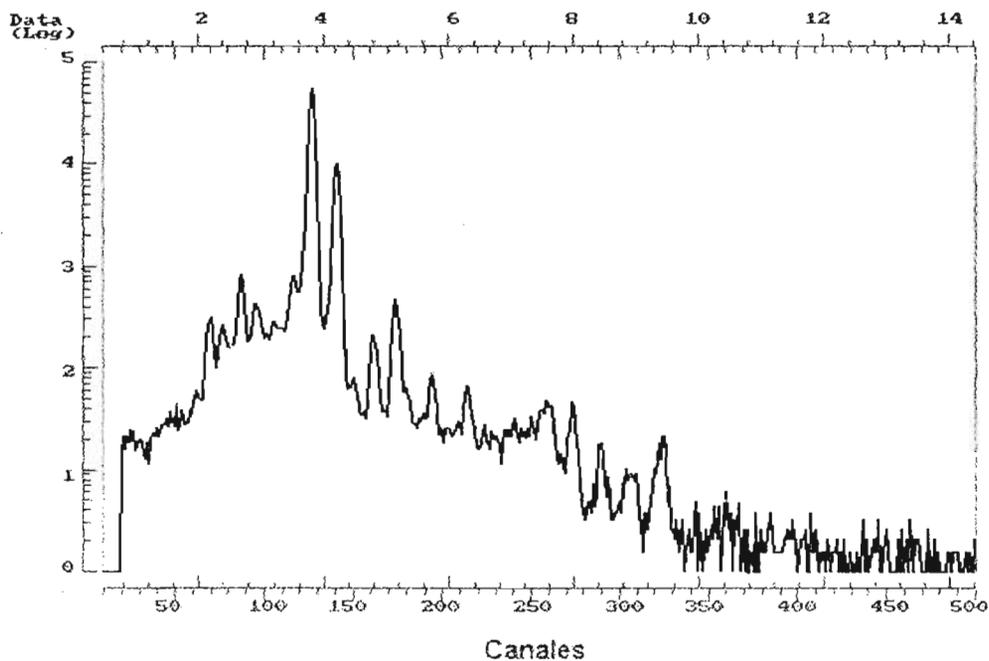
producción de líneas K con el aumento de Z, lo que determina qué serie de rayos X se utiliza para el análisis de cada elemento, según se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Energía de las líneas principales de emisión de rayos X en función del número atómico.



Un espectro típico de PIXE se muestra en la Figura 21. Éste está compuesto fundamentalmente por las líneas K<sub>α</sub> y K<sub>β</sub> de los elementos ligeros y medios y las líneas L de los elementos pesados.

Figura 21. Espectro típico de PIXE



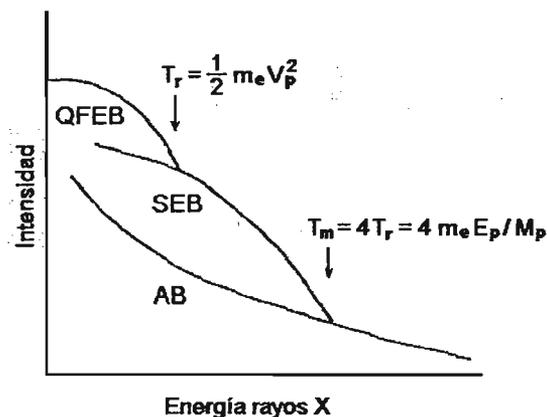
En esta figura se observan los rayos X característicos presentes en el espectro, sobre un fondo continuo, que es el que determina principalmente el límite de detección para cualquier elemento. Es por ésto que resulta fundamental, para el análisis con PIXE, entender el origen de este fondo.

### Origen del fondo en los espectros de rayos X.

Este fondo continuo se origina por los siguientes procesos:

1. “Bremsstrahlung” de los protones incidentes: Este proceso contribuye de manera insignificante al fondo y se observa como una pequeña cola en la región de alta energía del espectro.
2. “Bremsstrahlung” de los electrones: Este es el principal contribuyente al fondo y se debe a la desaceleración de los electrones. En la Figura 22 se muestran las principales componentes de la radiación de frenado de los electrones.

Figura 22. Componentes principales de la radiación de frenado para los electrones.



**QFEB** (Quasi-free electron “bremsstrahlung”): es el “bremsstrahlung” de los electrones casi libres. Ocurre cuando la velocidad de la partícula incidente es

mucho mayor que la velocidad del electrón en el orbital, por lo que puede decirse que está prácticamente libre y en reposo. Entonces el electrón es dispersado por el campo coulombiano de la partícula incidente, emitiendo QFEB. Para protones de 3 MeV  $T_r=1.6$  keV.

**SEB** (Secondary electron “bremsstrahlung”): es el “bremsstrahlung” de los electrones secundarios. Ocurre cuando los electrones que fueron arrancados de los átomos, son dispersados por el campo coulombiano de los núcleos atómicos de la muestra.

**AB** (Atomic “bremsstrahlung”): es conocido como “bremsstrahlung” atómico y ocurre cuando un electrón que es arrancado del átomo regresa a su nivel inicial en el átomo ionizado. Si el estado final es un estado del continuo, entonces el proceso comprende tanto la ionización como la emisión de un fotón y se conoce como ionización radiactiva. Éste es el principal contribuyente al fondo a energías superiores a  $T_m$ .

3. Rayos  $\gamma$  provenientes de las reacciones nucleares: La presencia de elementos ligeros en la muestra, causa un fondo inevitable de rayos  $\gamma$  con energías de cientos de keV. La interacción de éstos en el detector ocurre por efecto Compton, resultando en un fondo esencialmente plano en la región 1-30 keV, que es la región donde los espectros de PIXE son usualmente tomados.

## APÉNDICE II

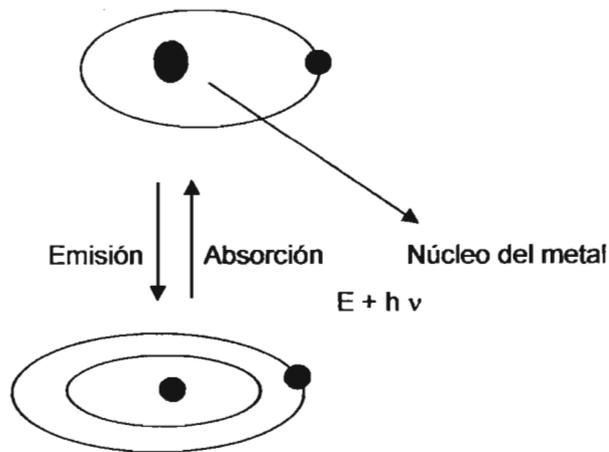
### Espectroscopía de Absorción Atómica

Los átomos son capaces de absorber la luz. Este hecho nos brinda una poderosa herramienta analítica para realizar análisis cuantitativos y cualitativos, conocida como espectroscopía de absorción atómica (AA). La AA es una técnica analítica aplicable al análisis de trazas de elementos metálicos en minerales; de muestras biológicas y farmacéuticas; de aguas, alimentos y de sustancias relacionadas con el medio ambiente.

La AA se basa en que los átomos libres, en su estado fundamental, pueden absorber la luz a una cierta longitud de onda. La absorción es específica, por lo que cada elemento absorbe a longitudes de onda únicas. Los átomos absorben energía y con eso pasan de un estado fundamental, a un estado excitado. La energía que absorben los átomos es en forma de líneas muy delgadas de absorción, generalmente visibles en los espectros ultravioleta y visible. Durante la absorción, los electrones de la capa externa se excitan y por eso se dice que el átomo pasa a estar en un estado excitado.

Existe una relación simple entre la espectroscopía de emisión y la de absorción atómica, como se ilustra en la Figura 23. Esta figura muestra un átomo en su estado excitado, en equilibrio con un átomo en su estado basal y un fotón. La base de la espectroscopía de emisión es la formación de un átomo en su estado basal mas un fotón de un átomo excitado, mientras que el proceso inverso es la base de la espectroscopía de absorción atómica.

Figura 23. Relación entre emisión y absorción de energía por los átomos.



El electrón se movió a un nivel más alto de energía =  $E+hv$

Esta simple ilustración nos indica de manera simple el efecto de las variables en el sistema. Por ejemplo, cualquier cambio que incremente la población total de átomos de una muestra también incrementará, tanto las señales de emisión, como las de absorción. La relación matemática que relaciona la emisión y la absorción nos puede indicar con mayor claridad la correspondencia entre ellas.

La intensidad  $S$  de una línea de emisión térmica está dada por la ecuación:

$$S = N_2 E / \tau = (N_1 E / \tau) g_1 / g_2 e^{-E/kT}$$

$$E = h \nu$$

$S$  = Intensidad de la línea de emisión

$N_2$  = Número de átomos excitados

$N_1$  = Número de átomos no excitados

$\tau$  = Tiempo de vida de un átomo excitado

$E$  = Energía de excitación

$g_1/g_2$  = Probabilidad *a priori* de la relación de átomos en el estado basal y el estado excitado

$T$  = Temperatura

$k$  = Distribución de Boltzman

$\nu$  = Frecuencia de la línea de emisión =  $c/\lambda$

$c$  = Velocidad de la luz

$\lambda$  = Longitud de onda de la línea de emisión o longitud de onda de excitación.

Se puede observar que la intensidad de la línea de emisión es proporcional al número de átomos excitados. Se observa también que para un número dado de átomos, el número de átomos excitados es función de la temperatura y de la frecuencia de la línea de emisión. Con un incremento en la temperatura, existe un aumento en el número de átomos excitados. A temperatura constante, la energía requerida para que ocurra la excitación aumenta y disminuye la cantidad de átomos excitados. Al disminuir la cantidad de átomos excitados disminuye también la intensidad de la línea de emisión.

Concluimos de aquí que la intensidad de una línea de emisión está controlada por el número de átomos excitados, que a su vez están en función de la longitud de onda de emisión y de la temperatura del sistema. En la Tabla 16 se puede observar como sólo una pequeña fracción de los átomos se excita, aunque la energía de excitación sea baja y la temperatura sea alta.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

Tabla 16. Relación entre la cantidad de átomos en estado excitado y la temperatura.

Longitud de onda de excitación. A	Número de átomos excitados por unidad de población a		Aumento causado por el incremento de 500 °K
	3000 °K	3500 °K	
2000	$10^{-10}$	$10^{-8.6}$	30
3000	$10^{-6.7}$	$10^{-5.7}$	9
6000	$10^{-3.3}$	$10^{-3.0}$	2.3

En contraste, el grado de absorción sigue la relación

$$\int K_{\nu} d\nu = \frac{\pi \cdot e^2}{mc} N_1 \cdot f$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de absorción a la frecuencia  $\nu$

$e$  = Carga del electrón

$m$  = Masa del electrón

$c$  = velocidad de la luz

$f$  = Fuerza del oscilador de la línea de absorción

$$f = \frac{\lambda_0^2 \cdot g_2}{(8 \cdot \pi \cdot g_1)} \cdot N_1 \cdot A_2^1$$

Donde:

$\lambda_0$  = Longitud de onda de la línea de resonancia

$A_2^1$  = Coeficiente de emisión espontánea de Einstein

La única variable es  $N_1$ , que se refiere a los átomos que pueden absorber energía radiante. La ley de Lambert – Beer es

$$I_1 = I_0 e^{-kbc}$$

y no puede aplicarse directamente a la espectroscopia de absorción atómica. Rara vez se tiene un sistema de átomos en estado estacionario con distribución homogénea y, por tanto, es imposible proporcionar un valor válido a  $c$  o  $b$ . A pesar de esto, el principio de la ley se debe aplicar al caso en el que la intensidad de la luz no absorbida es una función negativa del logaritmo natural del coeficiente de absorción. Esto nos permite graficar curvas de calibración y relacionar la concentración con la absorción.

El comportamiento físico de la absorción atómica se puede resumir en:

1. La mayoría de la población de átomos está en estado no excitado y puede absorber energía radiante, mientras que sólo una pequeña fracción puede emitir.
2. En la absorción atómica es suficiente medir la relación  $I_1/I_0$ , cuando hay equipos de doble haz.

# BIBLIOGRAFÍA

1. Ali, M. (2004). PIXE and RIXRF comparison for applications to biological sample analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 222, 567–576.
2. Badal Kumar Mandal y Kazuo T. Suzuki (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*. 58, 201–235.
3. Barwick, M. y W. Maher (2003). Biotransference and biomagnification of selenium copper, cadmium, zinc, arsenic and lead in a temperate seagrass ecosystem from Lake Macquarie Estuary, NSW, Australia. *Marine Environmental Research*. 56, 471–502.
4. Brix, H.; Lyngby, J. E. y Hans Henrik, S. (1983). Eelgrass (*Zostera marina*) as an indicator Organism of Trace Metals in the Limfjord, Denmark. *Marine Environmental Research*. 8, 165-181.
5. Caccia, Valentina G.; Millero, Frank J. y Albert Palanques (2003). The distribution of trace metals in Florida Bay sediments. *Marine Pollution Bulletin* 46, 1420–1433.
6. Cai, Yong; Georgiadisa, Myron y James W. Fourqurean (2000). Determination of arsenic in seagrass using inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B*. 55, 1411 – 1422.
7. Campanella, L.; Conti, M.E.; Cubadda, F. y C. Sucapane (2001). Trace metals in seagrass, algae and molluscs from an uncontaminated area in the Mediterranean. *Environmental Pollution*. 111, 117 – 126.
8. Catriona, Macinnis M.O. y Peter J. Ralph (2002). Towards a more ecologically relevant assessment of the impact of heavy metals on the photosynthesis of the seagrass, *Zostera capricorni*. *Marine Pollution Bulletin*. 45, 100–106.
9. Cockerham, Lorris G. y Barbara S. Shane. *Basic Environmental Toxicology*. Editorial CRC Press. EUA 1994. pp 109 – 125.

10. Costa, Max (2003). Potential hazards of hexavalent chromate in our drinking water. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 188, 1–5.
11. Cuttera, Gregory A.; Cuttera, Lynda S.; Featherstoneb, Alison M. y Steven E. Lohrenz (2001). Antimony and arsenic biogeochemistry in the western Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research II*. 48, 2895–2915.
12. Denker, A.; Opitz-Coutureau, J.; Campbell, J.L.; Maxwell, J.A. y T. Hopman (2004). High-energy PIXE: quantitative analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 219–220, 130–135.
13. Diario Oficial de la Federación (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
14. Fortoul, Teresa I.; Saldivar O., Liliana; Espejel-Mayab, Guadalupe; Bazarro N., Patricia; Mussali-Galantea, Patricia; Avila-Casadoa, Maria del Carmen Colín Barenquec, Laura y Maria-Rosa Avila-Costa. Inhalation of cadmium, lead or its mixture (2004). Effects on the bronchiolar structure and its relation with metal tissue concentrations. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 19, 329 – 334.
15. Fourqurean, James W. y Yong Cai (2001). Arsenic and phosphorus in seagrass leaves from the Gulf of Mexico. *Aquatic Botany* 71, 247–258.
16. Fourteenth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, FAO Nutrition Meetings Report Series. En prensa; Wld HlthOrg. techn. Rep. Ser. En prensa.
17. Furness, Robert W. y Rainbow, Phillip S. Heavy Metals in the Marine Enviroment. Editorial CRC, EU 2000. pp. 104.
18. Gaceta Parlamentaria, número 30 año 2003.
19. Guven C. K., Saygy, N., y B. Ozturk (1993). Survey of Metal Contents of Bosphorus Algae, *Zostera marina* and Sediments. *Botanica Marina*, 36, 3, 175-178.
20. Hung, Dang Q.; Nekrassova, Olga y Richard G. Compton (2004). Analytical methods for inorganic arsenic in water: a review. *Talanta* 64, 269–277.

21. INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) Gobierno Federal de México, 1998.
22. Irwin, Garth y Alexander D. Kirk (2001). Intermediates in chromium(III) photochemistry. *Coordination Chemistry Reviews*. 211, 25–43.
23. Jackson, L. J. (1998). Paradigms of metal accumulation in rooted aquatic vascular plants. *The science of Total Environment*. 209, 223 – 231.
24. Kahle, J. y G.-P. Zauke (2003). Bioaccumulation of trace metals in the Antarctic amphipod *Orchomene plebs*: evaluation of toxicokinetic models. *Marine Environmental Research*. 55, 359–384.
25. Kohno, M.; Yoshida, T.; Sugihara, H. y N. Hagino (1956). Report on so called Itai-Itai disease First Report. *J. Jap. Society Orthopedics*. 30, 100-101.
26. Kun-Seop Lee; Short, Frederick T. y David M. Burdick (2004). Development of a nutrient pollution indicator using the seagrass, *Zostera marina*, along nutrient gradients in three New England estuaries. *Aquatic Botany*. 78, 197–216.
27. Levina, Aviva y Peter A. Lay (2004). Mechanistic studies of relevance to the biological activities of chromium. *Coordination Chemistry*. 249, 281 – 298.
28. López, Tessy y Ana Martínez (1992). *El Mundo Mágico del Vidrio*. Fondo de Cultura Económico. Serie la Ciencia desde México.
29. Malina, Grzegorz (2004). Ecotoxicological and environmental problems associated with the former chemical plant in Tarnowskie Gory, Poland. *Toxicology*. 205, 157–172.
30. Manahan, Stanley E. (2000). *Environmental Chemistry*. CRC Press, EUA, Capítulos 1, 3, 7, 8.
31. Marín-Guirao, Lázaro; Marín Atucha, Arnaldo; Lloret Barba, Javier; Martínez López, Emma y Antonio J. García Fernández (2005). Effects of mining wastes on a seagrass ecosystem: metal accumulation and bioavailability, seagrass dynamics and associated community structure. *Marine Environmental*. 60, 317 – 337.

32. Mireles, A.; Solís, C.; Andrade, E.; Lagunas-Solar, M.; Piña, C. y R.G. Flocchini (2004). Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 219–220, 187–190.
33. Mireles Díaz, Alibech (2004). Desarrollo y optimización de técnicas de preparación de muestras y de análisis cuantitativo de elementos traza en frutas y verduras mediante PIXE. Tesis de Doctorado. Instituto de Física, UNAM.
34. Montgomery, R y T. Price (1979). Release of Trace Metals by Sewage Sludge and the Subsequent Uptake by Members of a Turtle Grass Mangrove Ecosystem. *Environmental Science and Technology*. 13, 5.
35. Moskalyk, R.R. y A.M. Alfantazi (2003). Processing of vanadium: a review. *Minerals Engineering*. 16, 793–805.
36. Mukherjee, Biswajit; Patra, Balaram; Mahapatra, Sushmita; Banerjee, Pratik; Tiwari, Amit y Malay Chatterjee (2004). Vanadium—an element of atypical biological significance. *Toxicology Letters* 150, 135–143.
37. Nicolaidou, Artemis y James N. Nott (1998). Metals in Sediment, Seagrass and Gastropods Near a Nickel Smelter in Greece: Possible Interactions. *Marine Pollution Bulletin*. 36: 5, 360 – 365.
38. Nienhuis, P. H. (1986). Background Levels of Heavy Metals in Nine Tropical Seagrass Species in Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*. 17:11, 508 – 511.
39. Noriega, Escobar, Elia (2001). Matales Pesados en *Thalassia testudinum* (Pasto Marino), en el Sistema Arrecifal Veracruzano. Tesis de Licenciatura, FES Iztacala, UNAM.
40. Olsen, C. R.; Cutshall, N. H. y I. L. Larsen. Pollutant – Particle Associations and Dynamics in Coastal Marine Environments: A review (1982). *Marine Chemistry*. 11, 501 – 533.
41. Patra, Manomita; Bhowmik, Niladri; Bandopadhyay, Bulbul y Archana Sharma (2004). Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environmental and Experimental Botany*. 52, 199–223.

42. Prange, J. A. y W. C. Dennison (2000). Physiological Responses of Five Seagrass Species to Trace Metals. *Marine Pollution Bulletin* Vol. 41, Nos. 7 – 12, 327 – 336.
43. Restrepo, Iván. Efectos de la Contaminación por Plomo. Lunes 31 de Enero de 2005. La Jornada
44. Rigollet, V.; Sfriso, A.; Marcomini, A.; y M.L. De Casablanca (2004). Seasonal evolution of heavy metal concentrations in the surface sediments of two Mediterranean *Zostera marina* L. beds at Thau lagoon (France) and Venice lagoon (Italy). *Bioresource Technology*. 95, 159–167.
45. Rüdell, Heinz (2003). Case study: bioavailability of tin and tin compounds. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 56, 180–189.
46. Sanchiz, C. y A.M. García-Carrascosa y A. Pastor (2001). Relationships between sediment physico-chemical characteristics and heavy metal bioaccumulation in Mediterranean soft-bottom macrophytes. *Aquatic Botany*. 69, 63–73.
47. Schoeder, Peter y Anita Thoraug (1980). Trace Metal Cycling in Tropical – Subtropical Estuaries Dominated by the Seagrass *Thalassia testudinum*. *Amer. Journal Bot.* 67:7, 1075 – 1088.
48. Sharma, Virender K.; Rhudy, Kurtis B.; Koenig, Robert y Felipe G. Vazquez (1999). Metals in Sediments of the Upper Laguna Madre. *Marine Pollution Bulletin* 38: 12, 1221 – 1226.
49. Smedley, P.L. y D.G. Kinniburgh (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17, 517–568.
50. Solís, C.; Oliver, E.; Andrade, A.; Ruvalcaba-Sil, J.L.; Romero, I.; y H. Celis (1999). PIXE analysis of Zn enzymes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 150, 222 – 225.
51. Terrados, J.; Duarte, C.M.; Kamp-Nielsen, L.; Agawin, N.S.R.; Gacia, E.; Lacap, D.; Fortes, M.D.; Borum, J.; Lubanski, M. y T. Grevec (1999). Are seagrass growth and survival constrained by the reducing conditions of the sediment? *Aquatic Botany* 65, 175–197

52. Tran, Kim Chi; Euan, Jorge y Maria Luisa Isla (2002). Public perception of development issues: impact of water pollution on a small coastal community. *Ocean & Coastal Management*. 45, 405–420.
53. van Tussenbroek, Brigitta I.; Galindo, Carlos A. y Judith Marquez (2000). Dormancy and foliar density regulation in *Thalassia testudinum*. *Aquatic Botany* 68, 281–295.
54. Villanueva, F. S. y A. V. Botello (1998). Metal Pollution in Coastal Areas of Mexico. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 157, 53 – 94.
55. Whelan III, Thomas; Espinoza, Jorge; Villarreal, Xiomara y Maria CottaGoma (2005). Trace metal partitioning in *Thalassia testudinum* and sediments in the Lower Laguna Madre, Texas. *Environment International*, 31:1, 15-24.
56. van Wezel, Annemarie P. y P. van Vlaardingen (2004). Environmental risk limits for antifouling substances. *Aquatic Toxicology*. 66, 427–444.