



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**"DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN MÚSCULO DE PEZ
LEÓN *Pterois volitans/miles complex* (Linnaeus, 1758) EN EL
PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES
PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC, QUINTANA ROO"**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. EDGAR FRANCISCO HUESCA VELÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO

CODIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ ADÁN CABALLERO VÁZQUEZ

ASESORES
DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ
DR. JESÚS MONTOYA MENDOZA

ENERO 2020; BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río

Boca del Río, Ver 08/enero/2020

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

EDGAR FRANCISCO HUESCA VELÁZQUEZ
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN MÚSCULO DE PEZ LEÓN *Pterois volitans/miles complex* (Linnaeus, 1758) EN EL PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC, QUINTANA ROO”

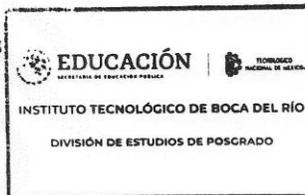
Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede AUTORIZACIÓN para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
Por nuestros mares responderemos*

M. C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

c.c.p. Coordinación de la Maestría
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba C.P.94290
Boca del Río, Veracruz. Tel. (229) 690-5010 e-mail: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx





ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro **A-0607-120118**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 12:00 horas del día 14 del mes de octubre de 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

"DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN MÚSCULO DE PEZ LEÓN *Pterois volitans/miles complex* (Linnaeus, 1758) EN EL PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC, QUINTANA ROO"

Que presenta el (la) alumno(a):

EDGAR FRANCISCO HUESCA VELÁZQUEZ

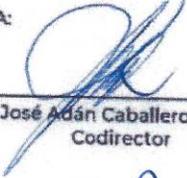
Aspirante al Grado de:

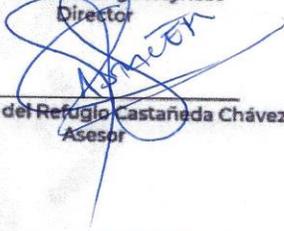
Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:


Dra. Fabiola Lango Reynoso
Directora


Dr. José Adán Caballero Vázquez
Codirector


Dra. María del Refugio Castañeda Chávez
Asesora


Dr. Jesús Montoya Mendoza
Asesor



Scanned with
CamScanner



DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN MÚSCULO DE PEZ LEÓN
Pterois volitans/miles complex (Linnaeus, 1758) EN EL PARQUE NACIONAL
COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC,
QUINTANA ROO

RESUMEN

El uso de metales pesados como parte de las actividades del ser humano ha aumentado con el desarrollo de la tecnología y el crecimiento de las ciudades y otros centros urbanos. El impacto ocasionado debido a la disposición incorrecta de los residuos de estos metales es de muy alto riesgo para la salud humana, animal y para el equilibrio de los ecosistemas naturales. El objetivo de este trabajo fue determinar la concentración de algunos metales pesados (Cd, Cr y Pb) contenidos en el músculo de pez león *Pterois volitans/miles complex*, una especie de peces proveniente del Indopacífico que ha invadido los mares mexicanos, entre ellos el Mar Caribe, el cual se encuentra localizado en una zona de gran interés turístico. Fueron capturados 33 organismos en los tres polígonos del Parque Nacional Costa Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc en el estado mexicano de Quintana Roo. Las concentraciones medias de metales pesados Cd, Cr y Pb fueron $0.054 \pm 0.039 \text{ mg kg}^{-1}$ para el Cd, $0.028 \pm 0.028 \text{ mg kg}^{-1}$ para el Cr y $0.120 \pm 0.040 \text{ mg kg}^{-1}$ para el Pb. En ninguno de los casos, la concentración de metales pesados en músculo de pez león, supera los límites máximos permisibles indicados en la norma mexicana NOM-242-SAA1-2009 en ninguno de los metales evaluados.

ABSTRACT

The use of heavy metals as part of human activities has increased with the development of technologies as well as cities and population growth. The impact caused due the incorrect disposal of the residues of these metals, poses a great risk for human and animal health as well as for the natural balance of the ecosystem. The main objective for this work was to determine the concentration of some heavy metals (Cd, Cr and Pb) in the muscle tissue of lionfish *Pterois volitans/miles complex*; a species of fishes originated from the Indopacific sea that has invaded the Mexican oceans and coasts, among them, the Caribbean Sea, which is located in a region of great touristic interest. 33 lionfish organisms were captured within the three polygons of the Isla Mujeres Western Coast, Point Cancun and Point Nizuc National Park in the Mexican state of Quintana Roo. The average concentrations of the heavy metals evaluated were $0.054 \pm 0.039 \text{ mg kg}^{-1}$ for the Cd, $0.028 \pm 0.028 \text{ mg kg}^{-1}$ for Cr and as for Pb $0.120 \pm 0.040 \text{ mg kg}^{-1}$ was determined. In any of these cases, the concentrations of heavy metals in lionfish muscle tissue, exceeded the permissible limits described in the Mexican legislation NOM-242-SAA1-2009.

DEDICATORIA

A mis padres por su incansable apoyo.

A mi hermana por su motivación.

A Jessica por acompañarme a lo largo de este viaje.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la oportunidad del financiamiento de beca de maestría número 851446 para realizar mis estudios.

Al Instituto Tecnológico de Boca del Río, por aceptarme en sus instalaciones para estudiar este posgrado.

Al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental por brindarme la oportunidad de continuar con mis estudios.

A mi directora de tesis, la Dra. Fabiola Lango Reynoso por ser una dedicada y paciente guía durante la realización de este trabajo.

A mi codirector de tesis, el Dr. José Adán Caballero Vázquez por estar siempre al pendiente de mi desempeño y por ofrecerme todo el apoyo para realizar mis objetivos de la mejor manera.

Un agradecimiento especial a el Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, Unidad Ciencias del Agua por recibirme durante mi estancia de investigación y al Laboratorio de Ecología y Biodiversidad de Organismos Acuáticos por proporcionar los organismos necesarios para este proyecto.

Al resto de mi comité revisor, la Dra. María del Refugio Castañeda Chávez y el Dr. Jesús Montoya Mendoza por sus comentarios y consejos para la elaboración de esta tesis.

A la M. en C. Rosa Elena Zamudio Alemán por su amistad, ayuda y cooperación durante el procesamiento de muestras para el presente trabajo.

Un agradecimiento a mis compañeros de generación por el ambiente de cordialidad y enseñanza que se generó en los salones de clase.

También agradecer a mis compañeros de otras generaciones del proyecto pez león por sus consejos y compartir su valiosa información generada.

Al equipo de trabajo del LEBOA por su amabilidad y gran ayuda en el procesamiento de las muestras usadas en este trabajo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.	1
2. ANTECEDENTES	12
3. JUSTIFICACIÓN.	22
4. HIPÓTESIS.	23
5. OBJETIVOS	24
5.1 Objetivo general	24
5.2 Objetivos específicos	24
6. ÁREA DE ESTUDIO.	25
7. MATERIALES Y MÉTODOS	27
7.1 Trabajo de campo	27
7.2 Localización de fuentes puntuales de contaminación.	27
7.3 Trabajo de laboratorio y análisis de las muestras	28
7.4 Lectura de metales pesados Cd, Cr y Pb.	32
7.5 Análisis estadístico	33
8. RESULTADOS.	35
8.1 Identificación de las fuentes de contaminación por metales pesados en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCyPN).	35
8.2 Datos morfométricos.	36
8.3 Concentración de metales pesados.	41
8.4 Concentración de metales pesados por sitio.	47
8.4.1 Cadmio.	47

8.4.2 Cromo.....	49
8.4.3 Plomo.	50
8.5 Correlaciones.....	52
8.5.1 Relación entre longitud total y concentración de metales pesados.....	52
8.5.2 Relación entre peso total y concentración de metales pesados.....	55
8.5.3 Regresión por sitio.....	58
8.5.4 Correlación en el polígono de Isla Mujeres.....	58
9. DISCUSIÓN.....	63
10. CONCLUSIONES.....	70
11. BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización y corrientes subterráneas del acuífero cárstico de la Península de Yucatán.	3
Figura 2. Juveniles de pez león <i>P. volitans/miles complex</i> en cautiverio.	9
Figura 3. Área de invasión del pez león <i>P. volitans/miles complex</i>	10
Figura 4. Localización geográfica de Quintana Roo y el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.	25
Figura 5. Determinación de longitud total de un pez león mediante regla medidora.	28
Figura 6. Determinación de peso de ejemplar de pez león utilizando una balanza analítica.	29
Figura 7. Liofilizado de muestras de músculo de pez león.	30
Figura 8. Muestras de músculo de pez león en proceso de digestión ácida por parrilla.	31
Figura 9. Bomba de vacío, matraz y filtro de nitrocelulosa para filtrar muestras de músculo de pez león.	32
Figura 10. Espectrofotómetro de absorción atómica de horno de grafito Thermo Scientific iCE AAS 3500.	33
Figura 11. Ejemplo de embarcaciones sin control de emisiones que circulan en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.	35
Figura 12. Histograma de tallas para pez león <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en sitios del PNCOIMPCyPN.	37
Figura 13. Histograma de peso total PT para pez león <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en sitios del PNCOIMPCPN.	38

Figura 14. Regresión lineal de peso vs talla del pez león <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en sitios del PNCOIMPCyPN.....	39
Figura 15. Gráfica de cajas para datos de longitud total por sitio de muestro de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN. Las letras distintas indican diferencia significativa entre grupos de datos.	40
Figura 16. Gráfica de cajas para datos de peso total por sitio de muestro de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.....	41
Figura 17. Gráfica de concentraciones individuales de Cd, Cr y Pb de músculo de pez león <i>P. volitans/miles complex</i> capturados en el PNCOIMPCyPN.	43
Figura 18. Histograma de concentraciones de Cd en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	45
Figura 19. Histograma de concentraciones de Cr en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	45
Figura 20. Histograma de concentraciones de Pb en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	46
Figura 21. Gráfica de caja de concentraciones medias de Cd en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.....	47
Figura 22. Gráfica de caja por zona de muestreo de concentraciones de Cd en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN. Las letras distintas indican diferencia significativa entre grupos de datos.	48
Figura 23. Gráfica de caja por zona de muestreo de concentraciones de Cr en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN. Las letras distintas indican diferencia significativa entre grupos de datos.	50

Figura 24. Gráfica de caja por zona de muestreo de concentraciones de Pb en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.....	52
Figura 25. Gráfico de regresión lineal de LT vs Cd para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	54
Figura 26. Gráfico de regresión lineal de LT vs Cr para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCPN.	54
Figura 27. Gráfico de regresión lineal de LT vs Pb para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	55
Figura 28. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cd para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCPN.	56
Figura 29. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cr para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	57
Figura 30. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cr para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	57
Figura 31. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cd para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el polígono de Isla Mujeres del PNCOIMPCPN.....	60
Figura 32. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cr para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el polígono de Isla Mujeres del PNCOIMPCPN.....	61
Figura 33. Gráfico de regresión lineal de PT vs Pb para músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el polígono de Isla Mujeres del PNCOIMPCPN.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especies invasoras de mayor impacto registradas en las Áreas Naturales Protegidas del país.	7
Tabla 2. Primeros reportes de pez león en Áreas Naturales Protegidas.	13
Tabla 3. Programas implementados en Áreas Naturales Protegidas a partir de 2007 para la atención de especies exóticas invasoras.	13
Tabla 4. Concentración de metales pesados encontrados en especies potencialmente parte de la dieta del pez león <i>Pterois volitans/miles</i> complex.	16
Tabla 5. Peso y talla de los organismos de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en cada uno de los sitios del PNCOIMPCyPN.	36
Tabla 6. Estadística descriptiva para datos de longitud y peso de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	37
Tabla 7. Resultados de prueba de rangos múltiples de Fisher para longitud total y peso total por sitio de muestro del pez león <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	40
Tabla 8. Concentraciones de metales pesados Cd, Cr y Pb en músculo de pez león <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	42
Tabla 9. Resumen de las concentraciones de metales pesados Cd, Cr y Pb analizados en el músculo del pez león <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	44
Tabla 10. Resumen estadístico por zona de muestreo de concentraciones de Cd en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	48
Tabla 11. Resumen estadístico por zona de muestreo de concentraciones de Cr en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	49

Tabla 12. Resumen estadístico por zona de muestreo de concentraciones de Pb en mg kg ⁻¹ en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	51
Tabla 13. Tabla de correlaciones entre longitud total y concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb determinados en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCPN.	53
Tabla 14. Tabla de correlaciones entre peso total y concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb determinados en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el PNCOIMPCyPN.	56
Tabla 15. Tabla de correlaciones entre peso total y concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb determinados en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> en cada uno de los polígonos del PNCOIMPCPN.	58
Tabla 16. Tabla de correlaciones entre PT y concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb determinados en músculo de <i>P. volitans/miles complex</i> colectados en el polígono de Isla Mujeres del PNCOIMPCyPN.	59
Tabla 17. Plantas Municipales de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación en el estado de Quintana Roo.	63
Tabla 18. Desglose de la participación porcentual de actividades económicas en el estado de Quintana Roo.	65

1. INTRODUCCIÓN.

En México existe una gran variedad de ecosistemas, desiertos, arrecifes de coral, selvas, pastos marinos, etc., pero existe una franja de ecosistemas donde interactúan los sistemas terrestres y acuáticos; los sistemas costeros. En los sistemas costeros, puede existir una gran riqueza de paisaje, diversidad biológica y procesos ambientales que son resultado de la interacción de diversos factores como lo son, los procesos fluviales, marinos, subterráneos, eólicos, solares y por supuesto, factores antrópicos (Herrera-Silveira, *et al.* 2005). Lo anterior, supone una elevada complejidad estructural y gran vulnerabilidad que limita que los procesos naturales de los ecosistemas costeros permanezcan intactos, por lo que en México se ha optado por otorgarles cierto grado de conservación, dependiendo de sus características ecológicas únicas e importancia natural. Estos esfuerzos no impiden que el equilibrio de los ecosistemas costeros sea impactado por el gran desarrollo antropogénico que ocurre cerca de ellos; y es que, desde siempre, el ser humano se ha acercado a las zonas costeras en busca de nuevas opciones para el desarrollo de actividades como lo la pesca, el comercio, el transporte o el turismo (CONANP, 2006).

El desarrollo desmedido, el uso insostenible de los recursos y las políticas poco acertadas, hacen que los ecosistemas disminuyan su funcionamiento. En los ecosistemas del país pueden observarse la pérdida de biodiversidad, la sobreexplotación de los recursos, la introducción de especies exóticas invasoras, los grandes cambios de uso de suelo o la mala disposición y confinamiento de residuos de actividades humanas (García *et al.* 2014).

En el caso de la zona costera del Caribe de Quintana Roo, convergen todos los elementos de sobreexplotación de recursos costeros y acuáticos, contaminación de aguas y cambio de uso del suelo en general. Y dadas las características de la zona, que forma parte de un sistema de acuíferos cársticos, uno de los más importantes

del planeta. Con 165, 000 km², el acuífero cárstico de la Península de Yucatán (PY), se asienta sobre una plataforma de piedra caliza que abarca los estados de Campeche, Yucatán, Quintana Roo y partes de Tabasco, así como el norte de Guatemala y Belice (Bauer-Gottwein *et al.* 2011). Esta plataforma ha sido moldeada desde el período triásico por distintos fenómenos geológicos, como el impacto de un meteorito de gran tamaño al final del período Cretácico hace 65 millones de años que formó lo que actualmente es conocido como el cráter de Chicxulub (Gondwe, 2010; Bauer-Gottwein *et al.* 2011; Kačaroğlu, 1999).

La gran capacidad permeable del suelo cárstico permite que se produzcan infiltraciones que recargan constantemente el acuífero subterráneo y evita, al mismo tiempo, la existencia de cuerpos de agua superficiales permanentes (Mulligan y Charette 2009). Esto significa también que todos los residuos generados en la PY contenidos de manera incorrecta y lixiviados, son colectados por la red subterránea y llevados a través de ella hasta terminar en las costas (Figura 1) en un proceso rápido que deja pocas posibilidades de atenuar o degradar a los contaminantes, sobre todo si se trata de sustancias resilientes como los pesticidas o metales pesados (Kačaroğlu 1999).

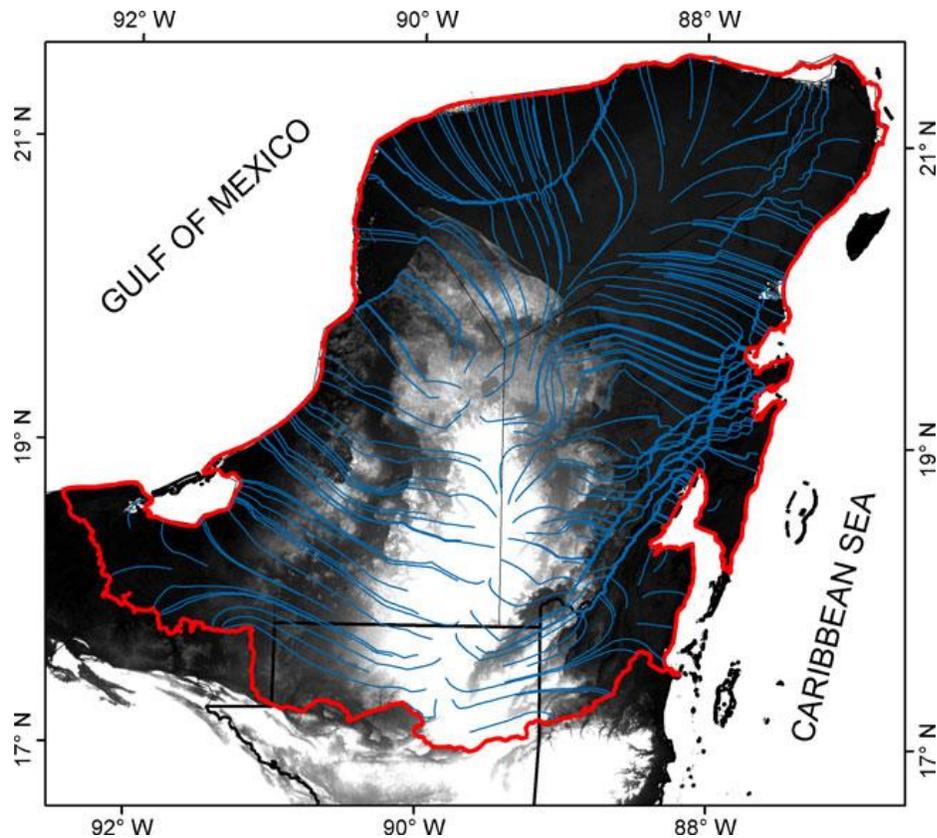


Figura 1. Localización y corrientes subterráneas del acuífero cárstico de la Península de Yucatán.

En el análisis de contaminantes del medio que pueden ser tóxicos y hasta letales para el ser humano hay que poner en la cabeza de la lista a los metales. A veces clasificados como metales pesados y metaloides, se refiere comúnmente como metal pesado a todos aquellos elementos de origen metálico que se utilizan en procesos industriales y que pueden llegar a ocasionar serios problemas medioambientales y de salud pública (Alloway, 2012). Para el presente trabajo se han considerado tres metales, cadmio (Cd), cromo (Cr) y plomo (Pb); por cumplir cuatro de las características de una sustancia tóxica: tienen efectos adversos sobre el hombre y el medio, son bioacumulables, tienen una gran persistencia en el medio ambiente y se desplazan grandes distancias mediante el aire y el agua.

El cadmio (Cd) se utiliza como pigmento en pinturas, esmaltes y tintas de impresión, en la fabricación de celdas fotovoltaicas y conductores y como estabilizador de plásticos de uso térmico como el PVC (Bodgen, *et al.* 1974). Se estima que cada año se liberan 13, 000 ton derivadas de la actividad humana, probablemente su mayor inserción al medio sea por su uso en la incineración de maderas, carbón y plásticos, la volatilización del caucho de las ruedas automotrices, la mala contención de baterías de cadmio-níquel y el humo y colillas de cigarro (Ramírez 2002). Tiene una vida media en el organismo humano de 17 a 30 años y se agrava en caso de llevar una dieta deficiente en hierro y proteínas. Su exposición prolongada puede llegar a provocar insuficiencia renal crónica, arterosclerosis aórtica, mala absorción ósea de calcio, malformaciones placentarias y fibrosis y enfisema pulmonar (McElroy, *et al.* 2006; Nava y Méndez 2011).

El cromo (Cr) es considerado como un metal traza esencial en animales, sobre todo en la parte metabólica de la glucosa. Se encuentra en distintos estados de oxidación, el Cr (0) o cromo metálico, Cr (III) o trivalente y Cr (VI) también llamado hexavalente. En la dieta se recomienda un consumo moderado de alimentos ricos en Cr (III) ya que su deficiencia se relaciona con padecimientos asociados a la diabetes y la regulación de la glucosa en la sangre, el colesterol y los ácidos grasos (Alvarado *et al.* 2002 y Téllez *et al.* 2004). Por otro lado, el Cr (0) y sobre todo el Cr (VI) son formas de cromo producidas por procesos industriales, altamente tóxicas y clasificadas por la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC) como cancerígeno comprobado por las afectaciones que ocasiona sobre todo en el sistema respiratorio (IARC, 1990). De manera industrial el cromo se utiliza en colorantes, en el curtido de cuero, en la preservación de la madera, como inhibidores de corrosión, en barrenos para la extracción de petróleo y en el tóner para copadoras (Molina *et al.* 2010). La contaminación por cromo en el agua ocurre por la quema de productos de carbón y petróleo y durante la descarga de desechos de desechos de la manufactura de productos para el curtido del cuero; la mayor

parte de las veces, el cromo se va al fondo o se reduce rápidamente de Cr (VI) a Cr (III) al entrar en solución con materia orgánica (Porras 2010 y Molina *et al.* 2010).

Probablemente el caso del plomo (Pb) sea el más crítico para el medio ambiente, es un metal no esencial para los seres vivos pero que existe en todos los tejidos de los mamíferos, se presenta en dos estados de oxidación, Pb^{+2} y Pb^{+4} , siendo Pb^{+2} el predominante en ecosistemas acuáticos (Villanueva y Botello 1992). Sus índices de detección ambiental se han incrementado alrededor de 1000 veces sobre todo a partir de 1950 (ATSDR 2007), ya que sus usos también han aumentado, se encuentra comúnmente en tuberías, baterías para vehículos, municiones, revestimientos de cables y pigmentos para pinturas y esmaltes (Molina *et al.* 2010). La introducción del plomo al medio ocurre por la remoción ocasionada por el aire y la lluvia de los materiales hechos con plomo, comienza con la contaminación del suelo y escurre hacia las fuentes de agua, en el caso de la PY, se infiltran al acuífero subterráneo. El plomo puede ser inhalado o ingerido mediante agua o alimentos contaminados, se acumula en huesos, hígado, pulmones, cerebro y bazo, causando, sobre todo, daños en el sistema nervioso central, ya sea temporales o permanentes debido a que su vida media varía desde los 35 días en sangre hasta los 30 años en huesos afectados (ATSDR 2007, Yucra *et al.* 2008 y Nava y Méndez 2011).

El factor común en la entrada de estos contaminantes al medio costero es la actividad humana, el riesgo de aportaciones se incrementa si estas actividades se realizan cerca de las costas o si hay una carga demográfica considerable, como es el caso de la costa noreste de Quintana Roo (Rubio *et al.* 2010). En esta región se encuentra el área de estudio, el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCyPN), una zona protegida de jurisdicción federal que pertenece al segundo ecosistema coralino más gran del planeta, el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) (SEMARNAT 2016). En la zona de influencia del el PNCOIMPCYPN, suceden una serie de complejas interacciones

donde convergen la plataforma cárstica ya mencionada, el Área de Protección de Flora y Fauna Manglares de Nichupté, el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez con flujos subterráneos de agua (ojos de agua) y los aportes de agua residuales, tratada y no tratada, de la ciudad de Cancún, que recibe más de 6 millones de turistas al año (Carbajal 2009, INEGI 2016).

La combinación de factores que intervienen en la zona costera del PNCOIMPCYPN contribuye a que también exista una diversa cadena trófica de comunidades nativas de corales, crustáceos, pastos marinos y peces donde se producen relaciones de cooperación, depredación y competencia entre ellas. Desafortunadamente, la sobreexplotación de los recursos naturales, la contaminación y la introducción de especies exóticas invasoras, ha mermado las condiciones naturales de esta área natural (SEMARNAT 2016 y Chávez 2016).

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) define a las especies exóticas invasoras (EEI) como aquellas que prosperan sin ayuda del ser humano fuera de su hábitat de distribución natural y se consideran como uno de los principales generadores de cambio ambiental en el mundo (CBD 2009 y Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras 2010). Las EEI pueden llegar a ocasionar la extinción de especies nativas, degradación de los ambientes terrestres y acuáticos, deterioro de los recursos naturales y afectar la calidad de agua y con ellos el valor turístico de las localidades (Wilcove *et al.* 1998 y Pimentel *et al.* 2005). Pimentel *et al.* (2001) consideran que los ambientes acuáticos son más sensibles a las invasiones que los terrestres, calculan que el 40% de extinciones ocurridas en ecosistemas acuáticos, son producidas por EEI. En el ámbito nacional, se desconocen en su totalidad los impactos de las EEI sobre los ecosistemas, pero de las 115 especies acuáticas consideradas como de alta prioridad para el país, 35 se encuentran distribuidas en Áreas Naturales Protegidas (ANP) (García *et al.* 2014), esto incluye a diversos grupos y especies de vertebrados acuáticos (Tabla 1), que,

gracias a distintos planes de manejo y conservación, han logrado mitigar ciertos impactos.

Tabla 1. Especies invasoras de mayor impacto registradas en las Áreas Naturales Protegidas del país.

Grupo	Nombre científico	Nombre común	Origen	ANP de registro observado
Peces	<i>Cyprinus carpio</i>	Carpa común	Europa y este y sur de Asia	15
	<i>Oreochromis niloticus</i>	Tilapia del Nilo	África	19
	<i>Oreochromis mossambicus</i>	Tilapia de Mozambique	África	14
	<i>Pteoris volitans</i> y <i>P. miles</i>	Pez León	Pacífico oeste y Oceanía	8
Anfibios	<i>Rhinella marina</i>	Sapo gigante	Noroeste de México hasta Brasil	25
Reptiles	<i>Trachemys scripta elegans</i>	Tortuga japonesa	Estados Unidos	2
Aves	<i>Bubulcus ibis</i>	Garza garrapatera	Península Ibérica y Medio Oriente	13
	<i>Columba livia</i>	Paloma doméstica	Europa, norte de África	7
	<i>Passer domesticus</i>	Gorrión casero	Medio Oriente y Mediterráneo	10

Fuente: CONABIO 2010.

La colonización de nuevos ecosistemas por parte de las EEI ocurre de manera natural con el paso del tiempo, pero el incremento de la población, sus desplazamientos y actividades, aumentan la frecuencia con la que una especie invade un hábitat nuevo. Las rutas de introducción pueden ser variadas, las artificiales o causadas por el ser humano, pasan por la liberación intencional de especies, las aguas de lastre usadas por grandes embarcaciones, el transporte de alimentos y la producción y comercio de especies exóticas (Semmens 2004, Kriesch 2007 y Waugh 2008). Una actividad que por su naturaleza pone en contacto a los

cuerpos de agua interiores y exteriores con especies que pueden no ser endémicas del lugar, es la acuicultura. Con alrededor de 230 especies de animales con valor comercial cultivadas en el mundo, pueden ocurrir introducciones de manera deliberada o accidental en casi cualquier etapa del proceso de producción o comercialización de los productos (Monteforte *et al.* 2014).

La especie liberada accidentalmente por la acuicultura (Whitfield *et al.* 2002) que más destaca por su riesgo, competencia, establecimiento y vulnerabilidad que causa, según lo evaluado por el Método de Evaluación Rápida de Invasibilidad (MERI) es el pez león (*Pterois volitans* y *P. miles*) con un índice de 0.89, la más alta para cualquier especie establecida o con riesgo de establecerse en el país (Born *et al.* 2017).

El pez león *P. volitans* y *P. miles* (Fig. 2) son especies de la familia Scorpaenidae originarias del océano Indo-Pacífico, son catalogados como la primera invasión de un pez marino en establecerse de manera permanente en el océano Atlántico, Golfo de México y Mar Caribe (Schofield 2009). Son dos especies que en su hábitat natural son morfológicamente diferenciables, pero en el territorio invadido, solo son identificados mediante análisis genéticos (Schofield 2016), por lo que se referirá a ellos como pez león de manera indistinta. Hasta la fecha han llegado a invadir desde el sur del estado de Nueva York hasta Venezuela y las Antillas menores (Figura 3). Son identificados fácilmente por su patrón de rayas verticales oscuras, tentáculos arriba de los ojos y aletas en forma de abanico. Cuentan con 13 espinas dorsales y 3 espinas anales con glándulas productoras de escorpaenotoxina que se extienden por toda la espina y causan daño cardiovascular, neuromuscular y citolítico al ser rotas y entrar al cuerpo de la víctima. Habita regiones tropicales donde el agua oscila entre los 22 y 28° C y a profundidades que van desde la superficie hasta los 300 m. Son bastante prolíficos, producen huevos en forma de masas flotantes, sus larvas son de nado libre, tienen altas velocidades de crecimiento inicial y son capaces de sobrevivir largos períodos de tiempo con poco o nada de alimento (Freshwater, *et*

al. 2009; Morris, *et al.* 2009; Ahrenholz y Morris 2010; Brito, *et al.* 2014). Son de hábitos nocturnos, aunque también suelen cazar durante el día, para cazar extienden sus aletas pectorales en forma de abanico para acorralar a sus víctimas e inyectarles veneno de ser necesario para después tragarlas de un solo bocado gracias a su habilidad de expandir su estómago hasta 30 veces su tamaño para consumir presas de hasta 2/3 de su tamaño (Fishelson, 1997; Morris y Whitfield, 2009; INS, 2015; Fishdatabase consultada en 2019; Schofield 2019).



Figura 2. Juveniles de pez león *P. volitans/miles complex* en cautiverio.



Figura 3. Área de invasión del pez león *P. volitans/miles complex*.

Esta invasión supone una de las mayores amenazas para los ecosistemas de arrecifes coralinos del Golfo de México y océano Atlántico (Albins y Hixon, 2011; Brito, *et al.* 2014). Sus hábitos de depredación generalistas en el Caribe incluyen a las familias Apogonidae, Blenniidae, Gobiidae, Labridae, Pomacentridae y Scaridae; gracias a esto y su alto índice reproductivo compite y ha desplazado a especies endémicas en el mismo nivel trófico como el mero gris *Cephalopholis cruentata*, el pargo maestro *Lutjanus apodus* y hasta otras especies de peces escorpión como *Scorpaena plumieri* (Arredondo-Chávez, 2016; González, *et al.* 2017).

Para combatir los efectos de esta especie invasora, se han puesto en marcha distintas estrategias, como lo son torneos de pesca deportiva, centros de acopio para organismos capturados, control mediante el consumo y su uso como especie centinela de calidad ambiental; es decir, para ayudar a identificar riesgos o cambios ambientales en un ecosistema (Brito, *et al.* 2014; Luis, *et al.* 2016; Osorio, 2018). En este último caso, *P. volitans* y *P. miles* pueden usarse en el monitoreo continuo de contaminantes para evaluar la efectividad de las medidas de gestión de desechos ya que cuentan con una población abundante, movilidad reducida y fácilmente identificable en el medio marino (Valderrama, 2014).

2. ANTECEDENTES

La introducción de especies exóticas existe desde el comienzo de la historia del hombre, pero a partir del siglo XVI, con el descubrimiento de América, las introducciones se dispararon con la introducción de plantas y animales de consumo, textiles, transporte y de compañía (Pimentel 2002 y Aguirre *et al.* 2009). El impacto económico, sanitario y medioambiental que han causado las especies exóticas invasoras (EEI) con el paso del tiempo ha llevado a un estado de alerta constante y a la creación de distintos esfuerzos internacionales, como la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), en 1984; el Programa Mundial de Especies Invasoras (GISP), en 1996; y nacionales, como el Programa de Especies Invasoras de la CONABIO en 1997 (Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras 2010 y CONABIO 2018), en donde se establece que en México se encuentran 46 de las 100 especies exóticas invasoras más dañinas del mundo (Lowe *et al.* 2004).

El primer registro de pez león se dio en 1985, cuando un organismo fue reportado por un pescador en la Florida, EEUU. En 1992 se reportó que al menos 6 organismos fueron liberados de un acuario, después de ser dañado por el huracán Andrew (Morris *et al.* 2008, Schofield 2009, Morris y Withfield 2009, Schofield 2010). En el Caribe mexicano se registró por primera vez en Jardines de Palancar, Parque Nacional Arrecifes de Cozumel en 2009, posteriormente se registraron en el el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc y en toda la zona arrecifal del Caribe mexicano (Tabla 2) (Schofield 2009, Schofield 2010 y Brito *et al.* 2014).

En México se han creado sitios de conservación y vigilancia de recursos naturales, desde 2007 se han implementado alrededor de 126 programas en 59 sitios prioritarios como, ANPs, islas y sitios Ramsar para la atención de EEI. De estos, 27 programas están dirigidos a atender especies acuáticas, en particular al grupo de

los peces y especialmente para el pez león *Pterois volitans/miles complex* (Tabla 2) (CONANP 2012 y García *et al.* 2014).

Tabla 2. Primeros reportes de pez león en Áreas Naturales Protegidas.

Área Natural Protegida	Fecha de registro
Parque Nacional Arrecifes de Cozumel	ene-09
Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Nizuc y Punta Cancún	feb-09
Parque Nacional de Isla Contoy	feb-09
Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an	abr-09
Parque Nacional Tulum	abr-09
Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos	may-09
Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro y Parque Nacional Arrecifes de X'calak	jul-09
Parque Nacional Arrecife Alacranes	dic-09
Reserva de la Biosfera Ría Lagartos	jul-10
Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano	dic-11
Parque Nacional Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan	may-12

Tomado de Brito *et al.* 2014.

Tabla 3. Programas implementados en Áreas Naturales Protegidas a partir de 2007 para la atención de especies exóticas invasoras.

ANP región prioritaria o sitio Ramsar	Especies o hábitat	Tipo de programa	Año
APFF Ciénagas de Lerma	Lirio acuático	Control	2008 – 2012
	Carpa	Control	2011 – 2012
PN Cañón del Sumidero	Peces	Monitoreo	Desde 2007

APFF Cañón de Santa Elena	Carrizo gigante	Control	Desde 2005
PN Maderas del Carmen	Carrizo gigante	Control	Desde 2005
APFF Cuatro Ciénegas	Pez joya	Erradicación	Desde 2008
	Carrizo gigante	Control	Desde 2007
	Lirio acuático	Control y erradicación	Desde 2007
RB Zicuirán-Infiernillo	Peces diablo	Monitoreo y control	2010
APFF Islas del Golfo de California, Sin.	Peces diablo	Prevención y control	Desde 2011
RB El Pinacate y Gran Desierto de Altar	Pez mosquito	Control	2006 – 2012
RB Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado	Hábitad ripario	Restauración en el río	2010 – 2012
	Pez cachorrillo, ictiofauna exótica	Conservación	2004 – 2008
	Tramo limítrofe del río Colorado	Restauración	2007 – 2009
RPC Sierra Tarahumara	Trucha Arcoiris	Control	Reportado en 2008
APFF Lagunas de Términos	Repoblación con mojarra castarrica, tenhuayaca, paleta y pejelagarto	Prevención	Desde 2003
PN Arrecife Alacranes	Pez león	Control	2010 – 2011
RB Ría Lagartos	Pez león	Prevención y control	Desde 2009
RB Banco Chinchorro	Pez león	Control	Desde 2009
PN Isla Contoy	Pez león	Prevención y control	Desde 2009
RB Sian Ka'an	Pez león	Control	Desde 2009
PN Arrecifes de Cozumel	Pez león	Control	Desde 2009
PN Tulúm	Pez león	Control	Desde 2009

PN Arrecifes dr Puerto Morelos	Pez león	Control	Desde 2009
PN Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc	Pez león	Prevención y control	Desde 2010
PN Arrecife de Xcalak	Pez león	Control	Desde 2009
RB Caribe mexicano	Pez león	Control	Desde 2009
Sitio Ramsar Ensenada de Pabellones	Peces diablo	Control	2011

Tomado de García *et al.* 2014.

En la zona de invasión del mar Caribe, el pez león se ha apropiado todos los hábitats costeros marinos; manglares, pastos marinos, fondos rocosos y estructuras coralinas rígidas y blandas (Barbour *et al.* 2010; Arbeláez y Acero 2011; Hernández-Abello *et al.* 2015). Los efectos ecológicos del pez león es son la alteración del equilibrio trófico en los ecosistemas donde se establece (Albins y Hixon 2008, Morris *et al.* 2009) disminuyendo las especies locales y endémicas, ya sea por depredación como en las familias Scaridae, Pomacentridae, Bothidae, Acanthuridae o por competición como el caso de las familias Sparidae, Haemulidae y Serranidae (Arredondo-Chávez 2016, Rojas 2016, Echevarría 2017, Bogdanoff 2018, Villaseñor y Herrera 2018).

La dieta del pez león cambia con respecto a su desarrollo ontogénico. Bogdanoff (2018), Arredondo-Chávez *et al.* (2016) y Villaseñor (2018) reportan que la dieta cambia de ser a base de crustáceos, principalmente de las familias Solenoceridae, Palaemonidae y Mysidae, en peces león juveniles, a una dieta combinada con pequeños moluscos y peces de las familias Labrisomidae, Gonodactylus, Octopodidae y Lysmatidae y por último en juveniles maduros y adultos, una dieta de peces sobre todo de las familias Grammatidae, Apogonidae, Labridae y Pomacentridae.

Se han realizado trabajos sobre la bioacumulación de metales pesados en algunas de las familias que son consumidas habitualmente por el pez león en su área de invasión, Mantelatto *et al.* (1999) analizaron las concentraciones de Pb, Cr, Cd, Cu y Zn del camarón de siete barbas *Xiphopenaeus kroyeri* (Crustacea, Penaeidae), un crustáceo que llega a medir hasta 14 cm y es de alta importancia comercial para el consumo humano. En 2016 Mendoza-Carranza y colaboradores evaluaron la concentración de metales pesados de Cd, Ni, Cr, Pb, V y Zn en la estructura trófica en algunos componentes abióticos en una sección de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla. Encontraron que las mayores concentraciones de los metales pesados Cr, Cd, Ni, V y Pb están relacionadas con la exposición de los crustáceos o moluscos con sedimentos, partículas en suspensión, fitoplancton y epifitos. En el Caribe puertorriqueño Sastre *et al.* (1999) encontraron que *Callinectes sapidus* y *C. bocourti* (Crustacea, Portunidae) almacenan una concentración de metales pesados Cu, Cd y Pb en su hepatopáncreas significativamente mayor que en el resto de su cuerpo, y que la cantidad de metales pesados contenidos en los cangrejos, es mayor cuando se detecta contaminación de fuentes industriales en el cuerpo de agua, comparado con sitios impactados por agricultura y desarrollo urbano. Morales-Hernández *et al.* (2004) registraron las concentraciones de los metales pesados Ni, Cu, Cd, Cr, Zn, Pb, Mn y Fe de distintos tejidos de la langosta verde *Panulirus gracilis* (Crustacea, Palinuridae), encontrando que el músculo, la parte comestible es en donde existe menor concentración de metales pesados. Los resultados de las concentraciones de estos y otros trabajos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración de metales pesados encontrados en especies potencialmente parte de la dieta del pez león *Pterois volitans/miles complex*.

Especie	Concentración media (mg kg ⁻¹)						Autor
	Cd	Cr	Pb	Zn	V	Cu	
<i>Xiphopenaeus kroyeri</i>	4.41 ± 2.41	5.25 ± 1.78	73.11 ± 37.81	111.50 ± 40.59	N/A	73.03 ± 34.45	Mantelatto <i>et al.</i>

<i>Pomacea flagellata</i>	0.41 ± 0.70	N/A	N/A	49.25 ± 3.95	N/A	N/A	Medoza-Carranza
<i>Callinectes similis</i>	0.12 ± 0.08	N/A	N/A	113.80 ± 20.03	N/A	N/A	Medoza-Carranza
<i>Macrobranchium acanthurus</i>	0.72	1.11	N/A	61.56	1.4	N/A	Medoza-Carranza
<i>Centropomus undecimalis</i>	N/A	N/A	0.43 ± 0.74	N/A	0.35 ± 0.60	N/A	Medoza-Carranza
<i>Equinometra lucunter</i>	N/A	8.3 ± 0.81	N/A	N/A	N/A	2.9 ± 0.18	González <i>et al.</i>
<i>Callinectes sapidus</i>	0.345 ± 0.603	N/A	1.2	N/A	N/A	5.912 ± 0.716	Sastre <i>et al.</i>
<i>Callinectes bobourti</i>	0.476 ± 0.76	N/A	0.8	N/A	N/A	10.102 ± 0.734	Sastre <i>et al.</i>
<i>Pleoticus muelleri</i>	0.58	N/A	N/A	38.6	N/A	82.9	Jeckel <i>et al.</i>
<i>Panulirus gracilis</i>	0.3	0.41	1.6	67	N/A	24.4	Morales-Hernández <i>et al.</i>

Concentraciones en g kg⁻¹. N/A= No analizado.

Las causas más importantes de la contaminación por metales pesados en el gran Caribe son las descargas de aguas residuales, uso de pesticidas para la agricultura, actividades mineras, extracción y manejo de hidrocarburos y desechos de las actividades industriales (Fernández *et al.* 2007). La zona del Golfo de México y mar Caribe es unas rutas muy transitadas de transporte de hidrocarburos (Botello *et al.* 1997; Siung-Chang 1997; Guzmán y García 2002). Históricamente se registró un gran accidente petrolífero en territorio mexicano, el del Ixtoc I en 1979, el más grande y conocido de su tipo hasta esa fecha. Farrington (1995, citado por Botello *et al.* 1997), estima que la derrama crónica durante el transporte de hidrocarburos es más sustancial que los grandes accidentes aislados. En el caso de los aportes de agua superficial a los ecosistemas costeros, Jaffé *et al.* (1995) registraron concentraciones elevadas de metales pesados Cd, Ni y Cu en organismos cerca de desembocadura de los ríos en el Caribe Venezolano, pero también reportaron evidencia de transporte de largo alcance de los mismos metales. En un estudio

subsecuente en la misma región, Alfonso *et al.* (2005) registraron que las concentraciones de los metales Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Ti y Sr en la almeja *Tivela mactroides* fueron altas para la zona de influencia del mismo río y que no hubo cambios en los 10 años que pasaron entre ambos estudios.

En México se han realizado varias investigaciones sobre las concentraciones de metales pesados en la zona costera. De la Cruz *et al.* (2013) determinaron las concentraciones de metales pesados Cd, Pb y Ni en los sedimentos de la zona de manglares con influencia de la Laguna de Términos, Campeche. De acuerdo con los autores, la cercanía de la zona de estudio con la ciudad del Carmen, determinaron concentraciones de metales pesados superiores a los permisibles por la normatividad mexicana. Por otro lado, Zamudio *et al.* (2014), diagnosticaron la salud del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) mediante el análisis de metales pesados Cu, Cd y Zn en sedimentos, registrando una concentración significativamente mayor de metales pesados en la región norte del Parque Nacional, una zona caracterizada por la gran cantidad de descargas domésticas y municipales al medio marino y su cercanía con el puerto de altura de Veracruz. González *et al.* (2004) evaluaron metales pesados Cd, Cr, Cu y Pb en el sedimento de costas de Yucatán, registrando un patrón de concentración $Pb > Cr > Cd > Cu$ en los sedimentos de un área que abarca desde Las Coloradas hasta el puerto de Sisal, Yucatán, una región donde los intercambios de agua con el interior (con suelo de naturaleza cárstica e influenciadas por aguas procedentes del Canal de Yucatán y el Caribe mexicano) es alto. En La bahía de Chetumal, Quintana Díaz *et al.* (2006) evaluó la contaminación de la Bahía mediante la cuantificación de metales pesados Hg, Pb Cd y Zn (en sedimentos y una especie de moluscos bivalvos *Mytilopsis sallieri* como bioindicador de la incorporación de los metales pesados a la cadena trófica. Encontraron que, aunque alta, a la concentración de metales pesados en el tejido de *M. sallieri*, esta fue menor a la determinada en el sedimento de la Bahía, pero correspondientes a la concentración $Zn > Pb > Hg > Cd$ en ambos casos. Concluyen que la mayor concentración de metales pesados se

encuentra en una zona con descargas continuas al medio marino y que el mejillón *M. sallieri* es un bioindicador confiable para la contaminación por metales pesados en una zona costera impactada por descargas constantes al medio marino. En un trabajo de larga duración financiado por CONABIO, Carbajal (2009), realizó la caracterización hidrográfica, del sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, un espacio contiguo al Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCyPN) que se encuentra en un severo deterioro debido a las descargas de aguas residuales de la zona turística de Cancún. Carbajal evaluó la concentración de metales pesados Pb, Cd, Zn, Cu y Fe encontrando en todos los sitios concentraciones de contaminantes mayores a los límites máximos permisibles contenidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996. En dicha investigación se concluyó que las variaciones espaciotemporales entre las concentraciones de metales se deben al alto tráfico de embarcaciones por el área, la cercanía con ojos de agua subterráneos, y a la afluencia de turistas y cercanía con las bocas que conectan con el mar Caribe.

Históricamente se han utilizado distintas especies de peces como bioindicadores de la contaminación en el medio natural, gracias a talla y distribución, la relación que existe entre su ontogenia y los nichos ecológicos que ocupa, su relativa longevidad y su sensibilidad a los agentes externos causantes de estrés (Chovanec *et al.* 20013). El guppy *Poecillia reticulata* ha sido usado como especie bioindicadora de contaminación en la cuenca del río Paraná (de Souza y Tozzo, 2013), se encontró que este guppy, reduce su hábitat debido al efecto del de la contaminación de origen antropogénica. Birungi *et al.* (2007) utilizaron a la tilapia *Oreochromis niloticus* para evaluar la salud del ecosistema del lago Victoria, mediante el análisis de metales pesados Zn, Cr y Mn en distintos órganos del pez. Los resultados presentan que la tilapia es un buen indicador de la calidad del agua, ya que tiene alta tolerancia a situaciones adversas de contaminación, y que el orden de acumulación de metales pesados en el cuerpo del pez es branquias > hígado > músculo.

El uso de especies invasoras como bioindicador se vuelve común, conforme se establecen nuevas especies. Raymundo *et al.* (2014), evaluaron los metales pesados Cd y Pb en cuatro especies invasoras, carpa herbívora *Ctenopharyngodon idella*, tilapia *O. niloticus*, carpa común *Cyprinus carpio* y pez diablo *Pterygoplichthus pardalis* de un ecosistema ribereño de la cuenca Usumacinta-Grijalva. Encontraron que las especies analizadas presentaban una mayor concentración de Cd que de Pb, pero siempre debajo de los límites máximos permisibles en la normatividad mexicana. El pez diablo *P. pardalis* en la cuenca del Usumacinta-Grijalva, ha sido utilizada para consumo y como ingrediente en la preparación de harinas de pescado y alimentos balanceados para peces, propuesta similar a la de aprovechar el pez león en el Caribe. Maldonado *et al.* (2015), evaluaron la inocuidad de la harina de *P. pardalis* usada con fines alimenticios mediante la determinación de metales Zn, Fe, Cu, Cd y Pb, todos los valores estuvieron dentro del límite permisible y la harina de pez diablo no representó un riesgo a la salud humana.

El pez león también ha sido usado utilizado como bioindicadora del estado de salud de los ecosistemas, gracias a su nivel trófico superior, su carácter de especie exótica invasora y su alto potencial de consumo humano. Hoo-Fung *et al.* (2013) analizaron la cantidad de metales pesados As, Cd, Pb y Hg contenidos en el músculo de pez león en Jamaica, encontraron una fuerte concentración de As total, pero una relativa baja concentración de As inorgánico, cerca del 1.3% de la ingesta semanal para un adulto. Los metales Cd y Pb no llegaron al 1% de la ingesta semanal, mientras que el Hg llegó a valores del 6.48%. En Florida, EE. UU., se realizó la evaluación de la concentración de Hg en el músculo de *P. volitans/miles complex* (Huge *et al.* 2014), sin encontrar organismos que superaran el Límite Máximo Permisible (LMP) de 0.50 ppm y sin encontrar relación alguna entre las tallas de los organismos y su respectiva concentración de metales. En un trabajo realizado en Curacao, Ritger *et al.* (2018) analizaron las concentraciones de metales pesados de los peces león en los sitios donde habitualmente se capturan para consumo humano, los autores reportan que para los metales asociados a la

refinación del petróleo Al, As, Ba, Sb, Se y Sr, no se encontró relación entre la concentración de metales y su cercanía con los puntos de refinación; mientras que, los metales Pb, Cr, Cd, Ni y V, los valores están por debajo de la concentración detectable por el método de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente.

En el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) se registran dos trabajos de determinación de metales pesados en pez león. En uno de ellos, Reyes-Aguilar (2018) determinó una relación de metales pesados $Pb > Cd > Cr > Hg$ donde Pb, Cd y Cr, rebasan los LMP de algunas legislaciones internacionales y son consideradas como riesgosas en caso de un consumo sostenido. Por otro lado, Alarcón (2019) reporta un orden de concentraciones $V > Zn > Pb > Cd$, donde solo Pb rebasa los límites establecidos en la normatividad mexicana.

3. JUSTIFICACIÓN.

El Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCyPN) está inmerso en uno de los destinos turísticos más importantes del país, por lo que la mala disposición de residuos y de la contaminación producida por la actividad turística en la zona, sumado a las características cársticas de la Península de Yucatán, propician que todos los contaminantes generados y mal manejados, terminen contaminando el manto freático y los ecosistemas costeros, alterando el equilibrio de una zona muy susceptible a cambios.

El pez león *Pterois volitans/miles complex* es una especie invasora y un depredador importante que se alimenta de prácticamente cualquier organismo (peces, crustáceos y moluscos). Esto lo mantiene como un depredador tope en la cadena alimenticia y como consecuencia, lo hace el receptor final de la biomagnificación de contaminantes y metales pesados, que potencialmente puedan existir en los ecosistemas arrecifales de las zonas de invasión.

4. HIPÓTESIS.

Las fuentes antropogénicas de elementos contaminantes en la zona de estudio, no tendrán efecto significativo sobre la concentración de metales pesados registrada en el músculo de pez león *Pterois volitans/miles complex*.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Determinar la concentración de metales pesados en el músculo de pez león *Pterois volitans/miles complex* en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, zona norte del Caribe mexicano.

5.2 Objetivos específicos

Determinar las fuentes de contaminación por metales pesados en peces león colectados en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, zona norte del Caribe mexicano.

Determinar la concentración de Pb, Cd y Cr en el músculo de pez león en sitios del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Establecer la relación entre la concentración de metales pesados y las fuentes puntuales de contaminación antropogénica en la zona de estudio.

6. ÁREA DE ESTUDIO.

El Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCyPN) se encuentra en las costas del estado de Quintana Roo, el estado más oriental de la República. Con 5 millones de hectáreas, Quintana Roo representa el 2.2% del territorio nacional, colinda al sur con los países de Belice y Guatemala y al oeste con los estados de Yucatán y Campeche, por el norte y el este lo limitan el Golfo de México y el Mar Caribe, respectivamente, siendo este último la porción más extensa de una costa dominada por playas arenosas, pocas veces rocosa y sin acantilados (INEGI, 2016; SEMARNAT, 2016) (Figura 4).

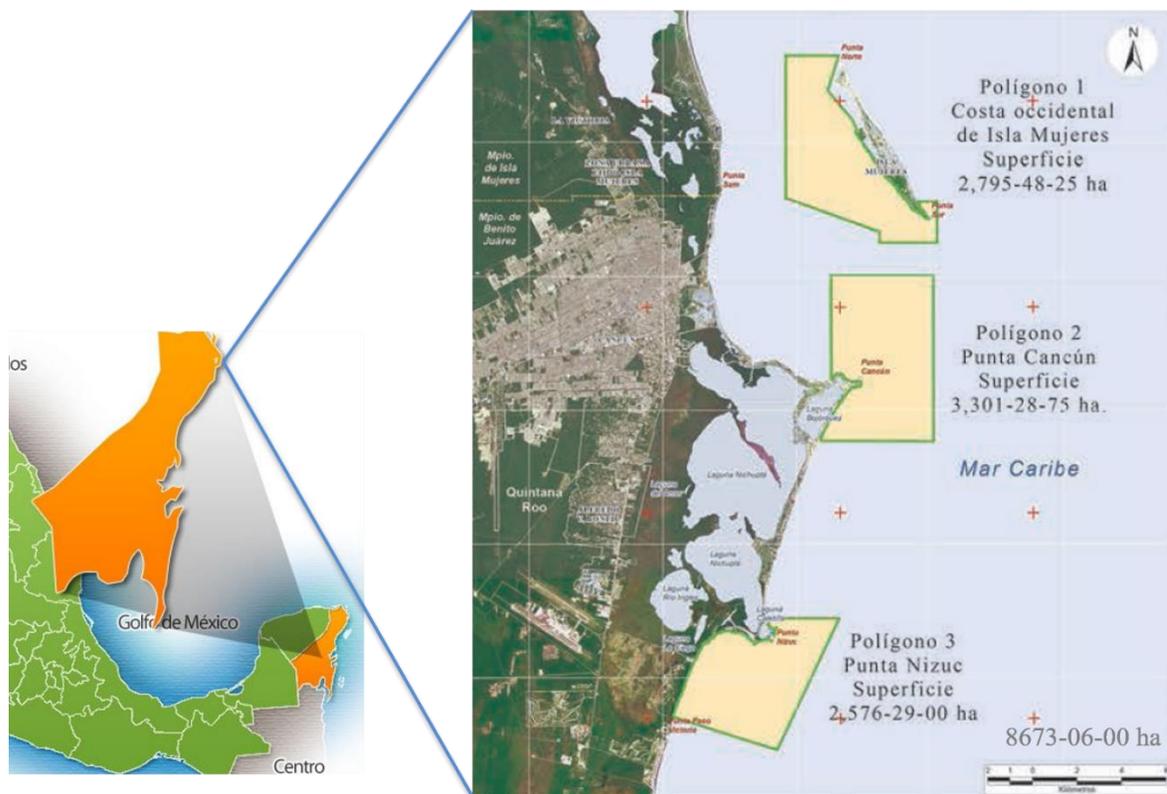


Figura 4. Localización geográfica de Quintana Roo y el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (SEMARNAT, 2016).

El estado de Quintana Roo forma parte de la losa de Yucatán, una gran plataforma calcárea marina formada principalmente de piedra caliza muy permeable que da lugar a condiciones cársticas como lo son ríos subterráneos y ojos de agua. Existen pocos accidentes geográficos en el estado, la mayoría de estos, hundimientos en forma de cenotes y lagunas que forman parte del Gran Acuífero Maya, el sistema de cuevas inundadas más grande del planeta. Otro de los accidentes notables son sus islas Holbox, Contoy, Mujeres y Cozumel, todas de importancia turística y de conservación (Pozo *et al.* 2011).

El PNCOIMPCyPN se ubica en la costa noreste del estado de Quintana Roo, en los municipios de Isla Mujeres y Benito Juárez. Cuenta con ocho mil 673-06-00 hectáreas dividido en tres polígonos para su conservación y manejo sustentable: Costa Occidental de Isla Mujeres con dos mil 795-48-25 hectáreas, Punta Cancún con tres mil 301-28-75 hectáreas y Punta Nizuc con dos mil 576-29-00 hectáreas.

En la zona domina un clima cálido subhúmedo con régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno, isotermal y con presencia de canícula. La temperatura media anual es superior a los 29.3° C y una precipitación promedio de 1337.7 mm. La zona generalmente presenta condiciones estables a lo largo del año con poca variación estacional, pero es el tercer estado más susceptible a ser impactado por huracanes y ondas tropicales durante el verano y otoño (Ramírez, 2009; CONACyT-CONAGUA, 2012).

La dinámica de corrientes marinas del PNCOIMPCyPN está dominada por la corriente del Caribe, llevando agua desde el sureste hacia el estrecho de Yucatán en el norte, dejando en la parte de la plataforma una salinidad de 35 a 36 ppm y de 28° C en verano y 24° C en invierno (Vega-Zepeda, *et al.* 2006).

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Trabajo de campo

Los organismos de pez león *Pterois volitans/miles complex* fueron obtenidos en colaboración con el personal del Laboratorio de Ecología y Biología de Organismos Acuáticos (LEBOA) de la Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY-UCIA). Las colectas se realizaron mediante buceo con equipo autónomo SCUBA y con arpón de tipo hawaiana. En total se colectaron 79 organismos, 18 en el polígono de Punta Cancún (PC), 20 en Punta Nizuc (PN) y 41 dentro del área perteneciente a Isla Mujeres (IM) (Figura 4). Una vez colectados, fueron colocados temporalmente en hielo y transportados al LEBOA, donde se congelaron a -10° C para su posterior análisis.

7.2 Localización de fuentes puntuales de contaminación.

Durante los meses de junio a agosto del 2018 se realizaron recorridos a pie por la costa de los tres polígonos del Parque. Se prestó especial atención en las actividades antropogénicas que se realizan en la zona, en su mayoría recreacionales y de turismo, los aportes de aguas continentales y efluentes observados a simple vista fueron fotografiados y referenciados geográficamente, se registró el testimonio de transeúntes y algunos operativos de los centros vacacionales con respecto a las prácticas que se llevan a cabo en la región y el estado general de la zona y el ecosistema. Por último, se tomó en cuenta el tráfico marítimo y el estado de las embarcaciones, complementándolo con información proporcionada por la CONANP para el manejo del Parque.

7.3 Trabajo de laboratorio y análisis de las muestras

A todos los organismos de pez león se les realizó análisis merísticos y morfométricos. Para el análisis merístico, mediante revisión visual de cada organismo, se contabilizaron el número de radios y espinas dorsales y se tomó en cuenta la presencia o ausencia de antenas en el rostro de los peces. Para los datos morfométricos se utilizó un ictiómetro determinando la Longitud Total (LT) y Longitud Estándar (LS) (Figura 5). Una balanza Ohaus Scout Pro fue utilizada para determinar peso total (PT), peso del estómago (PE), peso del hígado (PH) y peso de las gónadas (PG) (Figura 6).



Figura 5. Determinación de longitud total de un pez león mediante regla medidora.



Figura 6. Determinación de peso de ejemplar de pez león utilizando una balanza analítica.

Los organismos fueron eviscerados, se revisó el estado de madurez gonadal, y se obtuvo el contenido estomacal. Finalmente se tomó la muestra de músculo utilizada posteriormente para determinar su concentración de metales pesados. La muestra de músculo de pez león fue etiquetada y congelada y posteriormente transportada al Laboratorio de Investigaciones en Recursos Acuáticos LIRA del Tecnológico de Boca del Río donde se trataron en un liofilizador Scientz – 18N (Figura 7) durante 24 horas cada muestra a <10 Pa.



Figura 7. Liofilizado de muestras de músculo de pez león.

Para eliminar la materia orgánica, se llevó a cabo una digestión ácida en parrilla, de acuerdo a lo establecido en la NOM-117-SSA1-1994 para digestión por vía seca y a la técnica AM-FQ-LIRA-DEPI para determinación de metales pesados por el método de parrilla eléctrica. Se pesaron 0.05 g de muestra de músculo de pez león en una balanza analítica Radwag modelo AS220/C/2 y se colocaron en vasos de precipitado donde se les agregó 10 ml de ácido nítrico (NO_3) al 70% de concentración, se cubrieron con un vidrio de reloj y se dejaron reposar 24 horas. Transcurrido el tiempo, las muestras fueron puestas en una parrilla eléctrica Thermolyne modelo Cimarec 3 y se les elevó la temperatura lentamente hasta llegar a ebullición (Figura 8).



Figura 8. Muestras de músculo de pez león en proceso de digestión ácida por parrilla.

Una vez evaporados los humos resultantes de la digestión, las muestras fueron retiradas de la parrilla. Cuando las muestras llegaron a temperatura ambiente, se les agregó 5 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% de concentración para neutralizar el ácido y se devolvieron a la parrilla 1 hora a ebullición y se retiraron cuando quedaron aproximadamente 5 ml de muestra. Al llegar a temperatura ambiente, las muestras fueron filtradas con una bomba de vacío Buchi modelo v-700 a través de un matraz Nalgene, al que se le colocó un filtro de nitrocelulosa Milipore de $0.45 \mu m$ (Fig. 9). Después, las muestras fueron aforadas con agua bidestilada a 50 ml y almacenadas en recipientes color ámbar a $4^\circ C$.



Figura 9. Bomba de vacío, matraz y filtro de nitrocelulosa para filtrar muestras de músculo de pez león.

7.4 Lectura de metales pesados Cd, Cr y Pb.

La obtención de las concentraciones de metales pesados Cd, Cr y Pb contenidos en el músculo de pez león, se realizó mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en las instalaciones del LIRA, para lo que se usó un espectrofotómetro Thermo Scientific Modelo iCE AAS 3500 (Figura 10). Este análisis se hizo en la modalidad de horno de grafito del equipo de acuerdo a las instrucciones dadas por el fabricante y a la NOM-117-SSA1-1994 que establece los métodos para la determinación de metales pesados. Anterior a la lectura de las muestras, se elaboraron curvas de calibración High-Purity Standards al 0.1, 0.2, 0.5 y 1.0 mg/kg para Cr y 0.2, 0.5, 0.8 y 1.5 mg/kg para Cd y Pb. Estos fueron cargados junto a una alícuota de 2 ml de las muestras en un revólver para ser analizados de

acuerdo a la programación de longitud de onda del equipo para cada elemento, 228.8 nm para Cd, 357.9 nm para Cd y 217 nm para Pb.



Figura 10. Espectrofotómetro de absorción atómica de horno de grafito Thermo Scientific ICE AAS 3500.

7.5 Análisis estadístico

Para la organización de los datos merísticos y morfométricos se utilizó el programa Microsoft Excel 2016. Una vez recopilado los datos, se hicieron histogramas de pesos y longitudes de los organismos para conocer en qué rangos se encontraron la mayoría de los datos muestreados. Después, se hicieron correlaciones entre peso y longitud total, peso y longitud estándar, peso total y peso del hígado y peso total y peso del estómago con ayuda del programa Minitab 16 Statistical Software.

Los datos de concentración de metales pesados (PB, Cr y Cd) fueron evaluados mediante un Análisis de Varianza ANOVA de una vía al 95% de confianza en el programa Minitab 16 y comparados con los resultados del mismo análisis en el programa StatGraphics Centurion 16.

8. RESULTADOS.

8.1 Identificación de las fuentes de contaminación por metales pesados en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PNCOIMPCyPN).

Se realizaron recorridos a pie por la línea de costa de los tres polígonos del PNCOIMPCyPN identificando las fuentes puntuales de entrada de contaminantes a la zona marina. De acuerdo a lo analizado, no se encontraron descargas de aguas residuales permanentes ni vertederos a cielo abierto, pero sí se encontraron evidencias de malas prácticas en el mantenimiento de albercas, desagües pluviales, y fuentes de contaminantes puntuales de los turistas como colillas de cigarro. Se registraron también embarcaciones sin control de emisiones (Figura 11).



Figura 11. Ejemplo de embarcaciones sin control de emisiones que circulan en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

8.2 Datos morfométricos.

En la tabla 5, se presentan los resultados de las mediciones con la longitud total (LT) y el peso total (PT) de los peces león colectados en cada uno de los sitios del PNCOIMPCPN. Se presentan como PC los organismos colectados en Punta Cancún y como PN los de Punta Nizuc. Los organismos colectados en Isla Mujeres (IM) fueron agrupados en organismos con peso superior a los 100 g de PT (IMG) y los inferiores (IMP) a 100 g. El organismo de mayor talla fue colectado en IMG (IM51 LT= 28.2 cm, PT= 351.3 g), mientras que el de menor peso se obtuvo de Punta Nizuc PN (PN26 LT= 17.4 cm, PT= 50.1 g). El de menor longitud también se colectó en IM (IM76 LT= 16.9, PT=58.8).

Tabla 5. Peso y talla de los organismos de *P. volitans/miles complex* colectados en cada uno de los sitios del PNCOIMPCyPN.

M	LT	PT	M	LT	PT	M	LT	PT	M	LT	PT
PC01	21.4	105.9	PN21	18.1	66.7	IMP41	17.3	74.4	IMG39	22.7	150.5
PC02	22.5	124.3	PN23	18.6	68.5	IMP43	17.5	55.3	IMG42	26.8	283.3
PC06	22.4	134.3	PN24	19.3	88	IMP47	19.1	88.1	IMG51	28.2	351.3
PC07	20.8	92.5	PN25	18	66	IMP48	18.3	77.4	IMG54	27.1	317.3
PC08	21.4	107	PN26	17.4	50.1	IMP57	19	92.3	IMG56	24.5	270.8
PC09	21	116.9	PN27	17.6	67.2	IMP62	18.4	71.8			
PC10	20.4	108.4	PN32	21.2	87.4	IMP63	17.3	85.9			
PC14	19.3	81.8	PN36	17.6	71.6	IMP73	15.5	48.3			
PC15	19.2	84.3				IMP75	19.1	83.8			
PC16	19.8	88.8				IMP76	16.9	58.8			

Muestra = M, Longitud total = LT (cm) y Peso total = PT (g)

De acuerdo a los datos totales (n= 33), los organismos analizados presentaron una longitud media de 20.11 cm y un peso promedio de 112.69 g. El rango de valores de longitud se encuentra entre 15.5 y 28.2 cm, mientras que en el peso se registraron valores que van de 48.3 a 351.3 g, el resto de análisis descriptivo de

toda la población están presentada en la Tabla 4. El histograma de frecuencias de longitud y peso (Figuras 12 y 13) muestran que para ambos valores el cuarto intervalo es el más frecuente, de 16.81 a 17.75 cm para longitud y de 75 a 100 g para el peso. Ambos grupos de datos, LT y PT, no forman parte de una distribución de datos normal de acuerdo a las pruebas de Shapiro-Wilk y de Anderson-Darling realizadas ($P < 0.05$, 95% confianza).

Tabla 6. Estadística descriptiva para datos de longitud y peso de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

	<i>LT</i>		<i>PT</i>
Media	20.11274	Media	112.697
Desviación Estándar	3.05376	Desviación Estándar	77.10856
Varianza	9.325448	Varianza	5945.73
Rango	12.7	Rango	303
Mínimo	15.5	Mínimo	48.3
Máximo	28.2	Máximo	351.3
Observaciones	33	Observaciones	33

Longitud total = LT (cm) y Peso total = PT (g)

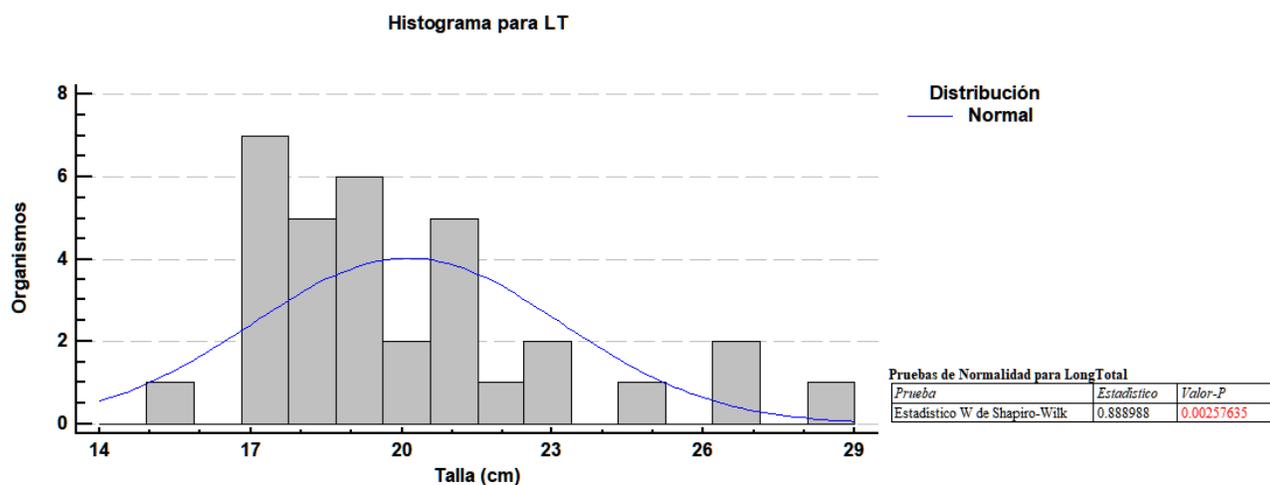


Figura 12. Histograma de tallas (cm) para pez león *P. volitans/miles complex* colectados en sitios del PNCOIMPCyPN.

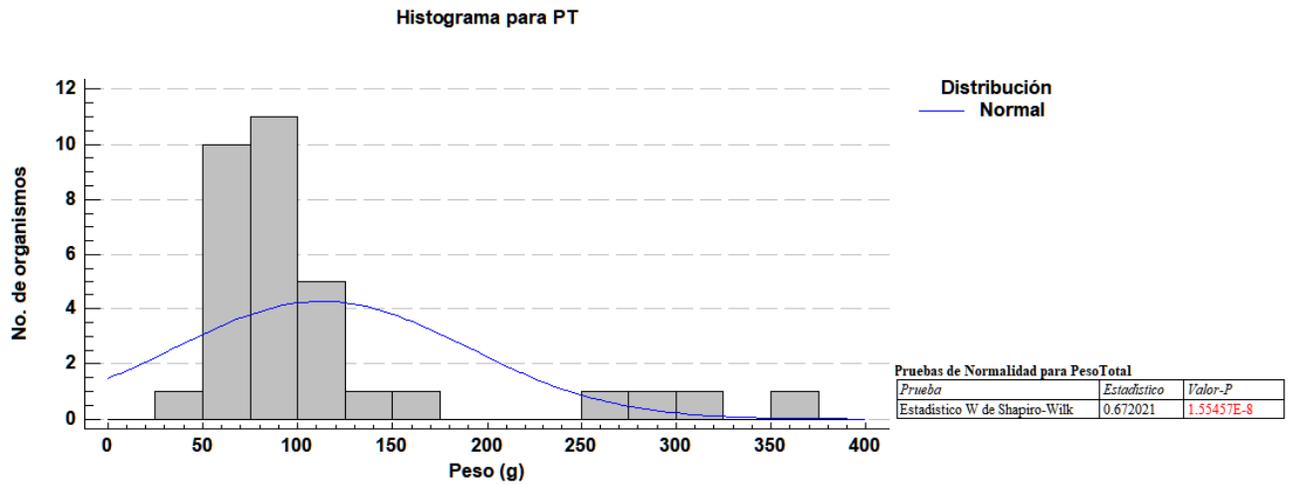


Figura 13. Histograma de peso total PT (g) para pez león *P. volitans/miles complex* colectados en sitios del PNCOIMPCPN.

De acuerdo con el análisis de regresión lineal (Figura 14) realizado para los datos merísticos, existe una relación fuerte-moderada entre la longitud y el peso de los organismos ($P < 0.05$, $r^2 = 87.57\%$, 95% de confianza).

Gráfico de regresión lineal para PT vs LT
 PesoTotal = -362.555 + 23.6294*LongTotal

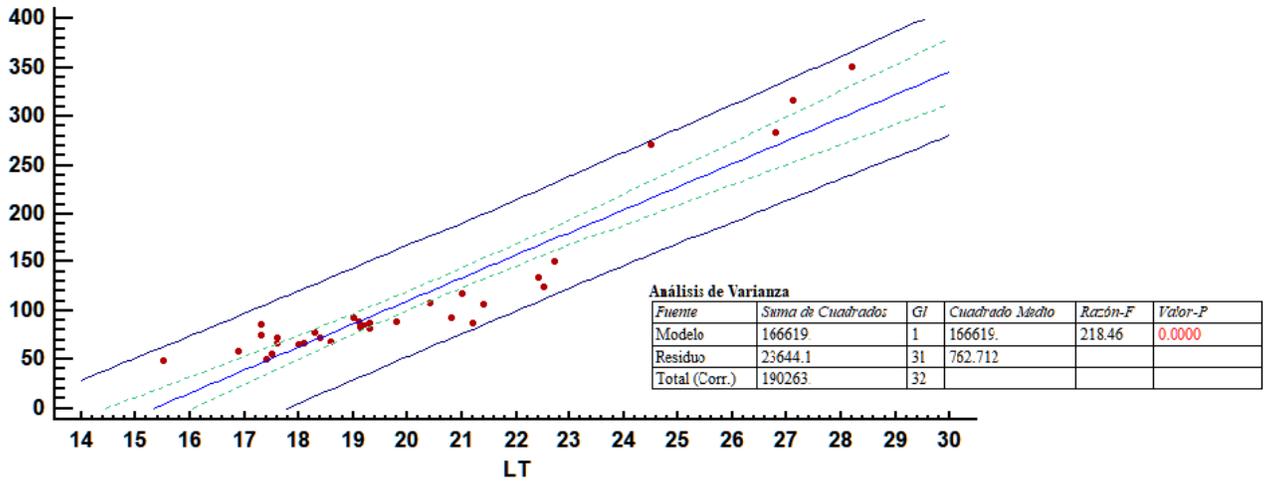


Figura 14. Regresión lineal de peso vs talla del pez león *P. volitans/miles complex* colectados en sitios del PNCOIMPCyPN.

El Análisis de Varianza ANOVA de una vía para la longitud y peso de *P. volitans/miles complex* presento diferencia significativa ($P < 0.05$) entre los sitios de muestreo, una vez realizada la prueba de rangos múltiples de Fisher (Tabla 7), se observan tres grupos de datos: el grupo mayor donde se encuentran los organismos de IMG , seguidos de PC, mientras que para IMP y PN no existe diferencia estadística significativa ($P < 0.05$), las gráficas de concentración media se presentan en las Figuras 15 y 16, donde se representan los distintos grupos de datos representados por las letras A, B y C para cada grupo.

Tabla 7. Resultados de prueba de rangos múltiples de Fisher para longitud total y peso total por sitio de muestro del pez león *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCPN.

	LT			PT	
	Casos	Media	Grupos	Media	Grupos
IMPlong	10	17.842	A	73.61	A
PNlong	8	18.475	A	70.6875	A
PClong	10	20.82	B	104.42	B
IMGlong	5	25.86	C	274.64	C

LT = longitud total (cm), PT = peso total (g), Las letras distintas indican diferencia significativa ($P < 0.05$) entre grupos de datos.

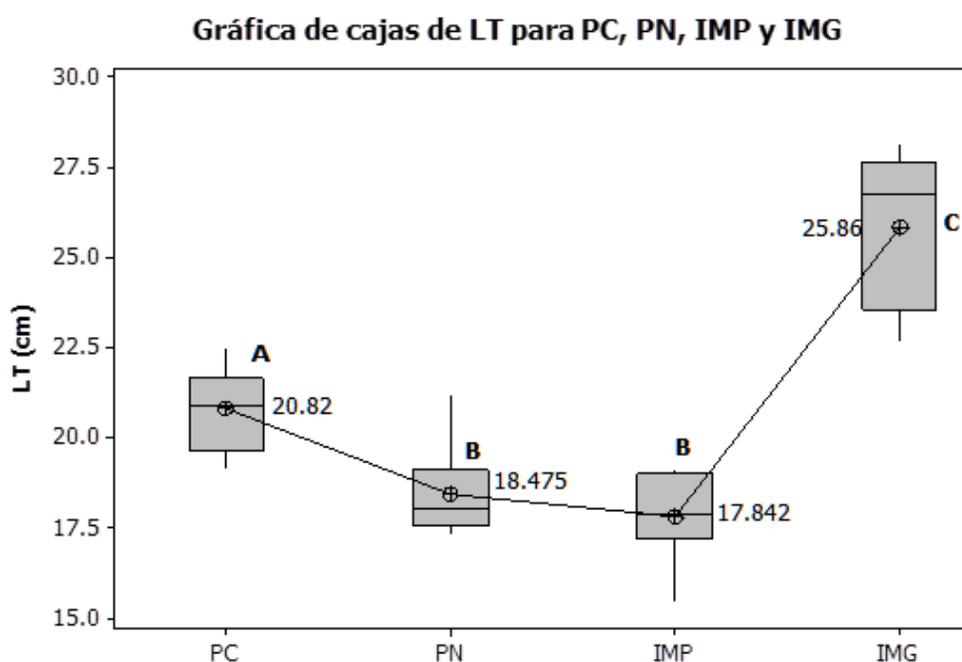


Figura 15. Gráfica de cajas para datos de longitud total por sitio de muestro de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN. Las letras distintas indican diferencia significativa entre grupos de datos.

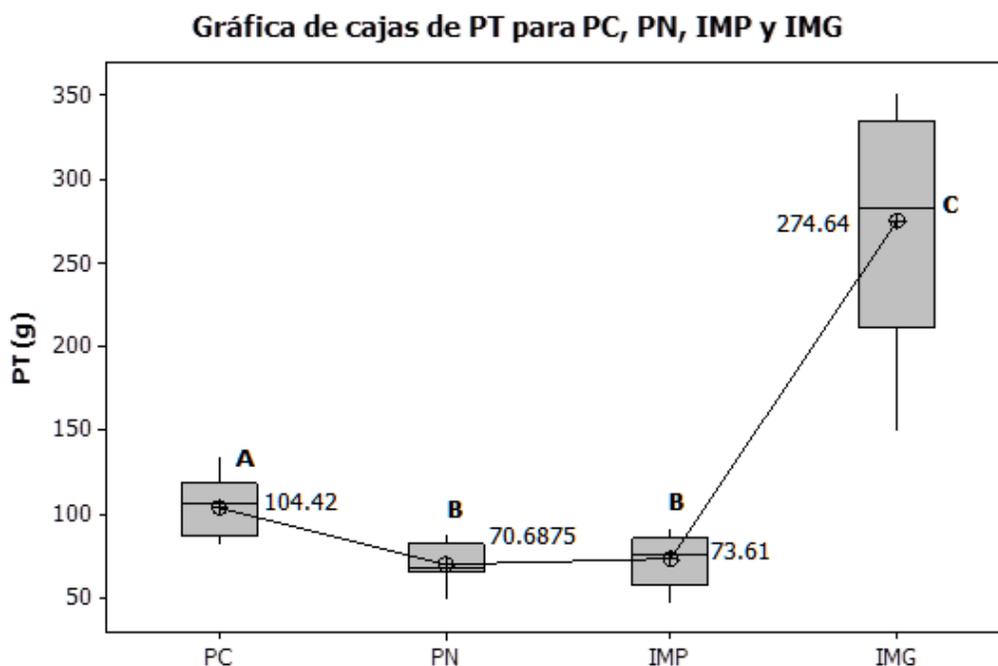


Figura 16. Gráfica de cajas para datos de peso total por sitio de muestro de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN. Las letras distintas indican diferencia significativa entre grupos de datos.

8.3 Concentración de metales pesados.

Después de analizar las muestras de músculo de pez león, se determinó que el metal con mayores concentraciones fue el Pb, su concentración superior estuvo en $0.16040 \text{ mg kg}^{-1}$, el menor valor determinado fue de $0.0545 \text{ mg kg}^{-1}$. En el caso del Cr, hubo casos en donde no fue determinado por el equipo de espectrofotometría, mientras que su valor máximo fue de $0.1209 \text{ mg kg}^{-1}$. Para el Cd se obtuvieron concentraciones desde los $0.0090 \text{ mg kg}^{-1}$ hasta los $0.1245 \text{ mg kg}^{-1}$.

Los resultados de la concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb para los organismos de pez león *P. volitans/miles complex* colectados en los tres polígonos del PNCOIMPCyPN ($n= 33$) se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Concentraciones de metales pesados Cd, Cr y Pb en músculo de pez león *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

id Muestra	Cd	Cr	Pb
PC01	0.0976	0.0393	0.1502
PC02	0.0102	0.0329	0.1204
PC06	0.0854	N/D	0.1637
PC07	0.0223	0.0066	0.1376
PC08	0.0409	0.0135	0.1538
PC09	0.0238	0.0066	0.0789
PC10	0.0238	0.0138	0.1096
PC14	0.0529	0.0358	0.1574
PC15	0.0061	0.0596	0.1484
PC16	0.0090	N/D	0.1646
PN21	0.0076	0.0107	0.0744
PN23	0.0385	0.1004	0.1502
PN24	0.0539	0.0626	0.0879
PN25	0.0542	0.1209	0.0861
PN26	0.0522	0.0384	0.1096
PN27	0.1245	0.0168	0.0906
PN32	0.0146	0.0361	0.1367
PN36	0.1981	0.0416	0.1619
IM39	0.0764	0.0416	0.0545
IM41	0.0582	0.0346	0.1177
IM42	0.0428	0.015	0.0473
IM43	0.0822	0.011	0.1619
IM47	0.0559	N/D	0.1556
IM48	0.038	0.0395	0.1502
IM51	0.029	0.0108	0.0518
IM54	0.0166	0.0214	0.0364
IM56	0.0246	0.0150	0.0671
IM57	0.0634	N/D	0.1538

IM62	0.1005	0.003	0.1646
IM63	0.0836	0.0245	0.1222
IM73	0.0824	0.0068	0.1565
IM75	0.0726	0.0077	0.1565
IM76	0.0446	0.0772	0.1132

Concentración en mg kg⁻¹

Las concentraciones más elevadas se dieron en Pb, mientras que las menores concentraciones registradas pertenecen al Cd, como se presenta en la figura de valores individuales de concentraciones de metales pesados de los 33 organismos evaluados (Figura 17)

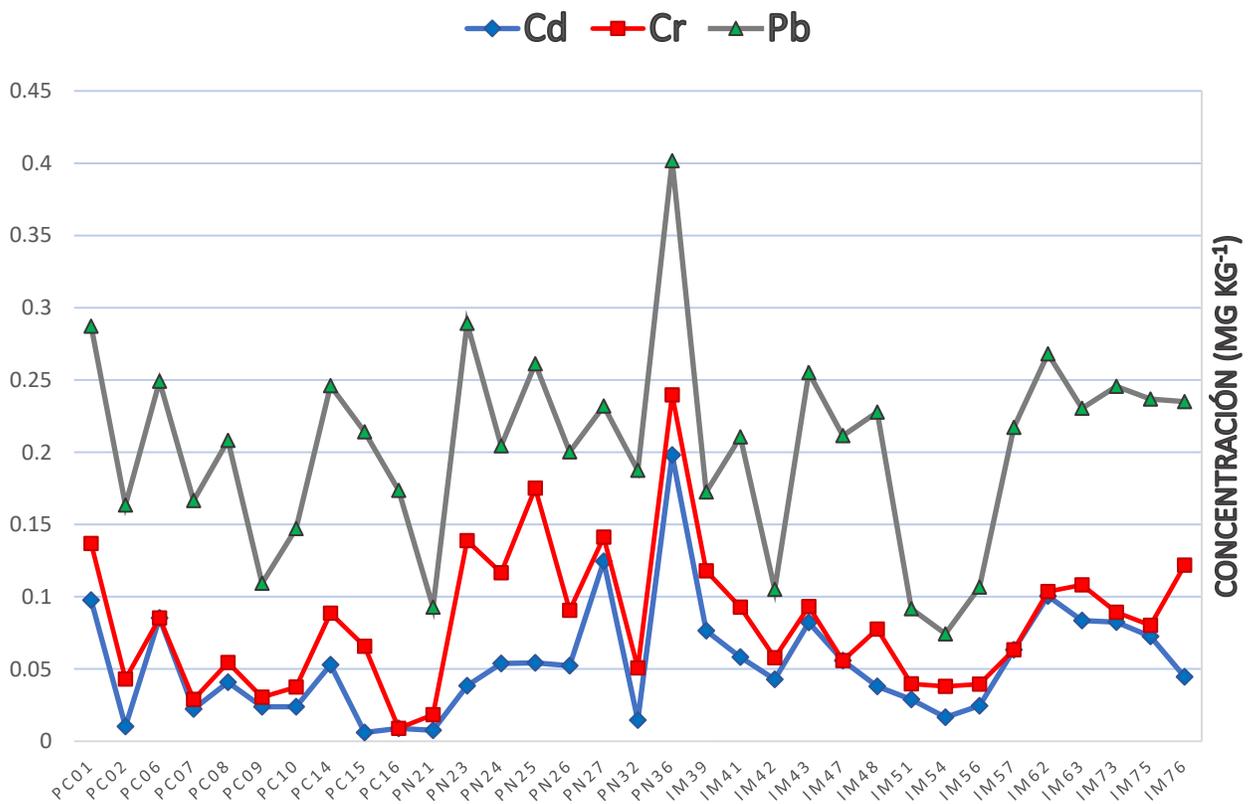


Figura 17. Gráfica de concentraciones individuales de Cd, Cr y Pb de músculo de pez león *P. volitans/miles complex* capturados en el PNCOIMPCyPN.

Las concentraciones medias de metales pesados Cd, Cr y Pb del total de los organismos evaluados (n= 33) fueron 0.0541 ± 0.0398 mg kg⁻¹ para el Cd, 0.0285 ± 0.0289 mg kg⁻¹ para el Cr y 0.1209 ± 0.0403 mg kg⁻¹ para el Pb. La mayor concentración de Cd registrada fue de 0.0061 mg kg⁻¹ de un organismo colectado en el polígono de PC mientras que la mayor (0.1981 mg kg⁻¹) fue registrada en un organismo extraído de PN. El Cr osciló desde No Determinado (N/D) hasta 0.1209 mg kg⁻¹ de PN25. La concentración de Pb va de los 0.0364 a 0.1646 mg kg⁻¹ de IM62, colectado en IM (Tabla 9)

Tabla 9. Resumen de las concentraciones de metales pesados Cd, Cr y Pb analizados en el músculo del pez león *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Valor	Recuento	Promedio	DesvEst	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango
CdTotal	33	0.0541	0.0398	0.0522	0.0061	0.1981	0.1920
CrTotal	33	0.0286	0.0289	0.0168	0.0000	0.1209	0.1209
PbTotal	33	0.1209	0.0404	0.1367	0.0364	0.1646	0.1282
Total	99	0.0679	0.0534	0.0539	0.0000	0.1981	0.1981

Concentración en mg kg⁻¹

Al igual que con los datos merísticos, se realizó un histograma con prueba de normalidad para las concentraciones determinadas de Cd, Cr y Pb. En los tres casos, el valor-P fue menor a 0.05 (95% de confiabilidad), por lo que las concentraciones de metales pesados no pertenecen a una distribución de datos normal. La mayor de concentraciones de Cd registrada (n= 7) se ubica en la quinta clase que corresponde al intervalo entre 0.05 y 0.065 mg kg⁻¹. Para el Cr, el registro más frecuente (n= 14) corresponde a la segunda clase de 0.005 a 0.03 mg kg⁻¹. Por último, el intervalo más frecuente (n= 10) en el Pb estuvo entre los 0.146 y 0.157 mg kg⁻¹, contenidos en la clase 14 (Figuras 18 a 20).

Histograma para Cd total

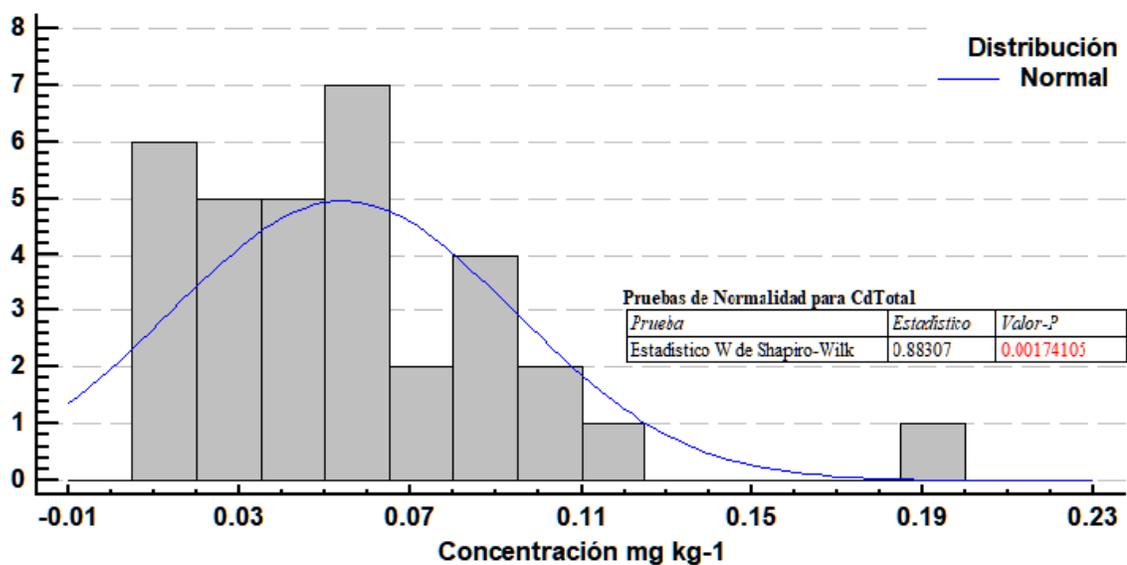


Figura 18. Histograma de concentraciones de Cd en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Histograma para CrTotal

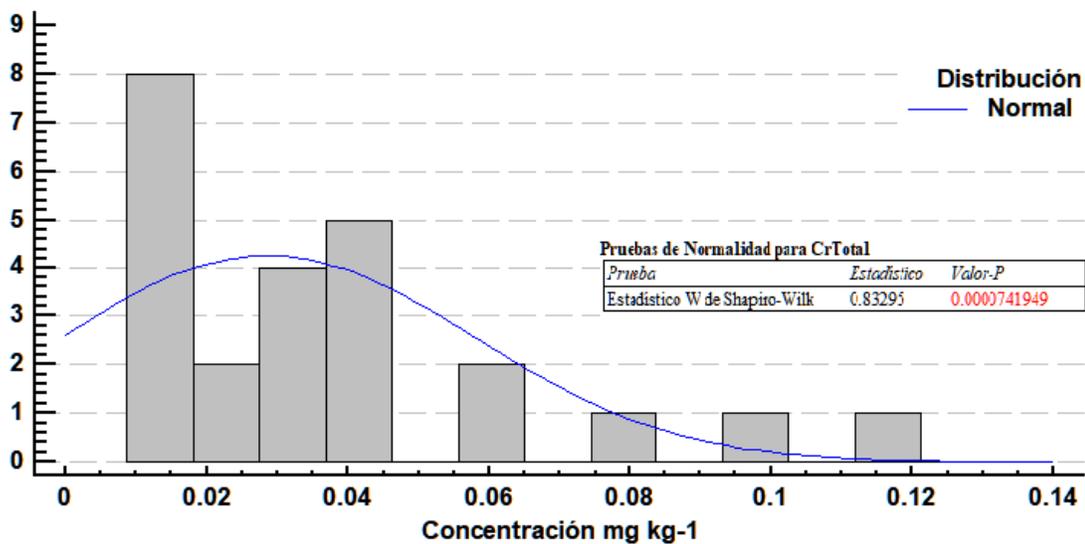


Figura 19. Histograma de concentraciones de Cr en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Histograma para PbTotal

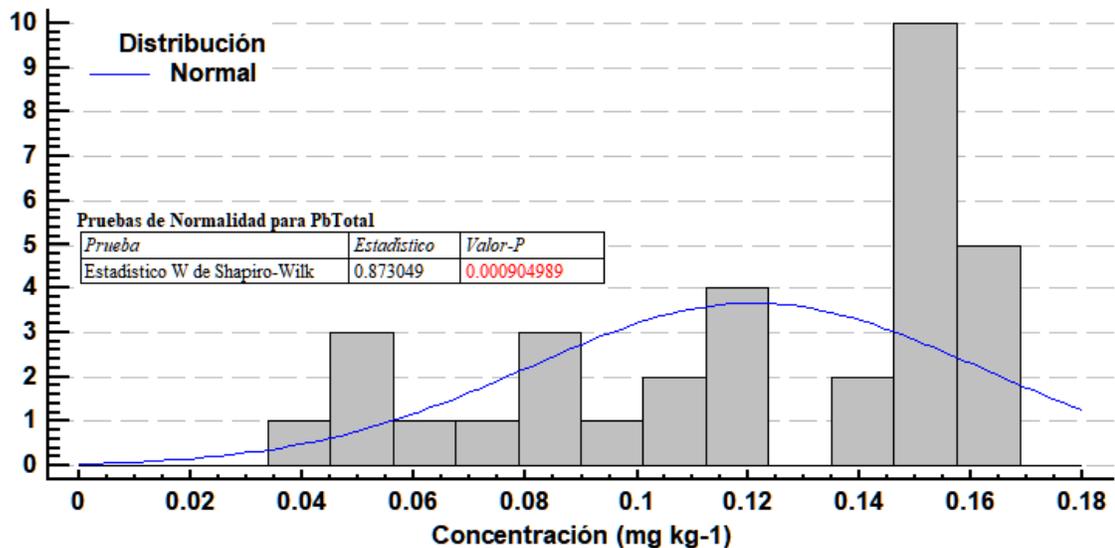


Figura 20. Histograma de concentraciones de Pb en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Las concentraciones de los metales analizados se presentan en la Figura 21, de acuerdo con los valores, ninguna de las concentraciones medidas de Cd, Cr y Pb fueron parecidas estadísticamente entre ellas, lo lógico al tratarse de distintos metales (ANOVA valor-P < 0.05, Tukey, Fisher al 95% de confianza).

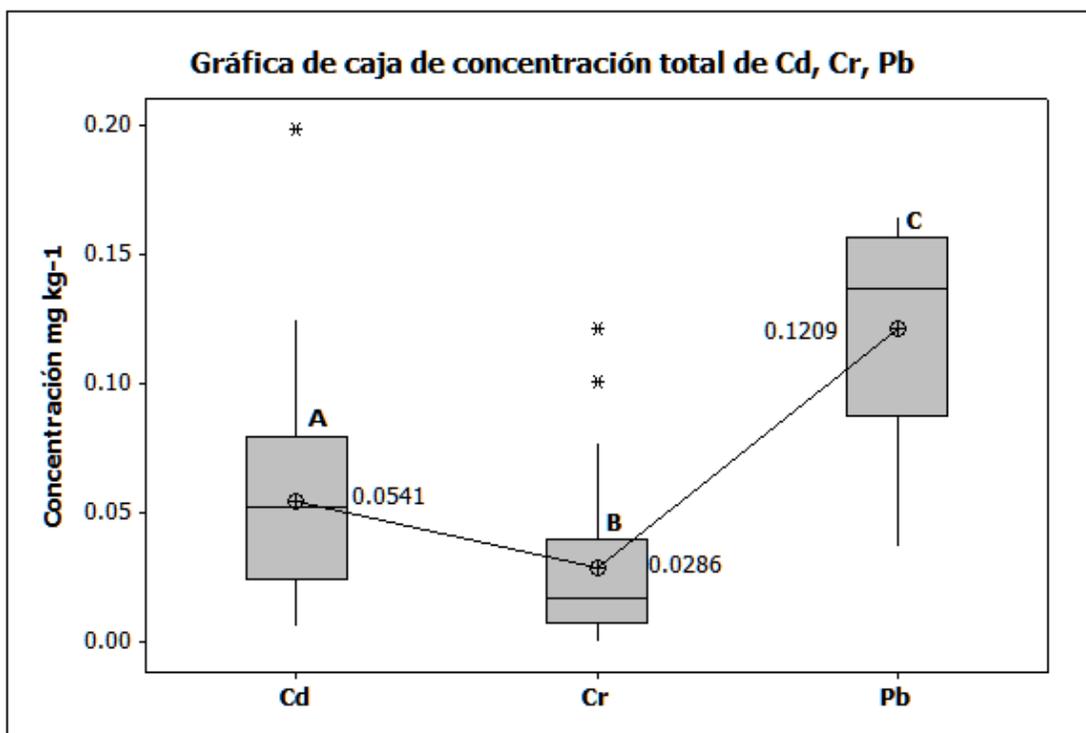


Figura 21. Gráfica de caja de concentraciones medias de Cd en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

8.4 Concentración de metales pesados por sitio.

8.4.1 Cadmio.

Se registraron concentraciones medias para el Cd que van de los 0.0372 ± 0.0321 (PC) a los 0.0681 ± 0.019 mg kg⁻¹ registrado en la fracción de menor tamaño de IM (Tabla 10). La prueba de análisis de varianza ANOVA demuestra que no existe diferencia estadística significativa ($P= 0.1843$) entre los cuatro grupos de datos. Esto se refleja en la prueba de rangos múltiples de Fisher y la prueba de Tukey, al igual en la gráfica de cajas (Figura 22), que señalan que todos los datos pertenecen al mismo grupo homogéneo.

Tabla 10. Resumen estadístico por zona de muestreo de concentraciones de Cd en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Sitios	Recuento	Promedio	DesvEst	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango
IMG	5	0.0379	0.0235	0.0290	0.0166	0.0764	0.0598
IMP	10	0.0681	0.0196	0.0680	0.0380	0.1005	0.0625
PC	10	0.0372	0.0322	0.0238	0.0061	0.0976	0.0915
PN	8	0.0680	0.0634	0.0531	0.0076	0.1981	0.1905
Total	33	0.0541	0.0398	0.0522	0.0061	0.1981	0.1920

DesvEst= Desviación Estándar. Concentración en mg kg⁻¹

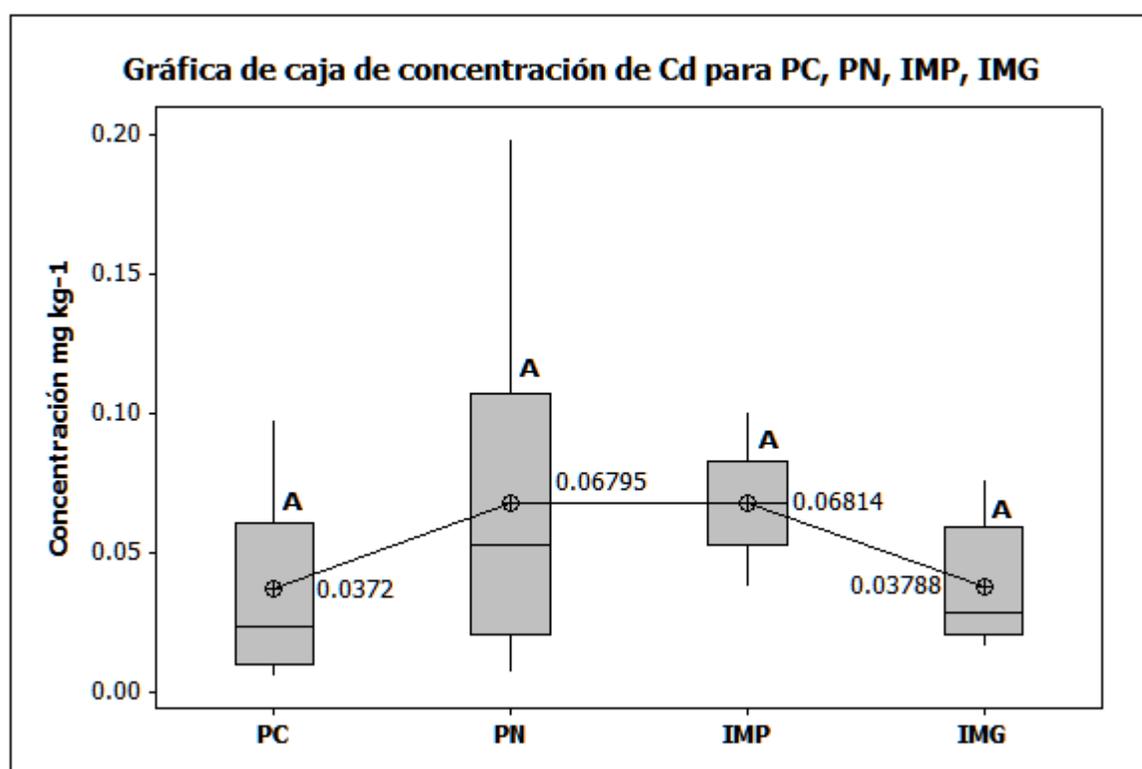


Figura 22. Gráfica de caja por zona de muestreo de concentraciones de Cd en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Las letras distintas indican diferencia significativa entre grupos de datos.

8.4.2 Cromo.

En el caso de las concentraciones determinadas mediante espectrofotometría de absorción atómica para el Cr, las medias de los valores (Tabla 11) se encuentran en un rango entre 0.0204 ± 0.0244 mg kg⁻¹ para la fracción de menor tamaño de los organismos del polígono de Isla Mujeres (IMP) hasta la mayor media, la de los organismos colectados en PN (0.0534 ± 0.0391 mg kg⁻¹). La prueba de ANOVA determina que existe diferencia estadística significativa entre los datos obtenidos para los distintos puntos de muestreo (valor-P < 0.05), al igual que las pruebas de Fisher y de Tukey, que colocan a todos los sitios como parte del mismo grupo, excepto a los organismos colectados en PN (Figura 23).

Tabla 11. Resumen estadístico por zona de muestreo de concentraciones de Cr en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Sitios	Recuento	Promedio	DesvEst	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango
IMG	5	0.0208	0.0123	0.0150	0.0108	0.0416	0.0308
IMP	10	0.0204	0.0244	0.0094	0.0000	0.0772	0.0772
PC	10	0.0208	0.0200	0.0137	0.0000	0.0596	0.0596
PN	8	0.0534	0.0391	0.0400	0.0107	0.1209	0.1102
Total	33	0.0286	0.0289	0.0168	0.0000	0.1209	0.1209

DesvEst= Desviación estándar. Concentración en mg kg⁻¹

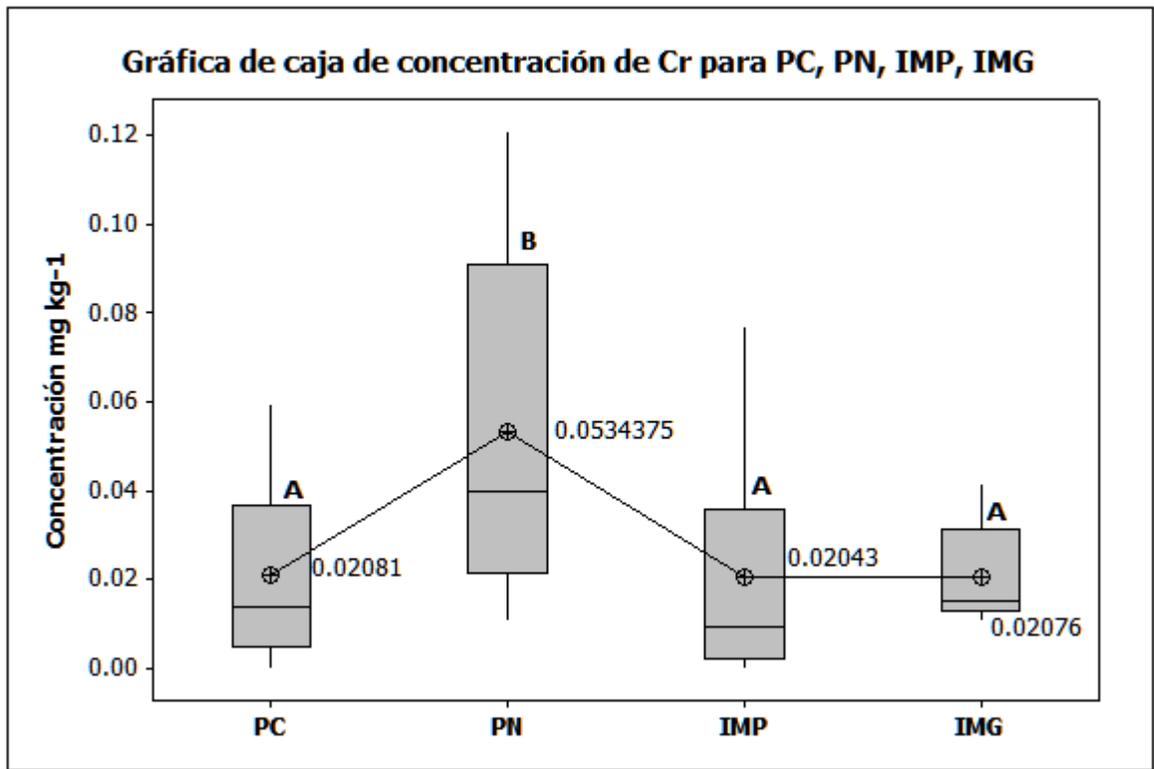


Figura 23. Gráfica de caja por zona de muestreo de concentraciones de Cr en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN. Las letras distintas indican diferencia significativa entre grupos de datos.

8.4.3 Plomo.

El valor más bajo en las concentraciones de Pb registradas en músculo de *P. volitans/miles complex* (Tabla 12) es la encontrada en los organismos de mayor tamaño de Isla Mujeres (IMG= 0.0514 ± 0.00112 mg kg⁻¹), mientras que la mayor, corresponde a los organismos de menor tamaño de la misma zona (IMP= 0.1452 ± 0.0195 mg kg⁻¹). Existen diferencias estadísticas significativas entre estas medias (valor-P < 0.05; 95% de confianza) organizándose los datos de los sitios de muestreo en tres grupos distintos según las pruebas de Fisher y Tukey al 95% de confianza (Figura 24), en donde se señala que IMP y PC pertenecen al mismo grupo

estadístico al igual que PC y PN pertenecen a otro. En el resto de los casos, existe diferencia significativa entre grupos de datos.

Tabla 12. Resumen estadístico por zona de muestreo de concentraciones de Pb en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Sitios	Recuento	Promedio	DesvEst	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango
IMG	5	0.0514	0.0112	0.0518	0.0364	0.0671	0.0307
IMP	10	0.1452	0.0195	0.1547	0.1132	0.1646	0.0514
PC	10	0.1385	0.0276	0.1493	0.0789	0.1646	0.0857
PN	8	0.1122	0.0331	0.1001	0.0744	0.1619	0.0875
Total	33	0.1209	0.0404	0.1367	0.0364	0.1646	0.1282

DesvEst = Desviación estándar. Concentración en mg kg⁻¹

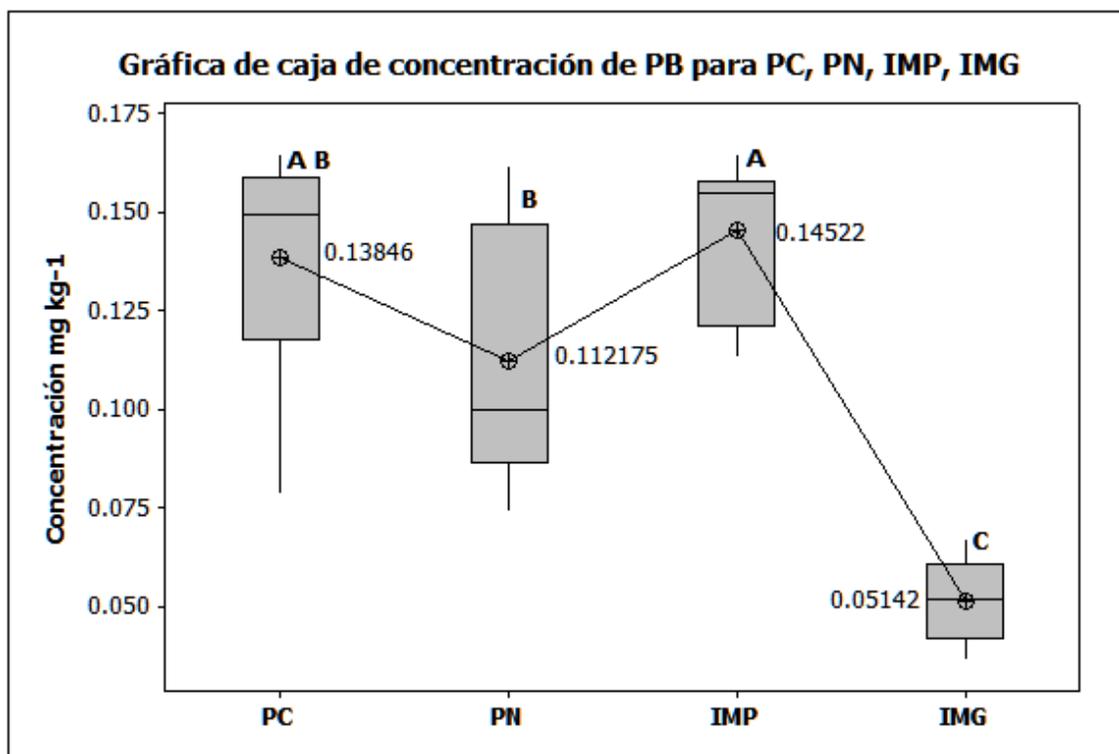


Figura 24. Gráfica de caja por zona de muestreo de concentraciones de Pb en mg kg⁻¹ en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN. Las letras distintas indican diferencia significativa entre grupos de datos.

8.5 Correlaciones.

Se hicieron análisis de correlación para establecer en un modelo lineal, la relación entre la concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb encontrada en músculo de pez león y la longitud (LT) y el peso total (PT) registrados.

8.5.1 Relación entre longitud total y concentración de metales pesados.

El resultado del análisis de varianza y de las pruebas de regresión lineal se presenta en la Tabla 13. Existe una relación significativa (valor-P > 0.05) entre los valores de LT y la concentración de los metales Cr y Pb. Los modelos de regresión lineal para

LT vs Cd y LT vs Cr presentan una relación negativa débil entre los valores de LT y el metal (Figuras 25 y 26) El coeficiente de correlación más alto se calculó para el Pb (Coeficiente= -0.5765), demostrando que existe una relación negativa moderadamente fuerte entre la longitud total y la concentración de Pb en el músculo de pez león. De igual manera el valor R^2 calculado para la relación de LT y Pb fue la mayor ($R^2= 33.2358$) por lo que el modelo ajustado puede predecir cerca de un tercio de la variabilidad de los datos de concentración de Pb (Figura 27).

Tabla 13. Tabla de correlaciones entre longitud total y concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb determinados en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCPN.

	valor-P	Correlación	R^2	Coef de correl
Cd	0.0378	Significativa	13.1833	-0.363088
Cr	0.1894	No significativa	5.4898	-0.234304
Pb	0.0004	Significativa	33.2358	-0.576505

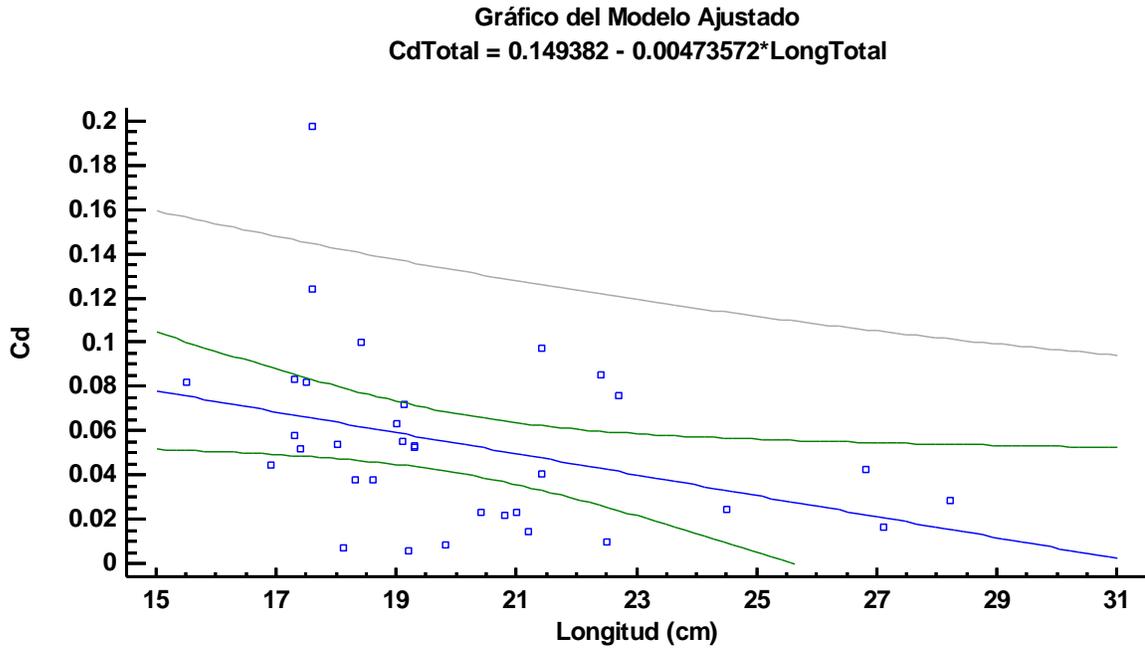


Figura 25. Gráfico de regresión lineal de LT vs Cd para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

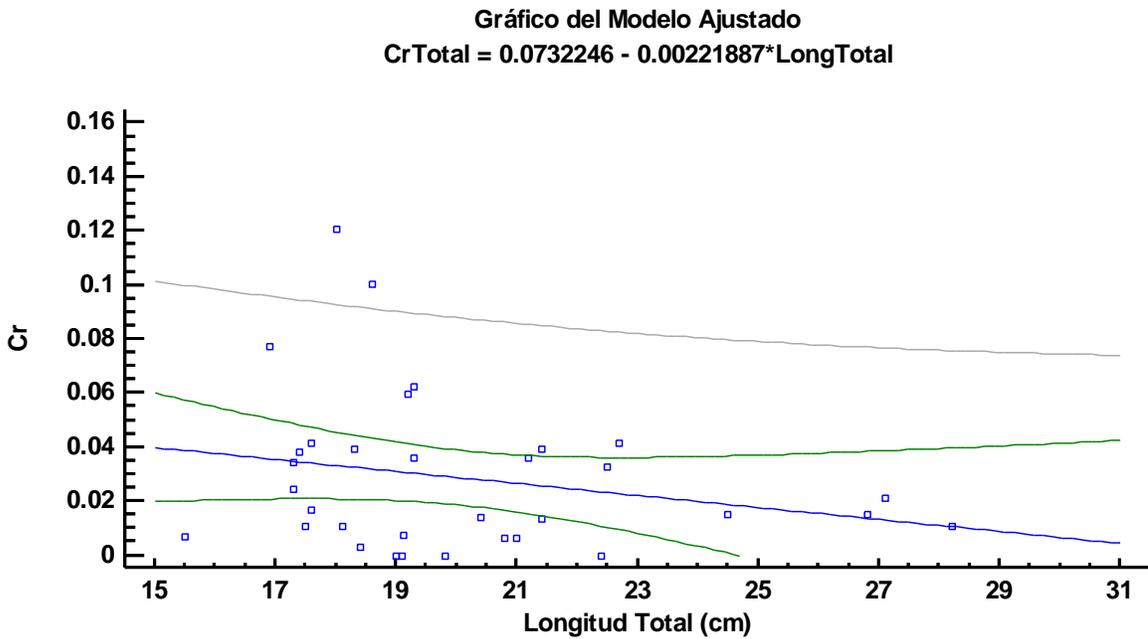


Figura 26. Gráfico de regresión lineal de LT vs Cr para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCPN.

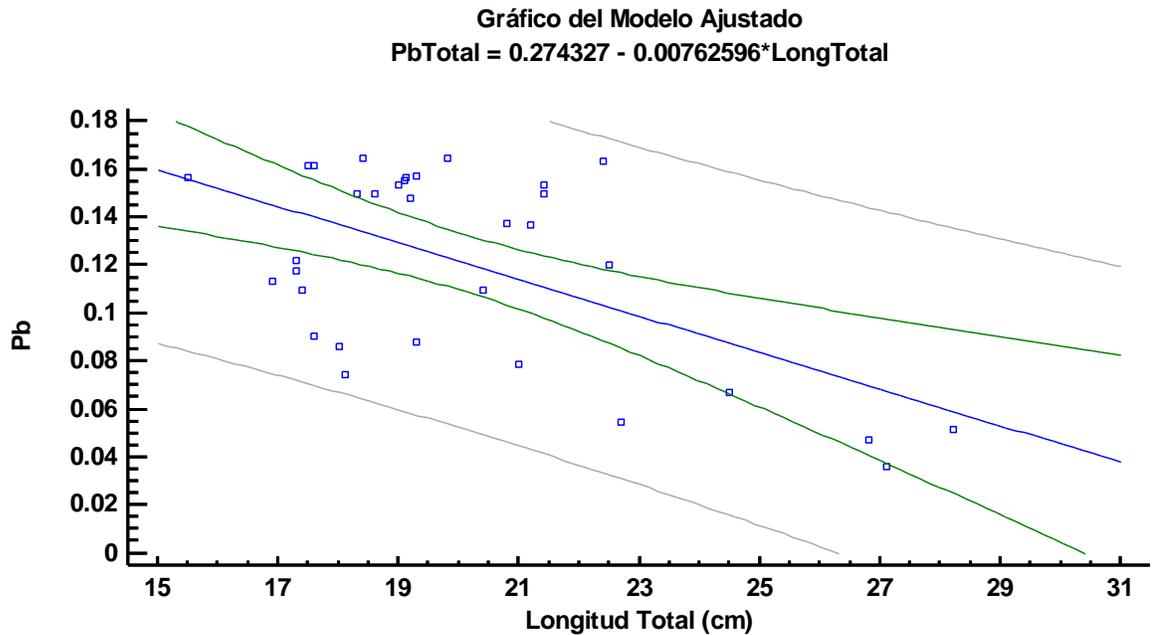


Figura 27. Gráfico de regresión lineal de LT vs Pb para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

8.5.2 Relación entre peso total y concentración de metales pesados.

Se realizaron las comparaciones entre el peso total y cada una de las concentraciones de metales pesados obtenidas por medio de espectrofotometría de absorción atómica (Tabla 14). En el caso de las concentraciones de Cd (Figura 28) y Cr (Figura 29), no presenta correlación significativa entre el peso total de los organismos de pez león, tampoco presentan un valor de R^2 que explique la variabilidad de los datos en el modelo ajustado de correlación. El coeficiente de correlación es negativo para ambos, aunque muy débil como para pronosticar nuevos valores. En el caso del Pb comparado con el peso total (Figura 30), el valor de t del análisis de regresión es menor a 0.05, lo que indica una relación estadísticamente significativa, mientras que el valor R^2 explica el 44.46% de la variabilidad de los datos de concentración de Pb. El coeficiente de correlación marca

una relación inversa moderada entre el aumento de peso de los organismos y su contenido de Pb.

Tabla 14. Tabla de correlaciones entre peso total y concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb determinados en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

	valor-P	Correlación	R ²	Coef de correl
Cd	0.115	No significativa	7.82052	-0.27965
Cr	0.2002	No significativa	5.23735	-0.22885
Pb	0	Significativa	44.4693	-0.66685

Gráfico del Modelo Ajustado
 $Cd_{Total} = 0.0704127 - 0.000144452 * \text{PesoTotal}$

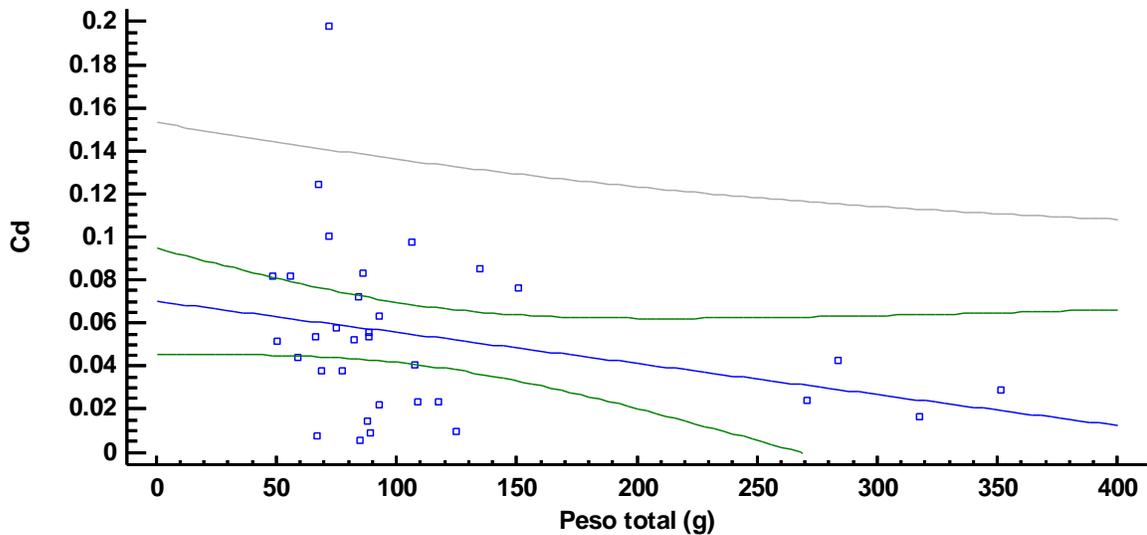


Figura 28. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cd para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCPN.

Gráfico del Modelo Ajustado
 $Cr_{Total} = 0.0382698 - 0.0000858306 * PesoTotal$

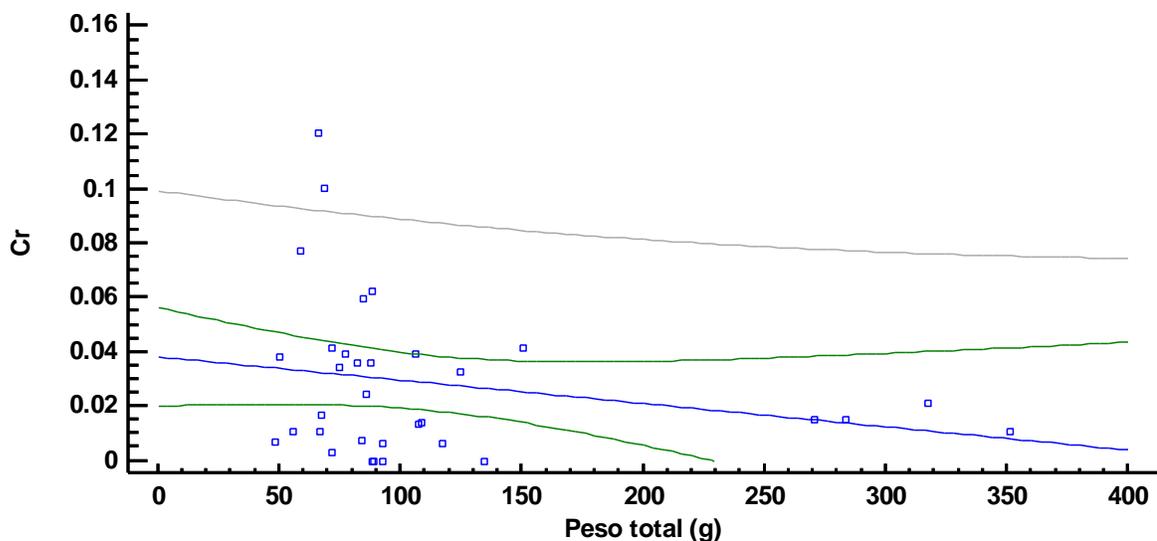


Figura 29. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cr para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

Gráfico del Modelo Ajustado
 $Pb_{Total} = 0.160319 - 0.000349345 * PesoTotal$

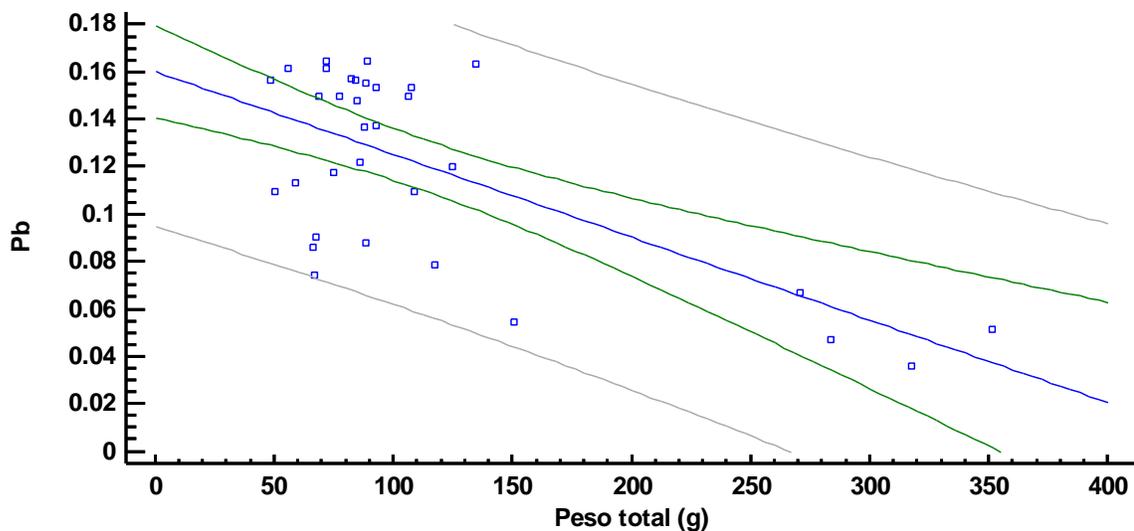


Figura 30. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cr para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el PNCOIMPCyPN.

8.5.3 Regresión por sitio.

Se realizaron las pruebas de correlación de cada uno de los metales para cada polígono del PNCOIMPCyPN con respecto al Peso Total de los organismos (Tabla 15). Ninguna de las comparaciones resultó ser significativa salvo la concentración de Cr de los organismos de mayor tamaño del polígono de Isla Mujeres (IMG n= 5). Los coeficientes de correlación de las comparaciones por medio de regresión lineal representan una relación débil entre la concentración de metales pesados comparados con el peso total, excepto en dos casos, PT vs Cd y Pt vs Cr para los organismos de IMG, en donde existe una fuerte correlación entre datos.

Tabla 15. Tabla de correlaciones entre peso total y concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb determinados en músculo de *P. volitans/miles complex* en cada uno de los polígonos del PNCOIMPCPN.

	Cd		Cr		Pb	
	Correlación	Coef. correl	Correlación	Coef. correl	Correlación	Coef. correl
PC	N/S	0.3289	N/S	-0.3815	N/S	-0.3286
PN	N/S	-0.0952	N/S	0.0139	N/S	0.1237
IMP	N/S	-0.182	N/S	-0.2924	N/S	-0.0044
IMG	N/S	-0.8754	Significativa	-0.898	N/S	-0.3206

N/S = No Significativa

8.5.4 Correlación en el polígono de Isla Mujeres.

Se realizó una última comparación de todos los organismos colectados en el polígono de Isla Mujeres sin hacer agrupaciones con respecto a su talla. Así, se realizó un análisis de regresión lineal y correlación comparando el peso total (PT) de los organismos con las concentraciones de metales pesados Cd, Cr y Pb contenidas en su músculo (Tabla 16). En el caso del Cd (Figura 31), existe una

relación estadísticamente significativa (valor-P <0.05) entre el PT y la concentración de Cd, el coeficiente R² (52.47) indica que se puede explicar alrededor de la mitad de la variabilidad de los datos de Cd y el coeficiente de correlación (-0.7243) es moderadamente fuerte. El Cr (Figura 33) no presenta correlación significativa y su coeficiente de correlación es bastante débil (-0.1324). El Pb (Figura 31) presenta una correlación significativa (valor-P < 0.05) y un coeficiente de correlación (-0.8770) bastante fuerte que indica una relación inversamente proporcional entre el PT y la concentración de Pb en los organismos.

Tabla 16. Tabla de correlaciones entre PT y concentración de metales pesados Cd, Cr y Pb determinados en músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el polígono de Isla Mujeres del PNCOIMPCyPN.

	valor-P	Correlación	R²	Coef. de correl
Cd	0.0023	Significativa	52.4732	-0.7243
Cr	0.6380	No significativa	1.7539	-0.1324
Pb	0.0000	Significativa	76.9132	-0.8770

Gráfico del Modelo Ajustado
 $IMCd = 0.0818233 - 0.000169037 \cdot IMPT$

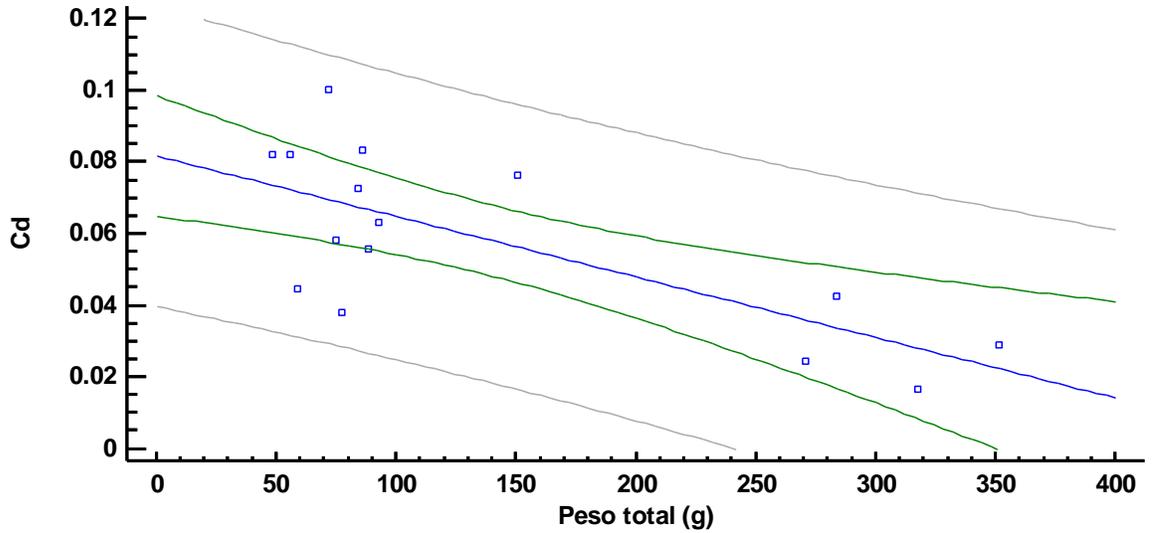


Figura 31. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cd para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el polígono de Isla Mujeres del PNCOIMPCPN.

Gráfico del Modelo Ajustado
 $IMCr = 0.024141 - 0.000025608 \cdot IMPT$

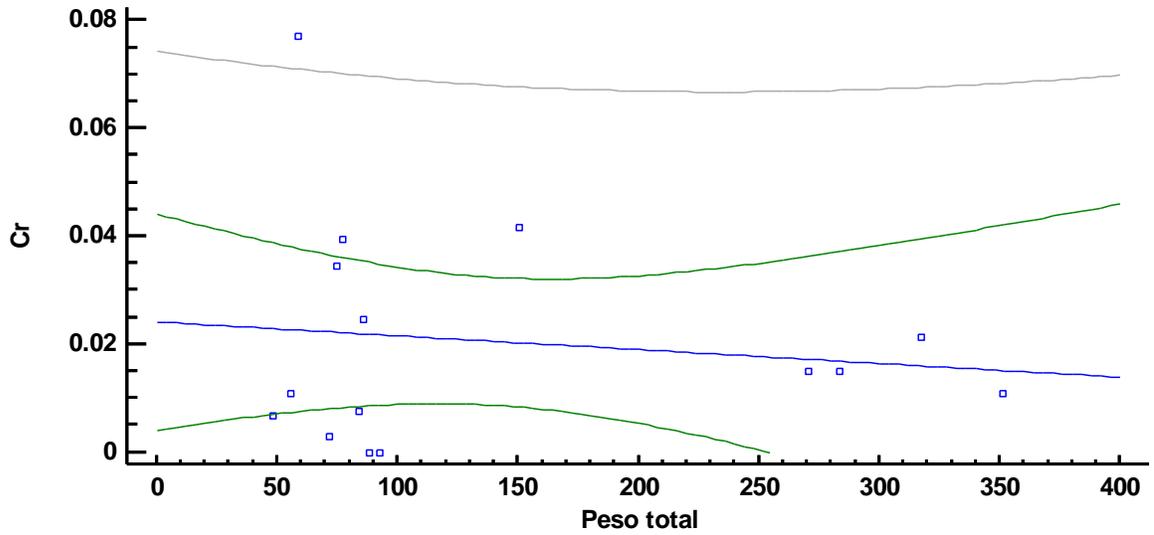


Figura 32. Gráfico de regresión lineal de PT vs Cr para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el polígono de Isla Mujeres del PNCOIMPCPN.

Gráfico del Modelo Ajustado
 $IMPb = 0.170186 - 0.000399894 \cdot IMPT$

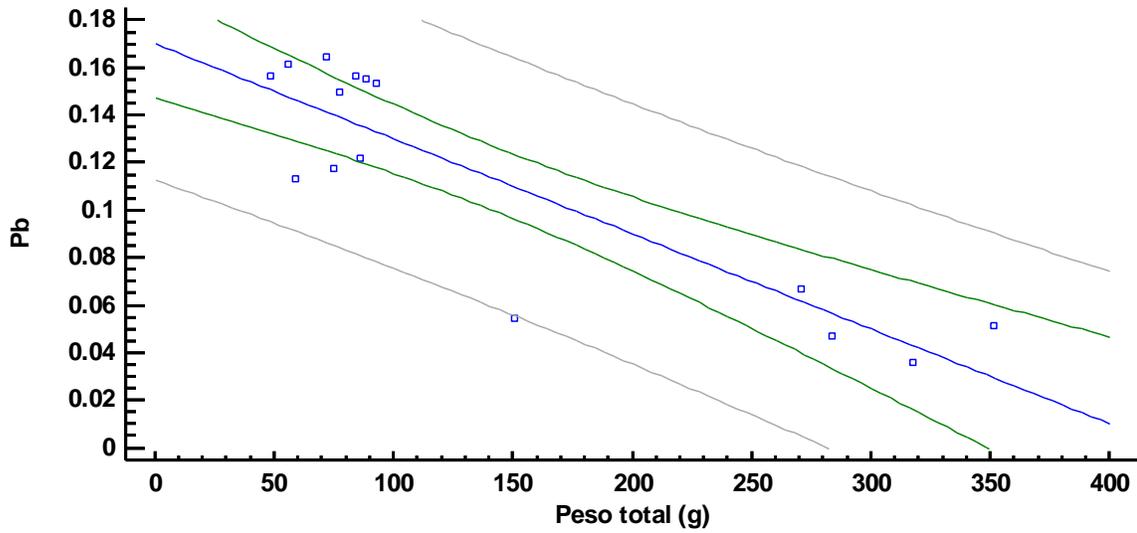


Figura 33. Gráfico de regresión lineal de PT vs Pb para músculo de *P. volitans/miles complex* colectados en el polígono de Isla Mujeres del PNCOIMPCPN.

9. DISCUSIÓN.

Debido a la naturaleza cárstica del suelo de la región del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc PNCOIMPCyPN; los recorridos terrestres por la costa ofrecieron un panorama superficial de la problemática de descargas en las costas del mar Caribe. Se coincide con lo descrito por otros autores (Carbajal 2009; González 2016), que señalan que, de manera superficial, existen dos grandes zonas de intercambio de agua entre el sistema lagunar Nichupté-Bojorquez y el PNCOIMPCyPN, el canal de Cancún y el canal de Nizuc. El sistema de agua y saneamiento de la ciudad de Cancún, Quintana Roo, “Aguakan” reporta en su sitio web (consultado en noviembre, 2019), que las aguas residuales de uso doméstico son bombeadas a distintas plantas de tratamiento y después son inyectadas a 100 m en el subsuelo. Según datos del anuario estadístico de INEGI (2016), en el año 2015 había 11 plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR en funcionamiento en el municipio de Benito Juárez (Tabla 15), con una capacidad total instalada de 1567 l/s. Tres de estas PTAR, Pok Ta Pok, Gucumatz y El Rey; se localizan en la zona hotelera de la ciudad de Cancún, región adyacente al PNCOIMPCyPN y son operadas por FONATUR. Las 11 plantas localizadas en el municipio cuentan con un tratamiento secundario, ninguno de ellos diseñado para la remoción de metales pesados (CONAGUA 2015; Reynolds 2001; Rubio 2015).

Tabla 17. Plantas Municipales de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación en el estado de Quintana Roo.

Municipio	Localidad	Nombre	Proceso	Capacidad(l/s)	Caudal (l/s)	Cuerpo receptor
Benito Juárez	Cancún	Caribe 2000	Lodos activados	225	192.2	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Corales	Lodos activados	50	22.5	Acuífero/Riego de áreas verdes

Benito Juárez	Cancún	El Rey	Lodos activados	100	70	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Gucumatz	Lodos activados	200	150	Riego de áreas verdes
Benito Juárez	Cancún	Isla Azul	Lodos activados	5	3.1	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Norponiente (Cancún)	Filtros biológicos, rociadores o percoladores	225	136	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Norte	Dual	350	374	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Playa Blanca	Anaerobio	2	2	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Pok-Ta-Pok	Lodos activados	245	200	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Polígono Sur	Lodos activados	200	40	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Puerto Morelos	Lodos activados	10	3.3	Acuífero

Fuente: CONAGUA, 2015

Las actividades económicas del estado de Quintana Roo son mayormente dirigidas hacia el sector terciario o de servicios (Tabla 18). Las actividades extractivas mineras representan el 0.46% de la totalidad de las actividades económicas y no se incluye ningún metal, solo se presenta la extracción de piedra caliza y otros agregados pétreos, la extracción petrolífera es inexistente. Otras actividades que podrían presentar aportes de metales pesados a los sistemas acuíferos son la industria manufacturera 3.31%, industria de bebidas y tabaco 0.3%, fabricación de insumos textiles 0.02%, fabricación de prendas de vestir y curtido de cuero 0.07% y construcción 6.98% (Gobierno del Estado de Quintana Roo 2016; Secretaría de Economía 2018)

Tabla 18. Desglose de la participación porcentual de actividades económicas en el estado de Quintana Roo.

Actividad	Participación porcentual
Actividades primarias	0.72
Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza	0.72
Actividades secundarias	11.8
Minería	0.46
Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final	1.07
Construcción	6.98
Industrias manufactureras	3.31
Industria alimentaria	2.52
Industria de las bebidas y el tabaco	0.3
Fabricación de insumos textiles y acabado de textiles	0.02
Fabricación de prendas de vestir, curtido y acabado de cuero	0.07
Fabricación de productos derivados del petróleo	0.03
Fabricación de productos a base de minerales	0.1
Industrias metálicas básicas	0.03
Fabricación de maquinaria y equipo	0.01
Fabricación de muebles, colchones y persianas	0.11
Actividades terciarias	87.48
Comercio	18.67
Transportes	8.15
Servicios de alojamiento temporal	21.53

Fuente: Gobierno del Estado de Quintana Roo 2016.

El municipio de Benito Juárez, Quintana Roo; se distingue por ser un destino turístico con más de 180 hoteles registrados y que es visitado por más de 6 millones de personas al año (INEGI, 2016). Rico (2007) estima que el consumo medio de

agua de un hotel de 4 estrellas es de 40 090 m³/año, por lo que cada hotel con más de 300 plazas, debería contar con su propia PTAR (Metcalf 1995; Kasim *et al.* 2014; Zanutti 2018). Los efluentes no tratados o pobremente tratados de los centros recreativos y hoteles llegan a causar serios problemas de contaminación (López y Dorado 2008; Vakalis 2016), en la zona de playas del PNCOIMPCPN se detectaron residuos sólidos no dispuestos correctamente, el incremento de estas situaciones podría generar un problema medioambiental como sucede en la Cuenca Aguas Blancas en la ciudad de Acapulco, Guerrero, México, donde el cauce del río recibe aguas residuales y residuos sólidos urbanos haciendo la calidad de sus aguas inaceptables para cualquier actividad (Dimas 2015).

El impacto antropogénico y la contaminación sobre el medio natural han demostrado ser un factor importante en el establecimiento de especies exóticas invasoras, sobre todo en los ecosistemas insulares y marinos (Aguirre *et al.* 2009; Low-Pfeng *et al.* 2014; Koleff 2017; Born-Schmidt 2017), por lo que la abundancia de especies invasoras en una región, puede darse en respuesta al exceso de contaminantes presentes (Crooks *et al.* 2011), aunque los factores también pueden ser de origen natural, como la cercana relación que existe entre los huracanes y la invasión del pez león *Pterois volitans/miles complex* en el Atlántico, Golfo de México y mar Caribe (Johnston y Purkis 2011; Johnston y Purkis 2015).

En el presente estudio, los organismos de mayores dimensiones fueron colectados en el polígono de Isla Mujeres (IM), mientras que los organismos de menor tamaño se obtuvieron del polígono de Punta Nizuc (PN). De acuerdo al Programa de Manejo del Parque Nacional, la calidad de agua del polígono de IM es muy buena y solo se deteriora conforme se aproxima a la costa norte, la cual tiene intercambios de agua importantes con la laguna Makax (SEMARNAT 2016). Para el caso del polígono de PN, la calidad del agua es reportada como muy variable, sobre todo regular en la zona de costa y en general como buena para la zona de marina. El polígono de Punta Cancún (PC) es el que presenta índices de calidad que oscilan entre malo y

regular, esto debido a la influencia de los aportes del sistema lagunar Nichupté-Bojórquez y la gran cantidad de actividades humanas que se desarrollan en sus costas (SEMARNAT 2016; Herrera-Silveira *et al.* 2015). Esto coincide con lo reportado por Reyes-Aguilar (2018), quien reporta tallas y pesos menores en zonas más impactadas y contaminadas del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV). La diferencia en tallas podría ser causada también por el acceso a la pesquería del pez león como lo describe Farquhar (2016), quien propone que el crecimiento sostenido y prolongado en edad, talla y peso del pez león, es influenciado por el esfuerzo pesquero, la accesibilidad a los sitios de captura y la popularidad de la especie en el mercado. De manera similar, se ha propuesto anteriormente que la proliferación de la invasión del pez león no era afectada por la proliferación de posibles depredadores, ni era facilitada por la complejidad estructural del ecosistema invadido (Anton *et al.* 2014).

En el presente trabajo se encontraron correlaciones significativas de moderadas a fuertes entre la longitud y el peso de los organismos capturados ($P < 0.05$, $r^2 = 87.57\%$, 95% de confianza), lo que quiere decir que alrededor del 87% de los pesos totales pueden ser explicados y pronosticados por la talla de los organismos, algo muy cercano a lo habitual para peces (Froese 2006). Esta correlación es similar a lo reportado por Aguilar y Quijano (2016), quienes estudiaron la relación entre la longitud y peso de organismos de pez león y la longitud y el peso de sus otolitos, encontrando una fuerte relación entre el peso total y la longitud total de los peces ($r^2 = 95\%$).

Fueron determinadas las concentraciones de metales pesados Cd, Cr y Pb en el músculo de los peces león colectados. Se estima que el consumo de organismos acuáticos es una vía de entrada de metales pesados a la dieta del ser humano, ya sea por su contacto con el sedimento, o por el consumo de otras especies bentónicas y biomagnificar los metales a través de la cadena trófica (Hoo-Fung *et al.* 2013). La determinación de Cd en el presente trabajo arrojó un rango entre los

0.006 a los 0.1918 mg kg⁻¹, mientras el promedio fue de 0.0541 ± 0.0398 mg kg⁻¹. La media de las observaciones no rebasa la normativa nacional para concentraciones de Cd en peces para consumo, la cual es de 0.5 mg kg⁻¹ (NOM-242-SSA1-2009). De manera contrastante, es considerada como no apta para consumo con respecto a los límites permisibles de la normatividad europea de 0.05 mg kg⁻¹ (Reglamento UE N° 488/2014). En estudios anteriores, distintos autores han determinado las concentraciones de Cd por sus afectaciones al medio ambiente y la salud humana. Hoo-Fung *et al.* (2013) determinaron la concentración de metales, entre ellos Cd, en músculo de pez león en las costas de Jamaica, encontraron una concentración media de 4.42 ± 0.89 mg kg⁻¹. Squadrone *et al.* (2019) reportaron concentraciones de Cd en músculo de pez león de las costas de Cuba menores (0.027 ± 0.003 mg kg⁻¹) a lo encontrado en el presente estudio. De igual manera hacen hincapié en la afinidad de ciertos metales a determinados órganos en los peces, que actúan como acumuladores, en el caso del Cd es el hígado donde se encuentra la mayor concentración.

Las concentraciones de Cr determinadas en el presente trabajo variaron desde no detectables hasta los 0.1209 como máxima concentración. El promedio se mantuvo en 0.0285 ± 0.0289 mg kg⁻¹. Actualmente no existe normatividad mexicana que establezca los límites máximos permisibles de Cr en los organismos, al ser considerado este como un oligoelemento necesario para la vida (Anderson *et al.* 1992; Alvarado-Gómez *et al.* 2002). Ayas *et al.* (2018) determinaron una concentración de Cr de 0.51 ± 0.02 mg kg⁻¹ en músculo de pez león *Pterois miles* colectado en el mar Mediterráneo, consideran a la carne de pez león como adecuada para su consumo debido a sus altos niveles de proteína, perfil de ácidos grasos y bajos niveles de metales traza contaminantes. Por otro lado, Reyes-Aguilar (2018) considera que los niveles de Cr encontrados en músculo de pez león colectados en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), se encuentran en el umbral de toxicidad para consumo humano, también hace

referencia al aumento de la concentración de contaminantes con respecto a la actividad humana que se desarrolle en la zona de captura.

En el presente trabajo las concentraciones determinadas de Pb fueron las mayores ($0.1209 \pm 0.0404 \text{ mg kg}^{-1}$). El organismo que menor concentración presentó tuvo $0.0364 \text{ mg kg}^{-1}$, mientras que el de mayor concentración alcanzó los $0.1646 \text{ mg kg}^{-1}$. La normatividad mexicana (NOM-242-SSA1-2009) es clara con respecto a esto, 0.5 mg kg^{-1} es la concentración máxima permisible en peces para consumo, por lo cual, ninguno de los organismos evaluados rebasa el límite de detección. Existen legislaciones más fuertes con respecto a los límites de la concentración de plomo en pescados, como lo es el Codex Alimentarius de la FAO, que dejan el LMP en 0.3 mg kg^{-1} , aún en este caso, todas las concentraciones determinadas de Pb para músculo de pez león, fueron menores a lo señalado por la normatividad internacional.

10. CONCLUSIONES.

Los contaminantes presentes en las cadenas tróficas del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc PNCOIMPCyPN podrían provenir de cualquier parte de la Península de Yucatán debido a su suelo kárstico y el arrastre subterráneo de contaminantes que esto implica.

El tratamiento de aguas residuales en el estado de Quintana Roo es insuficiente para la gran cantidad de turistas que recibe al año y podría representar graves problemas sanitarios y medioambientales en un futuro.

Las concentraciones de metales pesados determinados en músculo de pez león *Pterois volitans/miles complex* siguieron el orden $Pb > Cr > Cd$.

Ninguna de las concentraciones determinadas en el músculo de *P. volitans/miles complex* sobrepasó los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad mexicana NOM-242-SSA1-2009.

Según el análisis de correlación entre concentración de Pb y la longitud y peso de los datos obtenidos, las concentraciones de Pb disminuyen proporcionalmente al crecimiento de los organismos.

Se recomiendan más estudios de contaminación en el Parque Nacional y áreas aledañas, sobre todo en el Sistema Lagunar Nichupté-Bojórquez.

11. BIBLIOGRAFÍA CITADA.

- Acevedo Ramírez, C., & Secaira Fajardo, F. (2017). Importancia de los arrecifes y dunas en la protección de la costa. Serie técnica: el papel de los sistemas naturales en la dinámica costera en el Caribe Mexicano y el impacto de las actividades humanas en su condición actual.
- Acosta, Y., Paolini, J., Flores, S., Benzo, Z., El Zauahre, M., Toyo, L., & Senior, A. (2003). Evaluación de metales pesados en tres residuos orgánicos de diferente naturaleza. *Multiciencias*, 3(1).
- Aguakan. (2019). Ciclo de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneam. Retrieved Noviembre 2019, from <https://www.aguakan.com/acerca-de-aguakan/nuestra-actividad>
- Aguilar-Perera, A., & Quijano-Puerto, L. (2016). Relations between fish length to weight, and otolith length and weight, of the lionfish *Pterois volitans* in the Parque Nacional Arrecife Alacranes, southern Gulf of Mexico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 51(2), 469-474.
- Aguirre Muñoz, A., Alfaro, M., Gutiérrez, E., & Morales, S. (2009). Especies exóticas invasoras impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía. *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio/Sarukhán, J. (Coord. gen.) p. 277-318.
- Ahrenholz, D. W., & Morris, J. A. (2010). Larval duration of the lionfish, *Pterois volitans* along the Bahamian Archipelago. *Environmental Biology of Fishes*, 88(4), 305-309. doi: 10.1007/s10641-010-9647-4
- Alarcón, M. E. (2019). Cd, Pb V y Zn en tejido muscular de *Pterois volitans* (Linnaeus, 1758) del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

(Maestría en Ciencias), Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, Veracruz, México.

Albins, M. A., & Hixon, M. A. (2008). Invasive Indo-Pacific lionfish *Pterois volitans* reduce recruitment of Atlantic coral-reef fishes. *Marine Ecology Progress Series*, 367, 233-238.

Albins, M. A., & Hixon, M. A. (2013). Worst case scenario: potential long-term effects of invasive predatory lionfish (*Pterois volitans*) on Atlantic and Caribbean coral-reef communities. *Environmental Biology of Fishes*, 96(10-11), 1151-1157.

Alloway, B. J. (2012). Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (Vol. 22): Springer Science & Business Media.

Alvarado-Gámez, A., Blanco-Sáenz, R., & Mora-Morales, E. (2002). El cromo como elemento esencial en los humanos. *Revista Costarricense de Ciencias Médicas*, 23, 55-68.

Anderson, R. A., Bryden, N. A., & Polansky, M. M. (1992). Dietary chromium intake. *Biological Trace Element Research*, 32(1), 117-121. doi: 10.1007/BF02784595

Ángeles-Solís, D., Gómez-Hernández, Y., Ortiz-Moreno, O., & Sosa-Cordero, E. (2014). Programa de control de pez león *Pterois volitans* en la Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an. In A. M. Low Pfeng, Quijón, P. A. y Peters Recagno E. M. (Ed.), *Especies invasoras acuáticas: casos de estudio en ecosistemas de México* (pp. 19). México, D. F.: INECC-SEMARNAT.

Anton, A., Simpson, M. S., & Vu, I. (2014). Environmental and Biotic Correlates to Lionfish Invasion Success in Bahamian Coral Reefs. *PLOS ONE*, 9(9), e106229. doi: 10.1371/journal.pone.0106229

- Arbeláez, N., & Acero, A. (2011). Presencia del pez león *Pterois volitans* (Linnaeus) en el manglar de la bahía de Chengue, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 40(2), 431-435.
- Arredondo-Chavez, A. T., Sanchez-Jimenez, J. A., Avila-Morales, O. G., Torres-Chavez, P., Herrerias-Diego, Y., Medina-Nava, M., . . . Caballero-Vazquez, J. A. (2016). Spatio-temporal variation in the diet composition of red lionfish, *Pterois volitans* (Actinopterygii: Scorpaeniformes: Scorpaenidae), in the Mexican Caribbean: insights into the ecological effect of the alien invasion. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 46(3).
- ATSDR. (2007). Toxicological profile for Lead. Atlanta, GA: U.S: Agency for Toxic Substances and Disease Registry Retrieved from <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=92&tid=22>.
- Ayas, D., Agilkaya, G. S., Kosker, A. R., Durmus, M., Ucar, Y., & Bakan, M. (2018). The Chemical Composition of the Lionfish (*Pterois miles*, Bennett 1828), the New Invasive Species of the Mediterranean Sea. *Natural and Engineering Sciences*, 3(2), 103-115.
- Barbour, A. B., Montgomery, M. L., Adamson, A. A., Díaz-Ferguson, E., & Silliman, B. R. (2010). Mangrove use by the invasive lionfish *Pterois volitans*. *Marine Ecology Progress Series*, 401, 291-294.
- Bauer-Gottwein, P., R. N. Gondwe, B., Charvet, G., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. 19. doi: 10.1007/s10040-010-0699-5
- Bermúdez, A. B., Baca, C. A. G., & Lozano, F. R. G. (2014). La crónica de la invasión del pez león (*Pterois* spp.) en el Caribe mexicano. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

- Birungi, Z., Masola, B., Zaranyika, M. F., Naigaga, I., & Marshall, B. (2007). Active biomonitoring of trace heavy metals using fish (*Oreochromis niloticus*) as bioindicator species. The case of Nakivubo wetland along Lake Victoria. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(15), 1350-1358. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.034>
- Bogdanoff, A. K., Mostowy, J., Peake, J., Layman, C. A., Bermudez, A. B., Baca, C. G., . . . Morris, J. A. (2018). A brief description of invasive lionfish (*Pterois* sp.) diet composition in the Arrecifes de Cozumel National Park. *Food Webs*, 17, e00104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2018.e00104>
- Bogden, J. D., Singh, N. P., & Joselow, M. M. (1974). Cadmium, lead, and zinc concentrations in whole blood samples of children. *Environmental Science & Technology*, 8(8), 740-742.
- Born-Schmidt, G., de Alba, F., Parpal, J. y Koleff, P. (2017). Principales retos que enfrenta México ante las especies exóticas invasoras. México, D. F.: Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública
- Cámara de Diputados / LXIII Legislatura.
- Botello, A. V., Villanueva, F. S., & Diaz, G. G. (1997). Petroleum pollution in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea Reviews of environmental contamination and toxicology (pp. 91-118): Springer.
- Brito Bermúdez, A., González Baca, C. A. y Gómez Lozano, F. R. (2014). Crónica de la invasión del pez león (*Pterois* spp.) en el Caribe mexicano. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, México, 445-458.
- Caamal, E. (2018). Reporte técnico de pez león (*Pterois* spp) en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. (pp. 31). Cancún, Quintana Roo: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

- Carbajal, N. (2009). Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo (pp. 182). México, DF: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Castañeda Rivero, F. R., Quej, M., & Villegas-Sánchez, C. (2016). Distribución y abundancia del pez león (*Pterois volitans*) en diferentes hábitats en el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, Quintana Roo, México.
- Charlotte, D. R., Yolande, B.-N., Cordonnier, S., & Claude, B. (2016). The invasive lionfish, *Pterois volitans*, used as a sentinel species to assess the organochlorine pollution by chlordecone in Guadeloupe (Lesser Antilles). *Marine Pollution Bulletin*, 107(1), 102-106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.012>
- Chavez-Arredondo, A. (2016). Comparación trófica del pez león, *Pterois volitans* (Linnaeus, 1758) con tres especies de peces arrecifales del Caribe mexicano: a través del uso de isótopos estables y contenido estomacal. (Maestro en Ciencias), Centro de Investigación Científica de Yucatán A. C., Cancún, Quintana Roo.
- Chovanec, A., Hofer, R., & Schiemer, F. (2003). Fish as bioindicators. In B. A. Markert, A. M. Breure & H. G. Zechmeister (Eds.), *Trace Metals and other Contaminants in the Environment* (Vol. 6, pp. 639-676): Elsevier.
- CONACyT-CONAGUA. (2012). Primer informe de validación en campo humedales zona costera norte de Quintana Roo (Sistema Lagunar Nichupté) Estudio interdisciplinario de los humedales de la república mexicana: desarrollo metodológico para el inventario nacional de humedales y su validación a nivel piloto. México, DF: CONAGUA.

- CONAGUA. (2015). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2015. México: SEMARNAT.
- CONANP. (2006). Diagnóstico arrecifal del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.
- Côté, I. M., Green, S. J., & Hixon, M. A. (2013). Predatory fish invaders: Insights from Indo-Pacific lionfish in the western Atlantic and Caribbean. *Biological Conservation*, 164, 50-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.04.014>
- Crooks, J. A., Chang, A. L., & Ruiz, G. M. (2011). Aquatic pollution increases the relative success of invasive species. *Biological Invasions*, 13(1), 165-176. doi: [10.1007/s10530-010-9799-3](https://doi.org/10.1007/s10530-010-9799-3)
- Darling, E. S., Green, S. J., O'Leary, J. K., & Côté, I. M. (2011). Indo-Pacific lionfish are larger and more abundant on invaded reefs: a comparison of Kenyan and Bahamian lionfish populations. *Biological Invasions*, 13(9), 2045-2051. doi: [10.1007/s10530-011-0020-0](https://doi.org/10.1007/s10530-011-0020-0)
- de Alba, F., Born-Schmidt, G., & Koleff, J. P. P. (2017). Principales retos que enfrenta México ante las especies exóticas invasoras. México, DF: Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública.
- de La Cruz-Landero, N., Alderete Chávez, Á., & Laffón Leal, S. (2013). ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DEL ECOSISTEMA MANGLAR EN LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE, MÉXICO. *Foresta Veracruzana*, 15(1), 25-30.
- de Souza, F., & Tozzo, R. A. (2013). *Poecilia reticulata* Peters 1859 (Cyprinodontiformes, Poeciliidae) como possível bioindicador de ambientes degradados. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, 3(2), 162-175.

- Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., & Séralini, G. E. (2018). Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicology Reports*, 5, 156-163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.025>
- Díaz López, C., Carrión Jiménez, J. M., & González Bucio, J. L. (2006). Estudio de la contaminación por Hg, Pb, Cd y Zn en la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 72, 19-31.
- Dimas, M. J. J., Garza, M. N. D., & Treviño y, D. B. M. (2015). Índice de la calidad del agua y metales pesados del cauce aguas blancas del municipio de Acapulco Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 113-118.
- Echevarría, L. M. P., Monteagudo, P. P. C., Guerra, D. C., Wong, R. I. C., Rojas, D. C., Aragón, H. C., . . . Osoria, R. A. F. (2017). Superposición de la dieta del pez león *Pterois volitans* (Teleostei: Scorpaenidae) con la de peces nativos de nivel trófico similar en Cuba. *Bulletin of Marine and Coastal Research*• Vol, 46, 2.
- Economía, S. d. (2018). Panorama minero del estado de Quintana Roo. Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Ellison, A. M., & Farnsworth, E. J. (1996). Anthropogenic Disturbance of Caribbean Mangrove Ecosystems: Past Impacts, Present Trends, and Future Predictions. *Biotropica*, 28(4), 549-565. doi: 10.2307/2389096
- Escudero-Castillo, M., Felix-Delgado, A., Silva, R., Mariño-Tapia, I., & Mendoza, E. (2018). Beach erosion and loss of protection environmental services in Cancun, Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 156, 183-197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.06.015>

- Farquhar, S. (2016). Age And Growth Of The Invasive Lionfish: North Carolina, USA, vs Bonaire, Dutch Caribbean. Proceedings of the 69th Gulf and Caribbean Fisheries Institute, 1-6.
- Fernandez, A., Singh, A., & Jaffé, R. (2007). A literature review on trace metals and organic compounds of anthropogenic origin in the Wider Caribbean Region. *Marine Pollution Bulletin*, 54(11), 1681-1691. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.08.007>
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight–length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22(4), 241-253. doi: 10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x
- Golubov, J., Mandujano, M. C., Guerrero-Eloisa, S., Mendoza, R., Koleff, P., González, A., . . . Born-Schmidt, G. (2014). Análisis multicriterio para ponderar el riesgo de las especies invasoras. Mendoza, R. y P.
- Gondwe, B. (2010). Exploration, modelling and management of groundwater-dependent ecosystems in karst - The Sian Ka'an case study, Yucatan, Mexico. (PhD Thesis), Technical University of Denmark, Dinamarca.
- González Arrellano, N. A. (2016). El karst y su relación con la actividad turística en Quintana Roo.
- Gonzalez, H., Pomares, M., Ramirez, M., & Torres, I. (1999). Heavy metals in organisms and sediments from the discharge zone of the submarine sewage outfall of Havana City, Cuba. *Marine Pollution Bulletin*, 38(11), 1048-1051.
- González, R. M., Moguel, C. Z., Bolio, M. C., & Canul, R. P. (2004). Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en sedimentos y en tres especies de pepino de mar (clase holothuroidea) de las costas del Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(2), 7-19.

- González-Martínez, A. I., Barrios-Caballero, Y., Morales-Guerrero, N. y De Jesús, S. (2017). Análisis de riesgo, sistemas de información y Método de Evaluación Rápida de Invasividad. In G. born-Schmidt, de Alba, F., Parpal, J. y Koleff, P. (Ed.), Principales retos que enfrenta México ante las especies exóticas invasoras. México, D. F.: Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. Cámara de Diputados/LXIII Legislatura.
- Hernández-Abello, J., Garcia-Urueña, R., & P, A. (2014). Estructura de tallas y preferencia al sustrato del pez león(*Pterois volitans*) (SCORPAENIFORMES: SCORPAENIDAE) en Santa Marta (COLOMBIA). *Acta Biológica Colombiana*, 20. doi: 10.15446/abc.v20n2.41611
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A., & Monroy-Ríos, E. (2011). Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1), 517-528. doi: 10.1007/s11270-010-0664-x
- Herrera-Silveira, J., Cortés-Balán, O., Ramírez-Ramírez, J., & Osorio, L. (2015). Monitoreo de la condición trófica de la columna agua de los ambientes costeros del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizúc: Segunda Etapa. In CONABIO-CONANP (Ed.), Proyecto GQ002. México D. F.: CINVESTAV-Mérida.
- Herrera-Silveira, J. A. A., Nancy; Troccoli-Ghinaglia, Luis; Comín, Francisco A. ; Madden, Chris. (2005). Eutrofización costera en la Península de Yucatán. In S. a. d. M. A. y. R. Naturales., I. N. d. E. a. (México). & H. R. I. f. G. o. M. Studies (Eds.), Diagnóstico ambiental del Golfo de México 2 (pp. 823-850). México: SEMARNAT.
- Hoo Fung, L. A., Antoine, J. M. R., Grant, C. N., & Buddo, D. S. A. (2013). Evaluation of dietary exposure to minerals, trace elements and heavy metals from the

muscle tissue of the lionfish *Pterois volitans* (Linnaeus 1758). *Food and Chemical Toxicology*, 60, 205-212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.07.044>

Huge, D. H., Schofield, P. J., Jacoby, C. A., & Frazer, T. K. (2014). Total mercury concentrations in lionfish (*Pterois volitans/miles complex*) from the Florida Keys National Marine Sanctuary, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 78(1-2), 51-55.

IARC. (1990). Evaluation of carcinogenic risks to humans Vol. 49. I. A. f. R. o. Cnccr (Ed.) (pp. 687).

INEGI. (2016). Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 407.

INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2017. México: Gobierno del Estado de Quintana Roo.

Invasoras, C. A. N. s. E. (2010). Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación. México, DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Jeckel, W. H., Roth, R. R., & Ricci, L. (1996). Patterns of trace-metal distribution in tissues of *Pleoticus muelleri* (Crustacea: Decapoda: Solenoceridae). *Marine Biology*, 125(2), 297-306. doi: 10.1007/bf00346310

Johnston, M. W., & Purkis, S. J. (2011). Spatial analysis of the invasion of lionfish in the western Atlantic and Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 62(6), 1218-1226. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.03.028>

Johnston, M. W., & Purkis, S. J. (2015). Hurricanes accelerated the Florida–Bahamas lionfish invasion. *Global change biology*, 21(6), 2249-2260.

- Kačaroğlu, F. (1999). Review of Groundwater Pollution and Protection in Karst Areas. *Water, Air, and Soil Pollution*, 113(1), 337-356. doi: 10.1023/A:1005014532330
- Kasim, A., Gursoy, D., Okumus, F., & Wong, A. (2014). The importance of water management in hotels: a framework for sustainability through innovation. *Journal of Sustainable Tourism*, 22(7), 1090-1107. doi: 10.1080/09669582.2013.873444
- Koleff, P. Conceptos básicos sobre las invasiones biológicas y sus impactos a la biodiversidad. Principales retos que especies exóticas invasoras, 13.
- Lara, A., Contreras, F., Castañeda, O., Barba, E., & A. Perez, M. (2011). Lagunas costeras y estuarios.
- López, G., & Dorado, S. (2008). Residuos peligrosos domésticos en los residuos sólidos urbanos. Castellán: Redisa.
- Lovell, S. J., Stone, S. F., & Fernandez, L. (2016). The Economic Impacts of Aquatic Invasive Species: A Review of the Literature. *Agricultural and Resource Economics Review*, 35(1), 195-208. doi: 10.1017/S1068280500010157
- Low Pfeng, A. M., Quijón, P. A. y Peters Recagno E. M. (2014). Especies invasoras acuáticas: Casos de estudio en ecosistemas de México. México, D. F.: INECC-SEMARNAT.
- Maldonado-Enríquez, E. J., López-Noverola, U., Salinas-Hernández, R. M., González-Cortés, N., Cuenca-Soria, C. A., Jiménez-Vera, R., & Hernández-Juárez, J. L. (2015). Contenido de metales pesados en músculo de pez diablo *Pterygoplichthys pardalis*. *Revista Iberoamericana de Ciencias*.
- Mantelatto, F., Avelar, W., Silva, D., Tomazelli, A., Lopez, J., & Shuhama, T. (1999). Heavy Metals in the Shrimp *Xiphopenaeus kroyeri* (Heller, 1862)(Crustacea,

- Penaeidae) from Ubatuba Bay, São Paulo, Brazil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol*, 62, 152-159.
- March Mifsut, I., & Martínez Jiménez, M. (2007). Especies invasoras de alto impacto a la biodiversidad: prioridades en México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- McElroy, J. A., Shafer, M. M., Trentham-Dietz, A., Hampton, J. M., & Newcomb, P. A. (2006). Cadmium exposure and breast cancer risk. *Journal of the National Cancer Institute*, 98(12), 869-873.
- Mendoza, R., & Koleff, P. (2014). Especies acuáticas invasoras en México. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.
- Mendoza-Carranza, M., Sepúlveda-Lozada, A., Dias-Ferreira, C., & Geissen, V. (2016). Distribution and bioconcentration of heavy metals in a tropical aquatic food web: A case study of a tropical estuarine lagoon in SE Mexico. *Environmental Pollution*, 210, 155-165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.014>
- Mojarro, D., José, J., Guzmán, O., Daniel, D., & Ortega Ramírez, G. O. (2018). METALES PESADOS EN LA LAGUNA NEGRA DE PUERTO MARQUÉS DEL MUNICIPIO DE ACAPULCO, GUERRERO.
- Molina Montoya, N. P., Aguilar Casas, P., & Cordovez Wandurraga, C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 8(1), 77-88.
- Monteforte, M., Balart, E. F., Pérez-Urbiola, J. C. y Ortega-Rubio, A. (2014). Rentabilidad empresarial vs. protección contra especies exóticas invasoras: dilema para el desarrollo de la acuicultura, caso Bahía de la Paz, Baja California Sur, México. In SEMARNAT (Ed.), *Especies invasoras acuáticas: casos de estudio en ecosistemas en México*. México.

- Morales-Hernández, F., Soto-Jiménez, M. F., & Páez-Osuna, F. (2004). Heavy Metals in Sediments and Lobster (*Panulirus gracilis*) from the Discharge Area of the Submarine Sewage Outfall in Mazatlán Bay (SE Gulf of California). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 46(4), 485-491. doi: 10.1007/s00244-003-3064-z
- Morris, J. A., & Whitfield, P. E. (2009). Biology, ecology, control and management of the invasive Indo-Pacific lionfish: an updated integrated assessment.
- Morris Jr, J. A., Akins, J., Barse, A., Cerino, D., Freshwater, D., Green, S., . . . Whitfield, P. (2009). Biology and ecology of the invasive lionfishes, *Pterois miles* and *Pterois volitans*.
- Mulligan, A., & Charette, M. (2009). Groundwater Flow to the Coastal Ocean. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. doi: 10.1016/B978-012374473-9.00645-7
- Navarro Espinoza, E. (2015). Prevalencia de enfermedades de *Acropora palmata* en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos y su relación con las fuentes de aporte de nutrientes y el desarrollo costero.
- Nava-Ruíz, C., & Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién (Mex)*, 16(3), 140-147.
- Osorio Velásquez, P. E. (2018). Uso de especies invasoras como centinelas de contaminación: el caso de *Pterois volitans* en la Bahía de Cartagena, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D. C., Colombia.
- Pimentel, D., McNair, S., Janecka, J., Wightman, J., Simmonds, C., O'connell, C., . . . Aquino, T. (2001). Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 84(1), 1-20.

- Pimentel, D., Zuniga, R., & Morrison, D. (2005). Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological economics*, 52(3), 273-288.
- Porras, Á. C. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *REVISTA INGENIERÍAS UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN*, 9(17), 41-49.
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Paper presented at the Anales de la Facultad de Medicina.
- Ramírez, A. J. (2012). TRANSPORTE FLUVIAL DE NUTRIENTES Y METALES PESADOS AL MAR CARIBE DE VENEZUELA. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 7(1), 7.
- Ramirez, E. (2009). Sitio piloto Sistema Lagunar Nichupte (cancún) Adaptación a los impacto del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México (pp. 522-547): INECC.
- Ramos, L. d. R. (2019). Aspectos morfométricos del pez león *Pterois volitans* / *Pterois miles* y su relación con la dieta en Punta Francés, Cuba., Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.
- Raymundo, E. J., Reynoso, F. L., Chávez, M. d. R. C., Wakida-Kusunoki, A. T., & Sánchez, C. L. (2015). Metales pesados en especies invasoras del sistema fluvio-lagunar-deltaico del río Palizada. *El Agro Veracruzano* 2015, 84.
- Reyes-Aguilar, Á. R. (2018). Concentración de metales pesados y metaloides en *Pterois volitans* (Linnaeus, 1758) en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. (Maestría en Ciencias), Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, México.

- Reynolds, K. A. (2001). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 48-49.
- Rico, A. (2007). Tipologías de consumo de agua en abastecimientos urbano-turísticos de la Comunidad Valenciana. doi: 10.14198/INGEO2007.42.01
- Ríos, H., & Vargas, O. (2003). Ecología de las especies invasoras. *Pérez Arbelaezia*, 14, 119-148.
- Ritger, A. L., Curtis, A. N., & Chen, C. Y. (2018). Bioaccumulation of mercury and other metal contaminants in invasive lionfish (*Pterois volitans/miles complex*) from Curaçao. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 38-44.
- Rivera-Planter, M. M.-P., Carlos. (2005). Tarifas y arrecifes. Instrumentos económicos para las áreas naturales protegidas marinas en México. *Gaceta Ecológica*(75), 19-34.
- Rojas, D. C. (2016). Impacto potencial del pez león sobre la comunidad de peces en dos áreas marinas protegidas del Caribe (Cuba y México). *El Colegio de la Frontera Sur*.
- Rojas, M. T., Acuña, J. A., & Rodríguez, O. M. (1998). Metales traza en el pepino de mar *Holothuria (Halodeima)* mexicana del Caribe de Costa Rica. *Revista de biología tropical*, 215-220.
- Roo, G. d. E. d. Q. (2016). Plan Estatal de desarrollo Quintana Roo 2016 - 2022. Quintana Roo, México.
- Rubio, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Ingeniería y Región*(13), 73-90.

- Rubio Maldonado, E., Murad Robles, M., Sanroque, R., & Vicente, J. (2010). Crisis ambiental en la costa de Quintana Roo como consecuencia de una visión limitada de lo que representa el desarrollo sustentable. *Argumentos* (México, DF), 23(63), 161-185.
- Sabido-Itzá, M. M., Gómez-Poot, J., Medina, A., García Rivas, C., & Hadad-López, W. (2012). Dinámica Poblacional del Pez León (*Pterois volitans*) en El Parque Nacional Arrecifes de Xcalak (PNAX), Quintana Roo, Caribe Mexicano.
- Sabido-Itzá, M. M., Medina-Quej, A., de Jesús-Navarrete, A., Gómez-Poot, J. M., & García-Rivas, M. d. C. (2016). La estructura de tallas como evidencia del establecimiento de *Pterois volitans* (Scorpaeniformes: Scorpaenidae) en el sur del Caribe mexicano. *Revista de biología tropical*, 64(1), 369-378.
- Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135.
- Sandel, V., Martínez-Fernández, D., Wangpraseurt, D., & Sierra, L. (2015). Ecology and management of the invasive lionfish *Pterois volitans/miles complex* (Perciformes: Scorpaenidae) in Southern Costa Rica. *Revista de biología tropical*, 63, 213-221.
- Sastre, M. P., Reyes, P., Ramos, H., Romero, R., & Rivera, J. (1999). Heavy Metal Bioaccumulation in Puerto Rican Blue Crabs (*Callinectes* spp.). *Bulletin of Marine Science*, 64(2), 209-217.
- Schofield, P. J. (2009). Geographic extent and chronology of the invasion of non-native lionfish (*Pterois volitans* [Linnaeus 1758] and *P. miles* [Bennett 1828]) in the Western North Atlantic and Caribbean Sea. *Aquatic Invasions*, 4(3), 473-479.
- Schofield, P. J. (2010). Update on geographic spread of invasive lionfishes (*Pterois volitans* [Linnaeus, 1758] and *P. miles* [Bennett, 1828]) in the Western North

Atlantic Ocean, Caribbean Sea and Gulf of Mexico. Aquatic Invasions, 5(Supplement 1), S117-S122.

SEMARNAT. (2016). Programa de Manejo Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. México: SEMARNAT.

Semmens, B. X., Buhle, E. R., Salomon, A. K., & Pattengill-Semmens, C. V. (2004). A hotspot of non-native marine fishes: evidence for the aquarium trade as an invasion pathway. *Marine Ecology Progress Series*, 266, 239-244.

Silveira, J. (2006). Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, diagnóstico y manejo (Vol. 19).

Siung-Chang, A. (1997). A review of marine pollution issues in the Caribbean. *Environmental Geochemistry and Health*, 19(2), 45-55.

Squadrone, S., Brizio, P., Stella, C., Mantia, M., Favaro, L., Biancani, B., . . . Abete, M. C. (2019). Differential Bioaccumulation of Trace Elements and Rare Earth Elements in the Muscle, Kidneys, and Liver of the Invasive Indo-Pacific Lionfish (*Pterois* spp.) from Cuba. *Biological Trace Element Research*, 1-10.

Téllez, J., Roxs, M. C., & Gaitán, A. M. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina*, 52(1), 50-61.

Uveges, J. L., Corbett, A. L., & Mal, T. K. (2002). Effects of lead contamination on the growth of *Lythrum salicaria* (purple loosestrife). *Environmental Pollution*, 120(2), 319-323.

Vakalis, S., Sotiropoulos, A., Moustakas, K., Malamis, D., Vekkos, K., & Baratieri, M. (2016). Characterization of hotel bio-waste by means of simultaneous thermal analysis. *Waste and biomass valorization*, 7(4), 649-657.

- Valdes, D., Chumacero, M., & Real, E. (2006). Sediment oxygen consumption in a developed coastal lagoon of the Mexican Caribbean (Vol. 35).
- Vásquez-Yeomans, L., Carrillo, L., Morales, S., Malca, E., Morris, J. A., Schultz, T., & Lamkin, J. T. (2011). First larval record of *Pterois volitans* (Pisces: Scorpaenidae) collected from the ichthyoplankton in the Atlantic. *Biological invasions*, 13(12), 2635-2640.
- Vega-Zepeda, A. I.-N., Roberto; Nájera-Hillman, Eduardo; Hernández-Ramírez, Héctor. (2006). Diagnóstico arrecifal del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc In CONANP (Ed.), Departamento de Investigación y Monitoreo. México: CONANP.
- Villanueva, S., & Botello, A. V. (1992). Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 8(1), 47-61.
- Villaseñor-Derbez, J. C. (2018). Brief description of prey selectivity and ontogenetic changes in the diet of the invasive lionfish *Pterois volitans* (Actinopterygii, Scorpaenidae) in the Mexican Caribbean.
- Waugh, J. (2008). TRADE RELATED PATHWAYS TO THE INTRODUCTION OF TERRESTRIAL INVASIVE SPECIES IN THE INSULAR CARIBBEAN.
- Whitfield, P. E., Hare, J. A., David, A. W., Harter, S. L., Muñoz, R. C., & Addison, C. M. (2007). Abundance estimates of the Indo-Pacific lionfish *Pterois volitans/miles complex* in the Western North Atlantic. *Biological invasions*, 9(1), 53-64. doi: 10.1007/s10530-006-9005-9
- Wilcove, D. S., Rothstein, D., Dubow, J., Phillips, A., & Losos, E. (1998). Quantifying threats to imperiled species in the United States. *BioScience*, 48(8), 607-615.

- Wilcox, C. L., Motomura, H., Matsunuma, M., & Bowen, B. W. (2018). Phylogeography of Lionfishes (Pterois) Indicate Taxonomic Over Splitting and Hybrid Origin of the Invasive Pterois volitans. *Journal of Heredity*, 109(2), 162-175. doi: 10.1093/jhered/esx056
- Yucra, S., Gasco, M., Rubio, J., & Gonzales, G. F. (2008). Exposición ocupacional a plomo y pesticidas órganofosforados: efecto sobre la salud reproductiva masculina. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 25, 394-402.
- Zamudio-Alemán, R. E., Castañeda-Chávez, M., Lango-Reynoso, F., Galaviz-Villa, I., Amaro-Espejo, I. A., & Romero-González, L. (2014). Metales pesados en sedimento marino del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. *Rev. Iberoam. Cienc*, 1(4), 159-168.
- Zanuttín, G. (2018). Comparación de sistemas de tratamientos de efluentes para un hotel en ambiente urbano. Dimensionamiento del proceso seleccionado.