



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISION DE CIENCIAS E INGENIERIAS

ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS (Pb, Hg, Cd, As Y Zn) EN LA COLUMNA DE AGUA Y EN SEDIMENTO DEL RÍO HONDO

TESIS RECEPCIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIADA EN INGENIERA AMBIENTAL

Presenta

ANA MARÍA PEÑALOZA SÁNCHEZ

Director de tesis

Q.F.B. José Luis González Bucio

Chetumal, Quintana Roo, México, Marzo de 2006

049761



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Tesis del programa de Licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

LICENCIADA EN INGENIERIA AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

Handwritten signature of José Luis González Bucio, including a small number '3' to the right.

Q.F.B. José Luis González Bucio

ASESOR:

Handwritten signature of Víctor Hugo Delgado Blas.

Dr. Víctor Hugo Delgado Blas

ASESOR:

Handwritten signature of José Manuel Carrión Jiménez.

Dr. José Manuel Carrión Jiménez

ASESOR SUPLENTE:

Handwritten signature of José Martín Rivero Rodríguez.

M.C. José Martín Rivero Rodríguez

ASESOR SUPLENTE:

Handwritten signature of Benito Prezas Hernández.

M.C. Benito Prezas Hernández



Chetumal, Quintana Roo, México, Marzo de 2006.

A ustedes, quienes me han dado la libertad y la oportunidad de realizar un proyecto más y por contagiarme la alegría de ser y de vivir.

Rosa María y Mario, mis padres

Agradecimientos

A Aaron por su apoyo, compañía y paciencia en todo momento.

Al profesor José Luis González Bucio, por todas sus enseñanzas y por el tiempo invertido en la realización de este trabajo.

A los maestros que confiaron y dedicaron tiempo a este trabajo: Víctor Hugo Delgado, Manuel Carrión, Martín Rivero, Benito Prezas.

A la DCI por el apoyo en las salidas a campo y en laboratorio; a todos los maestros de la División de Ciencias e Ingenierías.

A la Secretaría de Marina por el apoyo en la realización de este trabajo.

A mis compañeros y amigos, Karla y Juan Carlos, por su colaboración en la toma de muestras.

INDICE

Índice general	I
Lista de tablas	II
Lista de figuras	III
Introducción	1
Antecedentes	4
Justificación	5
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
Descripción del área de estudio	7
Metodología	9
Preparación de muestras en el laboratorio	11
Resultados y discusiones	13
Análisis de componentes principales en sedimentos y agua del río Hondo	15
Componentes mayoritarios en los sedimentos del río Hondo	20
Parámetros fisicoquímicos en el agua del río Hondo	23
Metales pesados en sedimentos y agua	28
Conclusiones	37
Bibliografía	39
Anexos	43

Lista de tablas

Tabla 1. Matriz de correlación en muestras de sedimentos en temporada de seca.

Tabla 2. Matriz de correlación en muestras de sedimentos en temporada de lluvia.

Tabla 3. Matriz de correlación en muestras de agua en temporada de seca.

Tabla 4. Matriz de correlación en muestras de agua en temporada de lluvia.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos en muestras de sedimentos en temporada de seca.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos en muestras de sedimentos en temporada de lluvia.

Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua en temporada de seca.

Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua en temporada de lluvia.

Tabla 9. Concentración media de los metales pesados en sedimentos del río Hondo en temporada de seca.

Tabla 10. Concentración media de los metales pesados en sedimentos del río Hondo en temporada de lluvia.

Tabla 11. Concentración media de los metales pesados en agua del río Hondo en temporada de seca.

Tabla 12. Concentración media de los metales pesados en agua del río Hondo en temporada de lluvia.

Lista de figuras

Figura 1. Diseño de las estaciones de muestreo en el río Hondo.

Figura 2. Análisis de Componentes Principales en muestras de sedimentos del río Hondo (CP-I 41.69% y CP-II 33.14% de varianza) en temporada de seca.

Figura 3. Análisis de Componentes Principales en muestras de sedimentos del río Hondo (CP-I 54.36% y CP-II 33.87% de varianza) en temporada de lluvia.

Figura 4. Análisis de Componentes Principales en muestras de agua del río Hondo (CP-I 37.92% y CP-II 25.10% de varianza) en temporada de seca.

Figura 5. Análisis de Componentes Principales en muestras de agua del río Hondo (CP-I 76.23% y CP-II 13.48% de varianza) en temporada de lluvia.

Figura 6. Distribución espacial y temporal de materia orgánica y carbonato de calcio en sedimentos del río Hondo en temporada de seca.

Figura 7. Distribución espacial y temporal de materia orgánica y carbonato de calcio en sedimentos del río Hondo en temporada de lluvia.

Figura 8. Distribución espacial y temporal de Temperatura, pH, OD y Conductividad en agua del río Hondo en temporada de seca.

Figura 9. Distribución espacial y temporal de Temperatura, pH, OD y Conductividad en agua del río Hondo en temporada de lluvia.

Figura 10. Distribución espacial y temporal de los metales pesados en sedimentos del río Hondo en temporada de seca.

Figura 11. Distribución espacial y temporal de los metales pesados en sedimentos del río Hondo en temporada de lluvia.

Figura 12. Distribución espacial y temporal de los metales pesados en agua del río Hondo en temporada de seca.

Figura 13. Distribución espacial y temporal de los metales pesados en agua del río Hondo en temporada de lluvia.

INTRODUCCIÓN

En Quintana Roo, el estudio de los cuerpos de aguas continentales superficiales y subterráneos ha sido limitado y disperso. La mayor parte de ellos son ecosistemas sometidos a diversas actividades antropogénicas, representando un factor fundamental en la introducción de diversos contaminantes en las aguas superficiales. Sin embargo, (Förstner *et al.*, 1987) menciona que la mayoría de los cuerpos de agua indican en general un bajo nivel de contaminación con respecto a elementos traza. El término metales pesados o elementos traza se refiere a los elementos que se encuentran en concentraciones bajas en los sistemas con excepción del Fe. Incluye tanto los elementos que son esenciales para los organismos Cu, Fe, Mn, Zn y Co, así como los que no se le conoce alguna función biológica asociada y son altamente tóxicos, tales como Cd, Hg, Pb y Ag (Usero *et al.*, 1997).

En términos geológicos, los elementos traza se definen como los que se encuentran en una concentración de 1000 mg/L o inferior en la corteza de la tierra. Los metales traza desde el punto de vista geológico son la fuente de los problemas de toxicidad debidos a la presencia de metales, puesto que la mayoría de los organismos no se adaptan a ellos cuando se encuentran localmente en el ambiente en altas concentraciones.

El aporte de metales al ciclo hidrológico procede de diversas fuentes, una de ellas es de origen litogénico o geoquímico a partir de los minerales que por causas de erosión, lluvias y otros factores, son arrastrados hacia el agua (Al-Shukry, 1993). Químicamente se entiende por metal pesado aquel cuya densidad es mayor de 5gr/cm³.

Los metales pesados no son biodegradables y por lo mismo no se eliminan de los sistemas acuáticos por procesos naturales (Förstner y Wittmann 1981; Adams *et al.*, 1992). Por lo tanto son muy contaminantes y sufren un ciclo global eco-

biológico, donde las aguas naturales son la principal ruta (Athié, 1987; Fawcett, 1988). En la actualidad los metales pesados tienen un gran significado como indicadores de la calidad ecológica de todo flujo de agua debido a su toxicidad y muy especialmente al comportamiento bioacumulativo (Colas, 1972; Shen, 1973) y en los sedimentos.

Los sedimentos pueden definirse como mezcla compleja de fases sólidas que contienen bacterias, materia orgánica, minerales arcillosos, óxidos metálicos, carbonatos, sulfuros y una gran diversidad de otros minerales y los contaminantes pueden estar asociados con varias de estas fases. Los sedimentos son considerados como destino final de diferentes sustancias introducidas al medio en forma natural o antrópicamente y se acumulan en concentraciones superiores a las contenidas en el agua y en los organismos, condición que facilita su análisis químico (Bordas *et al.*, 2001).

Los sedimentos pueden actuar como portadores y posibles fuentes de contaminación porque los metales no se mantienen unidos fuertemente al sedimento y pueden ser liberados a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales tales como pH, potencial redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelatos orgánicos (Förstner *et al.*, 1987; Baird, 2001). La concentración total del metal, sólo ciertas formas químicas son tóxicas para los organismos, incluidas iones libres y metales liposolubles (Lester, 1987; Chen, 1996); en consecuencia, el estudio en la fracción biodisponible o móvil de metales ligados a sedimentos es más importante que la concentración total del metal en las corrientes fluviales.

Estos cambios, en apariencia poco significativos, son de gran utilidad para las condiciones ambientales para estimar la removilización de los metales pesados de sedimentos. Con ello se determinan las diversas formas químicas en que se encuentran, así como el tipo de sustrato al que se hallan asociados los cationes metálicos en los sedimentos (Rosental *et al.*, 1986; Usero *et al.*, 1997). Existen

diferentes técnicas de análisis de los metales y una de ellas es la técnica de especiación, que proporciona información sobre el comportamiento de los metales pesados en los sistemas acuáticos, su movilidad y con ello lograr, una mejor previsión en la manipulación. Esta técnica consiste en la extracción química secuencial y se aplica extensamente en estudios ambientales, no obstante, su capacidad de separar metales pesados o definir fracciones geoquímicamente no es perfecto sin embargo es útil para entender el comportamiento químico y la biodisponibilidad de metales en los sedimentos (Prusty *et al.*, 1994; Usero *et al.*, 1997).

La transformación y transporte físico de los metales están fuertemente influenciados por las condiciones específicas del sitio, prácticas de manejo, el clima y las condiciones estacionales de lluvias (Valiron, 1983). Los cambios estacionales que afectan las concentraciones de los compuestos orgánicos donde los metales son más complejos, pueden contribuir a la variación estacional de la biodisponibilidad del metal, lo que origina susceptibilidad incrementada a las comunidades acuáticas respecto a los metales en ciertas épocas del año (Ma. *et al.*, 1997; Baird, 2001).

ANTECEDENTES

Se han realizado algunos estudios en el área del río Hondo. Ortiz et al. 1997, en coordinación con personal de la zona Naval Militar, efectuó un trabajo relativo a la evaluación de niveles de plaguicidas organoclorados en sedimento de las principales afluentes hacia México y Belice con desembocadura en el río Hondo. Consideraron 14 puntos partiendo de La Unión hasta la desembocadura del río Hondo en la Bahía de Chetumal. Concluyeron que al río Hondo llegan diversidad de contaminantes provenientes de la actividad agrícola de la zona cuyo receptor final son los sedimentos de la bahía y, en caso de resuspenderse, dichos sedimentos serían una fuente potencial de contaminantes que podrían liberarse a la columna de agua y ocasionar efectos tóxicos a la biota.

En 1997 Rojas *et al.*, realizó estudios de niveles de concentración de metales pesados en hueso y sangre de manatíes (*Trichechus manatus manatus*) de la Bahía de Chetumal y río Hondo y se hallaron 14 metales en huesos de manatíes de la Bahía y un ejemplar de la Isla Holbox; las concentraciones de Ni, Cu, Cd, Pb y Hg fueron superiores a las reportadas en otros mamíferos marinos.

En el 2001 se realizó un estudio de especiación de metales pesados en sedimentos de la bahía de Chetumal, Quintana Roo y la acumulación en el músculo de bagres (*Ariopsis assimilis*), como resultado, el Zn y el V fueron los metales más biodisponibles en las dos épocas del año y el Fe menos biodisponible tanto en sedimentos como en los organismos. También las relaciones mineralógicas entre el Fe, Zn, Pb, Cu, Cd, Ni y V sugirieron los aportes de estos metales de diferentes fuentes adicionales (García, 2001).

JUSTIFICACIÓN

Es conveniente mencionar la principal problemática que plantea la CONABIO en el río Hondo; tal como la modificación del entorno, principalmente la deforestación debida al incremento en la agricultura (caña de azúcar) y ganadería y al uso intensivo forestal; la contaminación: por agroquímicos y materia orgánica; el uso de venenos para pesca y trampas no selectivas y el abastecimiento de agua para riego.

Existe un desarrollo intensivo de la agricultura tanto en Belice como en México y su consecuente crecimiento en la población han acelerado los procesos de degradación del sistema en su conjunto, lo que representa un riesgo agregado para los habitantes.

El sistema ribereño del río esta integrado por la red principal del río Hondo, sus tributarios y numerosos humedales como lagunas, pantanos, manglares, llanuras de inundación y cenotes que se localizan en ambos márgenes del río y que hacen de esta región una zona con extensa biodiversidad.

El sistema es destacable por la regulación hidrológica de la Bahía de Chetumal, un cuerpo de agua somero, abasteciendo del agua dulce indispensable a especies acuáticas como el manatí. Además favorece la regulación y el control climático con sus aguas abiertas y aguas superficiales que participan en el proceso de evaporación y almacenamiento.

Este trabajo pretende contribuir a un conocimiento relativo a la presencia de metales pesados tanto en agua como en sedimento del río Hondo.

Con este estudio se intenta proporcionar elementos fundamentales de utilidad para posteriores estudios, asimismo, aportar conocimientos respecto a metales pesados en sedimento y agua en el río Hondo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la concentración de metales pesados en el sedimento y la columna de agua del río Hondo con el uso de la técnica denominada Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA).

Objetivos específicos

- Analizar la contaminación evaluando los parámetros fisico-químicos (pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto, Temperatura, Carbonatos, Materia Orgánica y la concentración de metales pesados (Pb, Hg, Cd, Zn, As) del río Hondo.
- Establecer una correlación entre parámetros fisico-químicos de la columna de agua y en los sedimentos, con énfasis en los cinco metales pesados seleccionados.

DESCRIPCION DEL ÁREA DE ESTUDIO

La parte sur del estado de Quintana Roo esta limitada por los paralelos 18° 21" y 18° 52" N y los meridianos 87° 54" y 88° 23" de longitud Oeste en general, se encuentra formada de rocas sedimentarias marinas de carbonato y anhidritas, cuyo origen corresponde al Mioceno y Plioceno, ambos periodos pertenecientes al Cenozoico; por lo que como resultado, existe un franco predominio de calizas, con relieve cársico característico.

El clima de la región es de tipo AW (X') y AW2 (W'), que corresponde a cálido subhúmedo con lluvias en verano, según la clasificación climática de Koppen modificada por García (1973); la temperatura media anual oscila entre 25 y 27° C con una variación térmica < 5°C; la precipitación pluvial media es de 1249 mm anuales (INEGI, Cuaderno Estadístico Municipal de Othón P. Blanco, Quintana Roo, 1993). El periodo de lluvias comprende los meses de Mayo a Octubre, pero se presentan con más frecuencia e intensidad entre los meses de Junio a Septiembre.

El río Hondo es un límite natural fronterizo con el país de Belice y Centro América que comunica al mar Caribe, pasa a través de varios cayos. Considerado como el único río del estado, es en realidad una falla geológica, mide 160 Km. de largo con una anchura y profundidad promedio de 50 a 10 metros respectivamente. Este río se inicia en Guatemala con el nombre de río Azul, a la altura de Dos Bocas toma el nombre de río Hondo debido a un aumento de su profundidad y cauce. Los ríos San Román, arroyo Sabido y arroyo Chac, son los aportes más importantes al cauce del río Hondo, el arroyo Chac desemboca en la Bahía. Las corrientes que se manifiestan son originadas por la acción de los vientos alisios del este y sureste, con dirección dominante nornoreste, velocidad promedio de 3 m/s durante todo el año, por lo que la renovación y circulación de las aguas y sus nutrimentos se consideran lentas (SRE, 1998).

El Río Hondo es el más importante de la zona debido a que la porosidad del suelo en la Península de Yucatán no mantiene con facilidad el agua en la superficie y sólo la filtra hasta llegar al manto freático, lo cual crea corrientes subterráneas que desgastan los muros de piedra caliza en las cavernas y al desplomarse dan origen a los cenotes, históricamente la única fuente de agua dulce en la región (INEGI, 1998).

Es navegable desde el lugar llamado Lagunitas hasta su desembocadura en la Bahía de Chetumal, la vegetación en sus márgenes está compuesta de Manglar de las especies *Rizophora mangle* y *Conocarpus erectus* principalmente, además de comunidades vegetales de tasiste y selva mediana generalmente.

En el río Hondo se encuentran tres especies acuáticas en peligro de extinción: el manatí (*Trichechus manatus*), el lagarto (*Crocodylus moreletti*) y la nutria del río de la especie (*Lutra Longicaudis*), lo anterior de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-059 ECOL-1994.

En la ribera del río Hondo existen balnearios ejidales con uso recreativo con instalaciones mínimas, ubicados en Álvaro Obregón, Palmar, Ramonal y recientemente se inició el desarrollo que promueve el ecoturismo en la Unión, mismo que utiliza principalmente las paredes de los cenotes y las corrientes para Kayak así como caminos para recorridos en bicicleta a través de la selva.

METODOLOGIA

La toma de muestras se realizó en dos etapas; en época de secas (febrero) y lluvias (junio) del año 2005. Para la distribución de la red de estaciones de muestreo se consideraron lugares con poblados cercanos como criterios establecidos debido a descargas mínimas de aguas residuales domésticas. El tipo de muestreo utilizado fue el de sondeo.

El agua se recolectó en frascos de polipropileno, siguiendo el criterio propuesto por Word y Mearns (1979), previamente lavados con ácido nítrico diluido al 10%. Los frascos se etiquetaron y se conservaron adecuadamente. La toma de muestras de agua se realizó en la columna de agua a una profundidad de 30 cm., tomando 500 ml para su análisis.

Para la colecta de sedimentos se utilizó una draga Ekman con mensajero de acero inoxidable de 30 metros de línea, con capacidad para 2 kg de sólidos y se colocaron en bolsas de polietileno conservándose a 4° C para el transporte al laboratorio.

Para determinar el contenido de los metales pesados en agua y en sedimento se utilizó un equipo de Espectrometría de Absorción Atómica con Llama, para ello se empleó un espectrómetro de doble rayo Varian, modelo SpectrAA 220 con llama aire/acetileno y óxido nítrico/acetileno y generador de hidruros VGA 77. Para el análisis de los datos se utilizó un paquete estadístico incluido en el programa XLSTAT-Pro versión 7.5.3 1995-2005 Addinsoft.

El trabajo de campo consistió en dos recorridos de aproximadamente 15 km cada uno a lo largo del río Hondo, de acuerdo a las estaciones de muestreo seleccionadas, tomando en cada punto la posición geográfica con un navegador Gecko 201 Garmin y parámetros físico-químicos *in situ*. Para el pH se utilizó un medidor de pH portátil modelo HANNA HI 9214 de lectura digital a la centésima, con un electrodo combinado de vidrio-calomelano; la temperatura se registró con

un termómetro digital modelo HANNA HI 9143 graduado en décimas de grado Celsius, la conductividad se analizó con un conductímetro portátil modelo HANNA HI9635 en mS/cm con ajuste de temperatura; para el oxígeno disuelto se determinó con un oxímetro portátil modelo HANNA HI 9143 en mg/L. Los resultados de los parámetros físico-químicos se recogen en las tablas del anexo B para cada estación climática.

Durante el primer recorrido se seleccionaron seis sitios que cumplieran con criterios tales como profundidad (≥ 3 m), lugar de uso intensivo de agua del río para actividades de la comunidad, formador de ramal por cause desviado para la toma de muestras.

La red de muestreo seleccionada fue la siguiente: 1.- Poblado Álvaro Obregón (Ingenio), 2.- Sabidos, 3.- Sacxan, 4.-Juan Sarabia 5.- Santa Elena y 6.- Desembocadura del río Hondo (bahía de Chetumal).

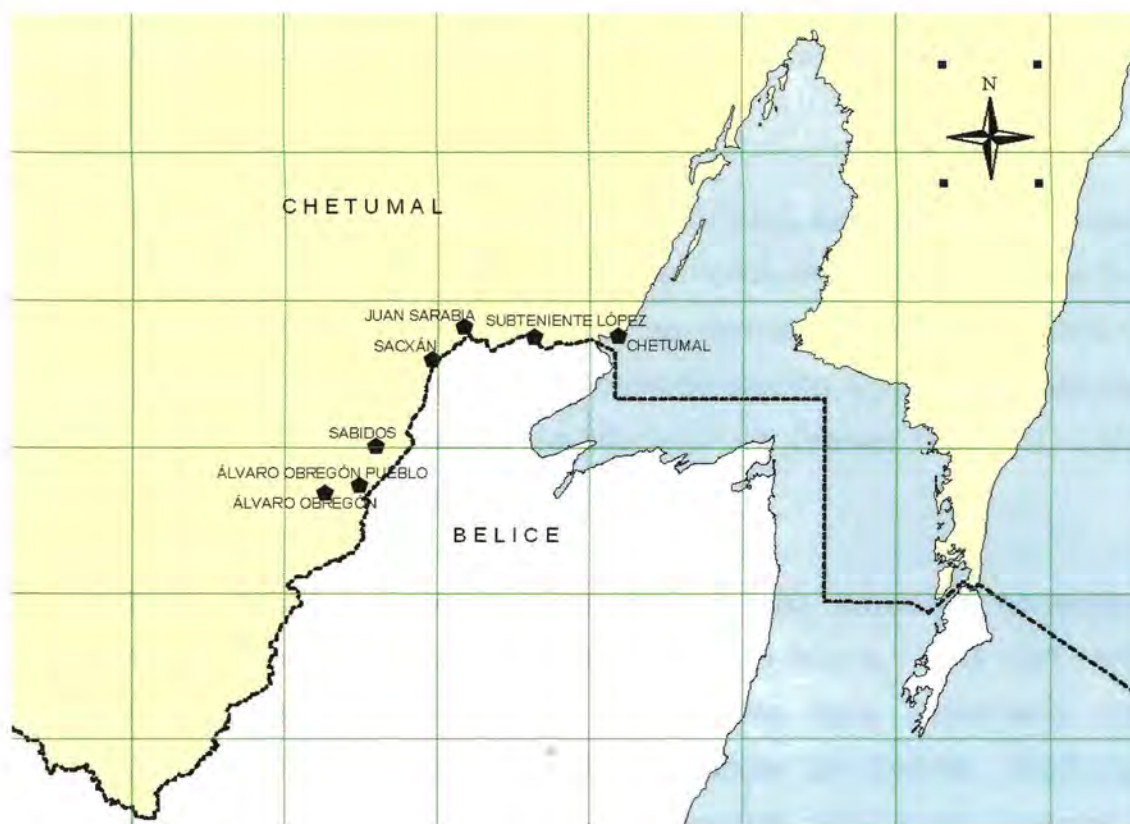


Fig.1 Diseño de las estaciones de muestreo en el río Hondo.

Preparación de muestras en el laboratorio

Las muestras de agua y sedimento se trasladaron al laboratorio en una hielera conservándose a 4° C, con la finalidad de evitar alteraciones químicas durante el muestreo y su análisis. Las muestras de agua se filtraron con membrana de acetato de celulosa de 0.41 μm para eliminar todo tipo de arenilla arcillosa y flora presente, después de la filtración se acidificaron con ácido nítrico al 5% (pH = 2) para evitar el intercambio iónico y precipitación de hidróxidos (Valiron, 1983).

Los sedimentos se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se digirieron (ISO-11466, 1994; Lester, 1987; Scheiner, *et al* 1989) y se analizaron. Para determinar la concentración pseudototal de los elementos estudiados en los sedimentos se aplicó el procedimiento descrito en la norma de la International

Organization for Standardization (ISO-11047, 1998), para su determinación por Espectrometría de Absorción Atómica con llama equipado a Generador de Hidruros.

Para la determinación de los metales pesados por EAA, se prepararon curvas de calibración distintas para cada uno de los elementos metálicos, conforme a su comportamiento químico y de acuerdo a las normas ya citadas (Anexo A). También se utilizaron las mismas proporciones de dilución, con el objeto de tener la misma matriz y evitar al máximo las interferencias (Varian 1999; ISO-11466, 1994).

Los reactivos utilizados para el tratamiento de las muestras consistieron básicamente en: ácido nítrico J. T. Baker, al 69 – 70 % y $d = 1.42 \text{ Kg/L}$, ácido Clorhídrico J. T. Baker, 36.5 – 38 %, Grado Instra, agua Tridestilada, Lote-Y24CO3 para la digestión de sedimentos; Estándar de Cadmio, 1000 ppm, Estándar de Plomo, 1000 ppm, Estándar de Mercurio, 1000 ppm, Estándar de Arsénico, 1000 ppm, Estándar de Zinc, 1000 ppm marca Solutions para la preparación de las muestras y las curvas de calibración para el análisis con el equipo de espectroscopia de absorción atómica (Anexo A).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados del análisis de sedimento para cada estación climática, se presentan en las tablas 1 y 2, destacando los complejos MO-Cd y MO-Pb que tienen correlación cercana a 1.0 y los metales Cd-Pb presentan una moderada correlación, lo que significa que normalmente se encuentran unidos. Por otro lado, las correlaciones menos acentuadas se dan para el CaCO_3 -Zn, lo que significa que gran parte de éste elemento químico no es de origen litogénico, podría ser de origen antropogénico.

En la temporada de lluvia, se observa una buena correlación Zn-Pb, CaCO_3 -Pb, lo que significa que estos metales se encuentran fuertemente unidos a la materia orgánica y carbonatos, para el caso de la MO-Hg presentan una correlación negativa, lo cual podría significar una unión débil del mercurio a la materia orgánica y ser biodisponible con facilidad. Para el análisis de sedimentos obtenidos en temporada de lluvia, no fue posible realizar el análisis de los metales As y Cd, debido a la pérdida de intensidad de las lámparas de cátodo hueco.

Tabla 1. Matriz de correlación en sedimentos en temporada seca.

MO	1.000					
CaCO_3	-0.133	1.000				
Cd	0.784	0.013	1.000			
Zn	0.488	0.592	0.296	1.000		
Pb	0.660	-0.461	0.634	-0.280	1.000	
As	-0.159	-0.041	0.381	-0.432	0.144	1.000
	MO	CaCO_3	Cd	Zn	Pb	As

En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa=0.050 (prueba bilateral)

MO = materia orgánica; CaCO_3 = carbonato de calcio

Tabla 2. Matriz de correlación en sedimentos en temporada lluvia.

MO	1.000				
CaCO ₃	-0.269	1.000			
Hg	-0.632	-0.456	1.000		
Zn	-0.408	0.517	0.129	1.000	
Pb	-0.387	0.805	-0.115	0.904	1.000
	MO	CaCO ₃	Hg	Zn	Pb

En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa=0.050 (prueba bilateral)

MO = materia orgánica; CaCO₃ = carbonato de calcio

En el caso de las muestras de agua, los parámetros que se relacionan se representan en la tabla 3 y 4 en temporada de seca y lluvia respectivamente. Existe una fuerte dependencia lineal negativa para los elementos Cd-Pb (tabla 3), lo que significa que no tienen la misma fuente de contaminación, en el caso de la matriz de correlación para el agua del río (tabla 4), se puede observar que existe una fuerte correlación negativa para los elementos Temp-Hg, Cond-Hg, donde podemos definir que no hay dependencia del mercurio con la temperatura y la conductividad. Existe también una fuerte correlación positiva en OD-Hg y pH-Hg, en este caso podemos decir que la disponibilidad del mercurio depende del oxígeno disuelto y de cualquier cambio en el pH.

Tabla 3. Matriz de correlación en muestras de agua en temporada seca.

Cond.	1.000				
Temp.	0.840	1.000			
OD	-0.443	-0.658	1.000		
pH	-0.703	-0.848	0.444	1.000	
Hg	-0.623	-0.890	0.744	0.761	1.000
	Cond.	Temp.	OD	pH	Hg

En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa=0.050 (prueba bilateral)

Cond. = conductividad en mS/ml; Temp. = temperatura en °C; OD = oxígeno disuelto en mg/L

Tabla 4: Matriz de correlación en muestras de agua en temporada lluvia.

Cond.	1.000						
Temp.	0.343	1.000					
OD	0.269	-0.058	1.000				
PH	-0.049	-0.743	0.215	1.000			
Cd	-0.627	0.137	0.234	-0.487	1.000		
Zn	-0.092	-0.197	0.167	-0.248	0.258	1.000	
Pb	0.389	-0.387	-0.382	0.416	-0.863	0.165	1.000
	Cond.	Temp.	OD	pH	Cd	Zn	Pb

En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa=0.050 (prueba bilateral)

Cond. = conductividad en mS/ml; Temp. = temperatura en °C; OD = oxígeno disuelto en mg/L

Análisis de componentes principales en sedimento y agua del río Hondo

Los resultados obtenidos del Análisis de Componentes Principales (ACP) para el río Hondo, se representan en las figuras 2, 3, 4 y 5. Para los sedimentos en temporada de seca y lluvia, y para agua en temporada de seca y lluvia, respectivamente.

El primer componente principal (figura 2), para sedimentos del río Hondo en temporada de seca, está definido por dos componentes con una varianza total de 74.83 %. El componente principal 1, está definido por el Cd, Zn, Pb, carbonato y materia orgánica con una varianza del 41.69 %. El segundo, está definido por el As, con una varianza del 33.14 % de correlación. Los vectores de éstos parámetros se desplazan en otra dirección respecto a los que definen al primer componente.

Con el análisis factorial de los componentes principales también se ha evaluado la relación que guardan los puntos de muestreo a lo largo del río respecto a los dos componentes principales.

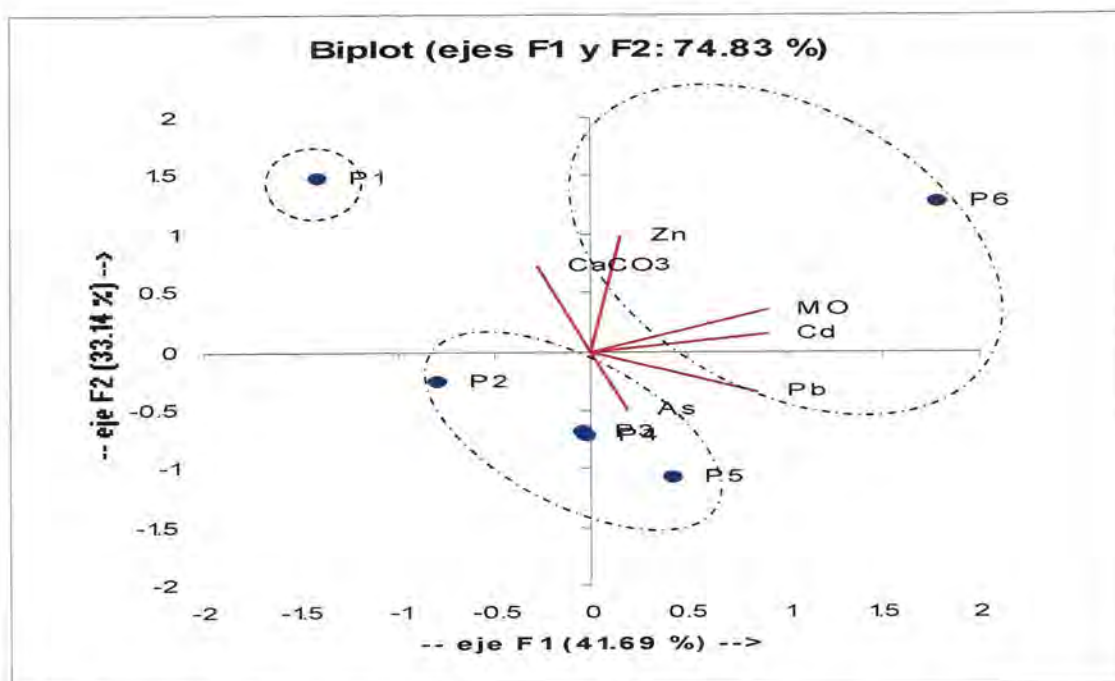


Figura 2. Análisis de Componentes Principales en muestras de sedimentos del río Hondo (CP-I 41.69% y CP-II 33.14% de varianza) en temporada de seca.

En primer término los metales Cd, Zn y Pb del grupo 1, está formado por los sedimentos del puntos de muestreo 6 (desembocadura del río Hondo). Estas muestras representan las concentraciones mas elevadas del metal Cd, Zn y Pb con respecto a los otros puntos. El segundo grupo está formado por los sedimentos de los puntos 2, 3, 4 y 5 (Sabidos, Sacxan, Juan Sarabia y Santa Elena). Las muestras de ésta zona, en general, presentan concentraciones más elevadas metal As. El tercer grupo está formado por el punto de muestreo 1 (Álvaro Obregón) en donde no se presentan parámetros analíticos.

Con respecto al ACP de los sedimentos en temporada de lluvias (figura 3), el primer componente principal para los sedimentos del río Hondo, está definido por dos componentes con una varianza total de 88.23 %. El componente principal 1, está definido por el Zn, Pb y los carbonatos, con una varianza del 54.36 %. El segundo componente principal está definido por el Hg, con una varianza del 33.87 % de correlación.

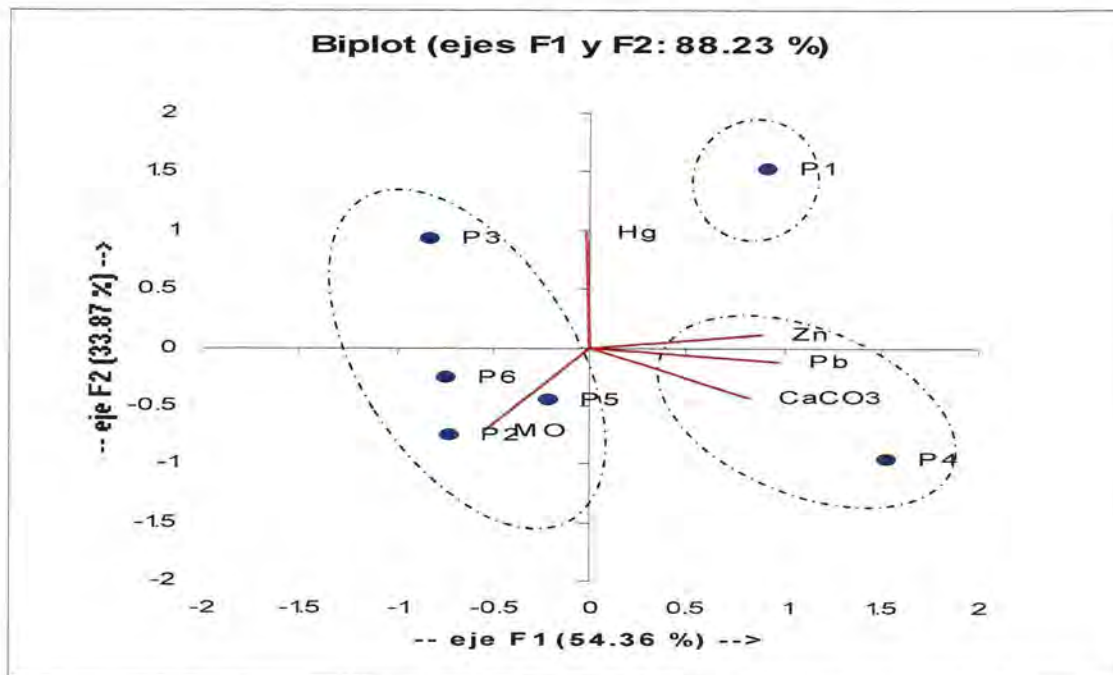


Figura 3. Análisis de Componentes Principales en muestras de sedimentos del río Hondo (CP-I 54.36% y CP-II 33.87% de varianza) en temporada de lluvia.

En primer término, el Zn, Pb y carbonatos del grupo 1, está formado por los sedimentos de la estación 4 (Juan Sarabia). Estos puntos representan las concentraciones más altas de zinc y plomo, lo contrario sucede con los carbonatos de esta zona. El segundo grupo está formado por los sedimentos del punto de muestreo 1 (Álvaro Obregón) cuyas concentraciones de Hg fueron más elevadas y van decreciendo hasta alcanzar el punto de muestreo 6. El tercer grupo definido, está integrado por los puntos de muestreo 2, 3, 5 y 6 (Sabidos, Sacxan, Santa Elena y desembocadura del río Hondo), éste punto de muestreo se relaciona solo con materia orgánica, donde se observa la concentración más elevada.

Para las muestras de agua en temporada de seca y lluvia, se ilustran las figuras 4 y 5. El primer componente principal (figura 4), para agua del río Hondo en temporada de seca, está definido por dos componentes con una varianza total de 63.02 %. El componente principal 1, está definido por el Cd, Zn y OD con una

varianza del 37.92 %. El segundo componente principal está definido por el Pb y Conductividad, con una varianza del 25.10 % negativamente correlacionados.

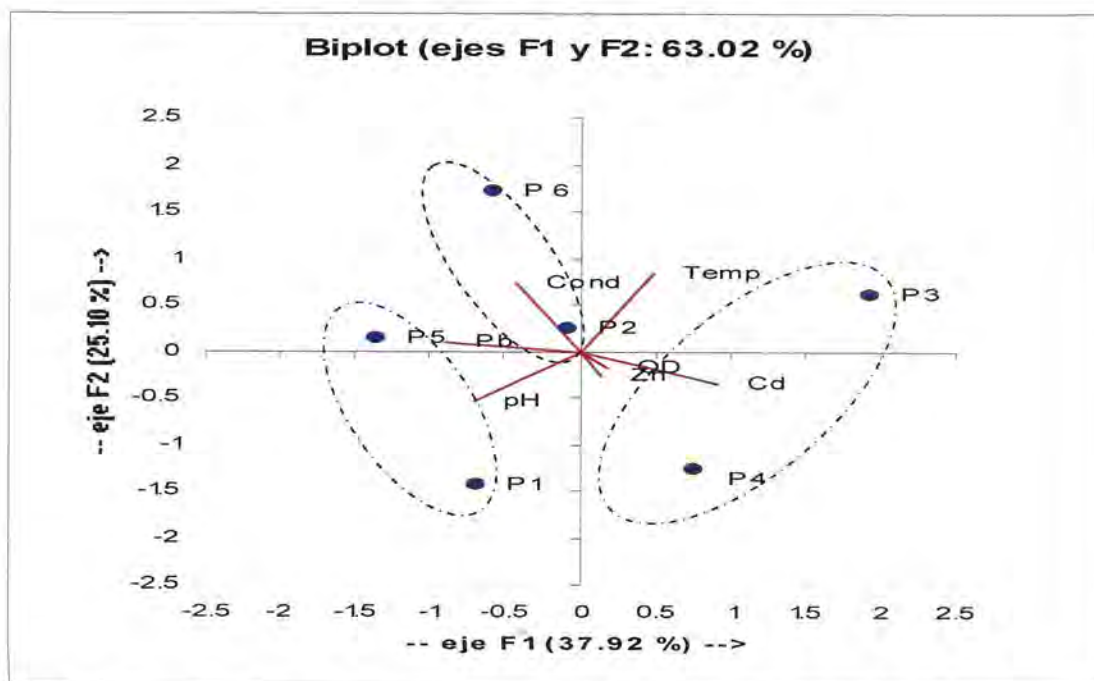


Figura 4. Análisis de Componentes Principales en muestras de agua del río Hondo (CP-I 37.92% y CP-II 25.10% de varianza) en temporada de seca.

En la figura 4, también se presenta el mapa de posición de los puntos de muestreo, con el objetivo de estudiar las relaciones que existen entre las diferentes zonas de estudio, con respecto al par de componentes principales CP1 – CP2. Éste mapa nos permite clasificar las muestras en tres grupos.

En primer término el grupo 1 está constituido por los sedimentos de los puntos de muestreo 3 y 4 (Sacxan y Juan Sarabia), presentando concentraciones mas elevadas de Cd y Zn con respecto a los otros puntos. El segundo grupo está formado por los sedimentos de los puntos 2 y 6 (Sabidos y desembocadura del río Hondo). Presentándose concentraciones más elevadas de conductividad especifica, lo que significa que hay más materia en suspensión y componentes electrolíticos disociados. El tercer grupo está formado por los puntos de muestreo

1 y 5 (Álvaro Obregón y Santa Elena), los cuales presentan concentraciones máximas de Pb y una ligera elevación del pH.

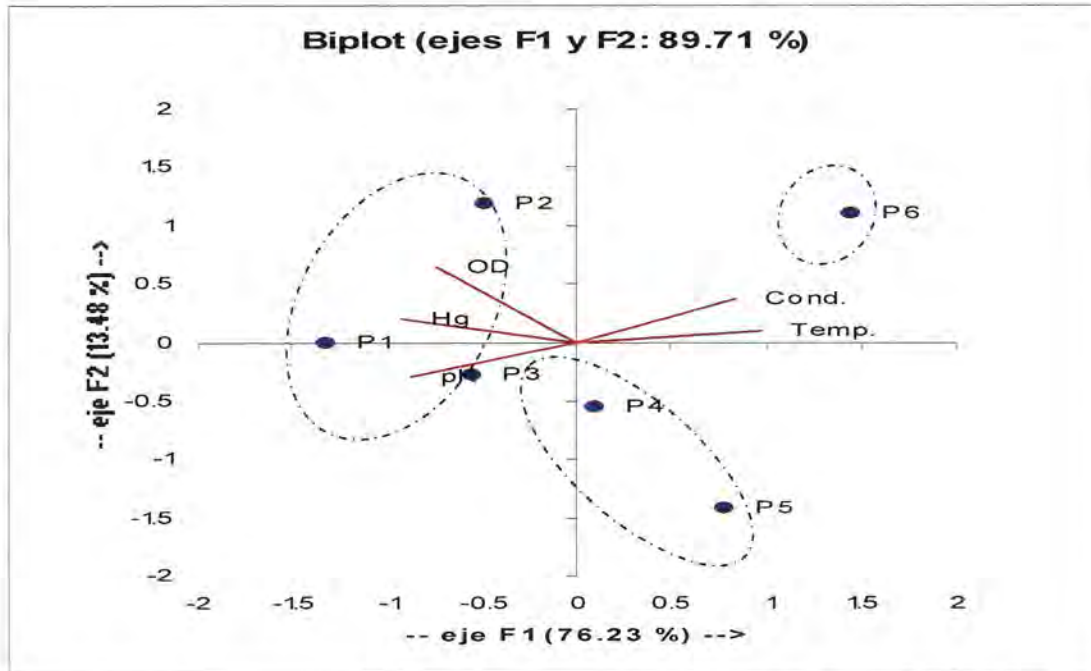


Figura 5. Análisis de Componentes Principales en agua del río Hondo (CP-I 76.23% y CP-II 13.48% de varianza) en temporada de lluvia.

Como se puede observar en la figura 5 para las muestras de agua del río Hondo en temporada de lluvia, está definido por dos componentes con una varianza total de 89.71 %. El componente principal 1, está definido por la conductividad y la temperatura, con una varianza del 76.23 %. El segundo componente principal está definido por el Hg y el oxígeno disuelto, con una varianza del 13.48 % negativamente correlacionados, los vectores de éstos dos parámetros se desplazan en otra dirección respecto a los que definen al primer componente.

Así mismo se presenta el mapa de posición de los puntos de muestreo (figura 5), con respecto al par de componentes principales CP1 – CP2. Como puede observarse éstos puntos se clasifican en tres grupos de la siguiente manera.

El grupo 1 está constituido por los sedimentos del punto de muestreo 6 (desembocadura del río Hondo). Esta zona se caracteriza por presentar los máximos valores en comparación con los otros puntos. El segundo grupo está formado por los sedimentos de los puntos 4 y 5 (Juan Sarabia y Santa Elena), caracterizándose por presentar baja concentración de metales. El tercer grupo está formado por los puntos de muestreo 1, 2 y 3 (Álvaro Obregón, Sabidos y Sacxan), presentando concentraciones máximas del metal Hg y de OD.

Componentes mayoritarios en los sedimentos del río Hondo

El análisis de componentes mayoritarios en los sedimentos, se llevó a cabo con el objetivo de realizar una caracterización litogénica de estos materiales a nivel del agua. Para este fin, se han analizado dos parámetros: los carbonatos y la materia orgánica. Cabe destacar que los componentes mayoritarios y los metales pesados en los sedimentos del río Hondo se han determinado por primera vez, no se dispone de bibliografía existente que haga referencia a otros trabajos. En las tablas 5 y 6 se muestran los resultados de materia orgánica y carbonatos de calcio en muestras de sedimento.

Carbonatos

Los resultados obtenidos de carbonatos en los sedimentos del río Hondo se muestran en las figuras 6 y 7, y en las tablas 5 y 6, en ellas se observa que los valores de este parámetro más elevados se localizan en la desembocadura del río Hondo en época de lluvias y seca respectivamente.

Es preciso indicar que los valores de carbonatos se encuentran localizados a la mitad de la red de muestreo. En general, los porcentajes de carbonatos se encuentran ligeramente elevados debido a la estructura geológica que presenta la península de Yucatán.

Materia orgánica

Los resultados obtenidos para la materia orgánica en sedimentos del río Hondo se presentan en las tablas 5 y 6, y figuras 6 y 7. En ellas se observan que las concentraciones más elevadas se presentan en el punto de muestreo 6 en la temporada de seca y en los puntos 2, 5 y 6 en la temporada de lluvia, este aumento de materia orgánica se justifica por los vertimientos que se producen procedentes de descargas de aguas residuales.

Las concentraciones mínimas de este parámetro se registran en los puntos de muestreo 1 y 2 en la temporada de seca.

Tabla 5. Parámetros físico-químicos en muestras de sedimentos en temporada de seca.

Puntos de muestreo	Materia Orgánica (%)	CaCO ₃ (%)
1	4.40	56.96
2	4.69	51.49
3	5.04	46.33
4	5.97	40.34
5	5.23	49.03
6	8.82	51.38

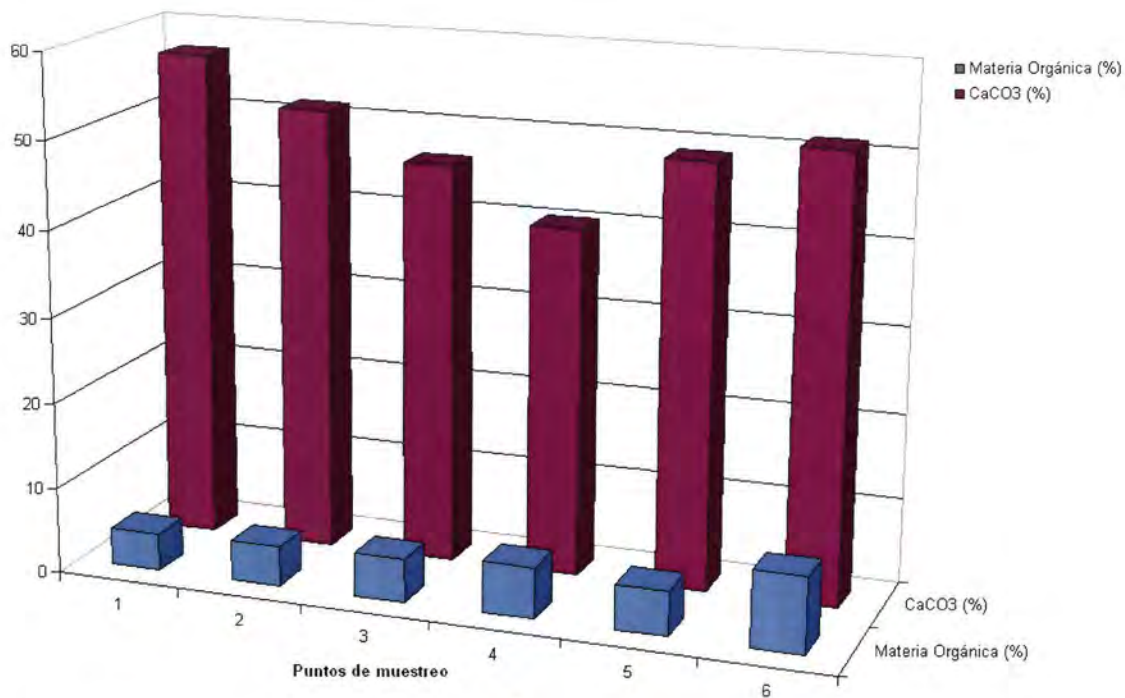


Figura 6. Distribución espacial y temporal de materia orgánica y carbonato de calcio en sedimentos del río Hondo en temporada de seca.

Tabla 6. Parámetros físico-químicos en muestras de sedimentos, en temporada de lluvia.

Puntos de muestreo	Materia Orgánica (%)	CaCO ₃ (%)
1	6.96	68.14
2	8.28	64.76
3	8.01	53.17
4	7.89	93.61
5	8.64	57.72
6	8.15	66.20

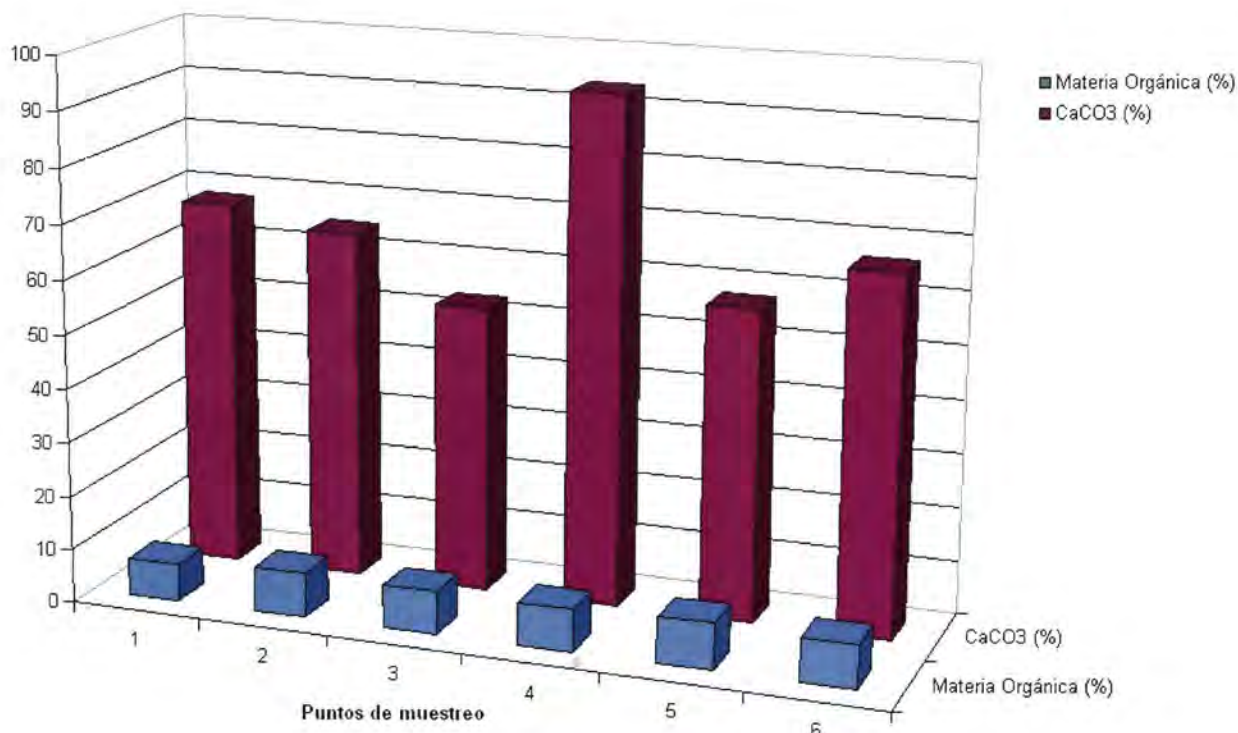


Figura 7. Distribución espacial y temporal de materia orgánica y carbonato de calcio en sedimentos del río Hondo en temporada de lluvia.

Parámetros físico-químicos en el agua del río Hondo

Temperatura

La temperatura del agua en ríos está en función de la época del año, el caudal, la situación de la zona de muestreo, la hora del día de su determinación y la profundidad del medio. El valor máximo permisible para este parámetro según la legislación es de 25°C. Las temperaturas registradas en los puntos de muestreo seleccionados del río Hondo en la temporada de seca se presentan en las tablas 7 y 8, y figuras 8 y 9. En estas se observan variaciones importantes de acuerdo a las temporadas; las temperaturas más elevadas se presentan en la temporada de

lluvia, debido a que la temperatura del ambiente es mayor en esta época del año. Sin embargo en la época de seca la temperatura descendió ligeramente, lo cual puede deberse a que el análisis se realizó en temporada de seca y de lluvia.

Conductividad

La conductividad en aguas naturales depende principalmente del tipo de terreno que atraviesa. Así, en terrenos fundamentalmente calizos suele ser superior a $1000\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en terrenos graníticos generalmente es menor de $500\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tebbutt, 1993).

No obstante, los efluentes procedentes de industrias y áreas urbanas incrementan notablemente este parámetro.

En las tablas 7 y 8, y figuras 8 y 9, se registran los valores de conductividad para los puntos de muestreo seleccionados. Se observa que en los puntos 5 y 6 en temporada de seca, se presentan los valores más elevados de conductividad y en los puntos 1 y 2 se presentan los valores más bajos de este parámetro.

En la temporada de lluvia, podemos observar que el punto 6 presentó una concentración ($15.5\text{ mS}/\text{mL}$) elevada, comparada con los demás puntos de muestreo; y el punto 1 presenta el valor más bajo de este parámetro ($1.52\text{ mS}/\text{mL}$).

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el agua es uno de los parámetros de mayor importancia en la evaluación de la contaminación, ya que estos niveles dependen de las actividades físicas, químicas y bioquímicas en un curso de agua. El oxígeno disuelto esta en función de la temperatura, la presión, la composición físico-química, la salinidad, la materia orgánica y caudal (Marín, 1996; Catalán *et al.*,

1997). Estos parámetros influyen sobre la solubilidad de los gases en el agua, también es necesario conocer el aumento o disminución de la actividad microbiana. Las aguas superficiales no contaminadas suelen estar bien oxigenadas, e incluso sobresaturadas con niveles de oxígeno disuelto superiores a 8 mg/L, factor necesario para que exista vida acuática en las aguas superficiales (Tebbutt, 1993).

Los niveles de oxígeno disuelto en el río Hondo se presentan en las tablas 7 y 8, y figuras 8 y 9, en ellas se pueden observar variaciones mínimas a lo largo de la red de muestreo en ambas épocas climáticas. Los valores mínimos de oxígeno se hallan en la época de lluvia en el punto 5 (2.90 mg/L), probablemente debido a las elevadas temperaturas de esta época. Mientras que los máximos valores se han medido en el punto 6 (3.80 mg/L) en la época de seca, debido probablemente a la baja temperatura en este muestreo. La concentración media de oxígeno disuelto en la época de seca es de 3.60 mg/L y en época de lluvia es de 3.15 mg/L.

pH

El pH es un parámetro importante en el agua. Un agua con $\text{pH} < 6$ es fuertemente corrosiva para los metales (Catalán, 1997). También pueden provocar reacciones de disolución de las sales presentes en las rocas (Marín, 1996). En lo que respecta a la contaminación antropogénica, el pH del agua varía debido a vertidos en particular (Catalán, L. *et al.*, 1997; Repetto y Mato, 1999).

Los valores de pH en el río Hondo se presentan en las tablas 7 y 8, y en las figuras 8 y 9. Estos oscilan entre 7.07 y 7.09 para la temporada de seca y para la temporada de lluvias los valores oscilan entre 6.5 y 7.30, para éstas zonas de muestreo. La disminución de pH en esta temporada se puede deber a la presencia de residuos industriales provenientes de la actividad propia de un ingenio azucarero y de las zonas destinadas a la agricultura.

Tabla 7: Parámetros físico-químicos en muestras de agua en temporada de seca.

Puntos de muestreo	Temperatura (°C)	Conductividad (mS/mL)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH
1	26.40	1.437	3.75	7.09
2	27.10	1.473	3.30	7.07
3	27.90	1.830	3.60	7.05
4	26.40	1.930	3.80	7.07
5	26.60	3.830	3.40	7.07
6	27.60	6.830	3.80	7.07

Tabla 8: Parámetros físico-químicos en muestras de agua en temporada de lluvia.

Puntos de muestreo	Temperatura (°C)	Conductividad (mS/mL)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH
1	30.60	1.5200	3.50	7.30
2	31.70	1.8700	3.60	6.70
3	31.10	1.7500	3.40	7.00
4	32.80	1.9300	3.30	6.90
5	33.10	5.1300	2.90	6.70
6	34.50	15.5000	3.20	6.50

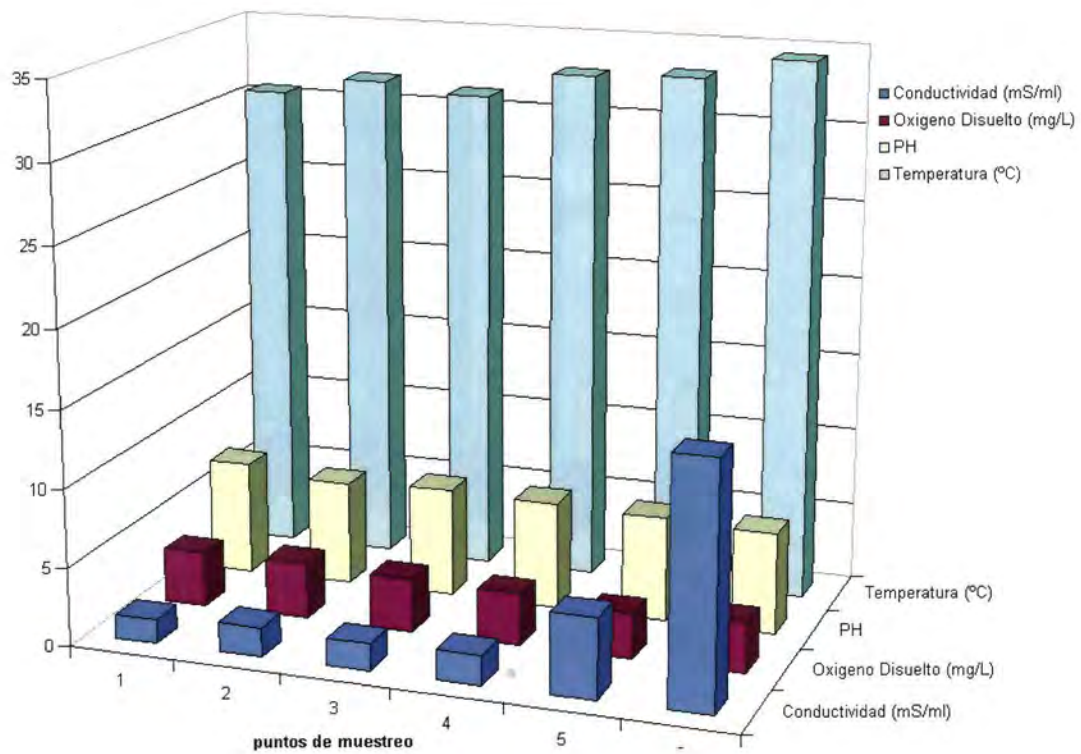


Figura 8. Distribución espacial y temporal de Temperatura, pH, OD y Conductividad en agua del río Hondo en temporada de seca.

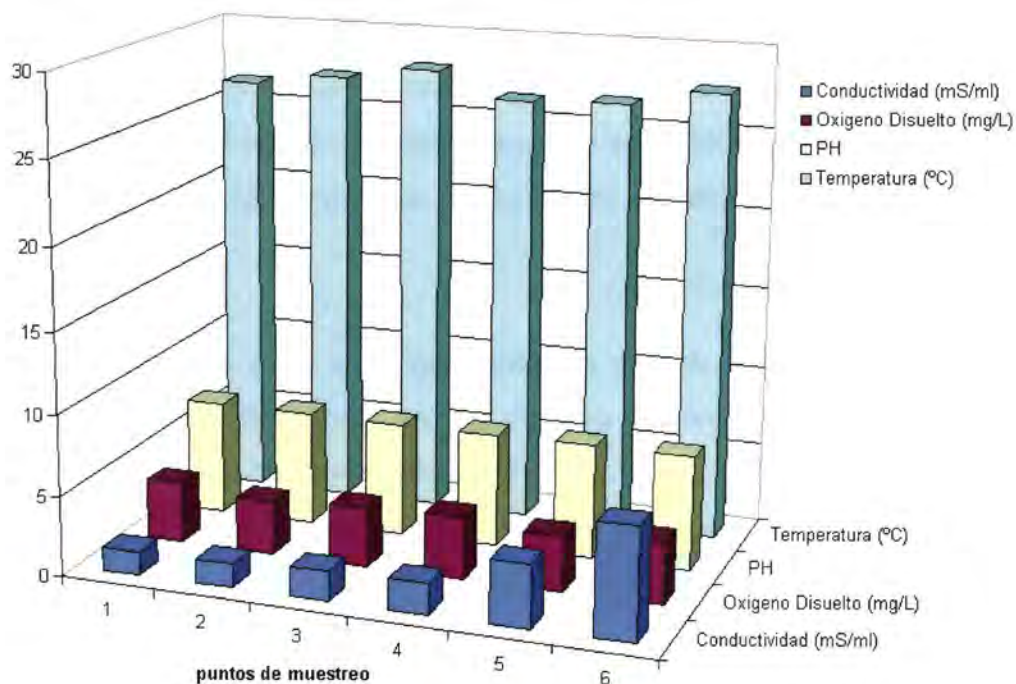


Figura 9. Distribución espacial y temporal de Temperatura, pH, OD y Conductividad en agua del río Hondo en temporada de lluvia.

Metales pesados en sedimentos y agua

Muchos investigadores coinciden que el 90% de la carga metálica de una corriente fluvial se halla en las partículas en suspensión del agua y en los sedimentos. Las partículas en agua, consisten principalmente en minerales de arcilla, óxidos e hidróxidos de hierro y magnesio, carbonatos, sustancias orgánicas (ácidos húmicos y fúlvicos) y materiales húmicos biológicos (algas y bacterias). La estabilidad de los metales pesados está ligada a estos compuestos, siendo factores decisivos para la movilidad y biodisponibilidad de los metales (Calmano *et al.*, 1993).

Arsénico

La concentración más elevada y más baja en muestras de sedimento se presenta en el punto 5 y en el punto 6 respectivamente en la temporada de seca (tabla 9 y 10). Con respecto a la temporada de lluvia, no se detectó ninguna concentración para éste elemento.

Las concentraciones para este elemento en muestras de agua estuvieron por debajo del límite de detección. No se detectó el arsénico para las muestras de agua en la temporada de lluvia (tablas 11 y 12).

Cadmio

Por ser una zona con ausencia de industrias los valores de concentración podrían ser de origen litogénico. Los niveles máximos de cadmio se obtienen en los puntos de muestreo 3, 5 y 6, en temporada de seca (tabla 9 y figura 10). Por otro lado, los niveles de concentración del cadmio, también pueden estar influenciadas por uso de fertilizantes fosfatados en la agricultura (cultivo de la caña), bien sabemos que la actividad agrícola constituye una fuente importante de contaminación de los sistemas acuáticos. Los niveles de concentración del cadmio tienden a crecer a partir del punto de muestreo 1 hasta el 6. Los valores mínimos de cadmio se hallan en los puntos de muestreo 1 y 2 en temporada de seca (tabla 9).

Para el caso del segundo muestreo en la temporada de lluvia, no fue posible efectuar éste análisis, debido a que la lámpara de cátodo hueco utilizable para esta determinación, no mantuvo su porcentaje de intensidad y por lo tanto no fue detectada por el instrumento analítico.

Los valores de concentración oscilan entre 4.89 y 13.83 mg/L y los niveles máximos de cadmio se obtienen en los puntos de muestreo 3 y 4 (13.83 y 13.23 mg/L) en temporada de seca (tabla 11). Los valores mínimos de cadmio se

localizan en los puntos de muestreo 5 y 6 (4.89 y 5.18 mg/L) en temporada de seca.

Estos niveles también pueden estar influenciadas por uso de fertilizantes fosfatados en la agricultura (cultivo de la caña), bien sabemos que la actividad agrícola constituye una fuente de contaminación de los sistemas acuáticos. Para el segundo muestreo en la temporada de lluvia, no fue posible efectuar éste análisis por razones ya explicadas.

Mercurio

Los niveles mínimos de concentración de mercurio en muestras de sedimento se presentan en los puntos de muestreo del 1 al 5, donde queda por debajo del límite de detección. No obstante, la concentración máxima de mercurio la podemos observar en el punto de muestreo 6, en la temporada de seca (tabla 9). En general, los valores de mercurio se pueden considerar inferiores al nivel de referencia.

Con respecto a los valores de mercurio en muestras de sedimentos en la temporada de lluvia, se observa que los puntos de muestreo 2 y 4 presentan los niveles de concentración más bajos que los otros puntos de muestreo (tabla 10). Así como registrando las concentraciones más altas en los puntos 1, 3, 5 y 6. Los niveles de este metal sufren un ligero aumento, ello podría ser atribuible a las lluvias torrenciales caídas es ésta estación del año, con un arrastre importante de residuales agroquímicos provenientes de la zona cañera de la ribera del río Hondo.

Los niveles mínimos de concentración de mercurio en muestras de agua se presentan en los puntos de muestreo 4, 5 y 6 (6.50, 6.30 y 5.50 mg/L). La concentración máxima de mercurio se puede observar en el punto de muestreo 1, 2 y 3 (11.90, 9.70 y 8.30 mg/L), en la temporada de lluvia (tabla 12). Con respecto

a los valores de mercurio en la temporada de seca, podemos ver que todos los puntos de muestreo están por debajo del límite de detección.

Zinc

En las muestras de sedimento, los valores de zinc más elevados se detectaron en los puntos 1 y 6. Así mismo se observa que en los puntos 2 y 5 (10.50 y 4.35 mg/L) se presentaron los valores mínimos en concentración (tabla 9). En el caso del segundo muestreo en temporada de lluvia, los valores oscilaron entre 5.23 y 14.46 mg/L, resultando valores más bajos en los puntos 2 y 6 y los valores más altos de zinc se presentaron en los puntos de muestreo 1 y 4 (tabla 10). Esto es posible conocer a mayor profundidad a través de una especiación química de los metales y así conocer a que fase mineralógica se encuentra unida.

En las muestras de agua es posible observar que en la temporada de seca se presentaron los valores de zinc más elevados comparado con los valores detectados en la época de lluvia. Las concentraciones de zinc en la temporada de seca oscilan entre 6.83 y 10.85 mg/L (tabla 11). En el caso de la temporada de lluvia, se puede observar que los valores están por debajo de los límites de detección (tabla 12). Las concentraciones de zinc pueden deberse a las aguas residuales domésticas y a las deyecciones de animales (granjas) que vierten directamente al río sin saneamiento. No obstante una parte de la concentración de zinc puede ser de origen litogénico.

Plomo

En general, los valores de concentración para el plomo en la temporada de seca, presentaron valores muy semejantes y elevados oscilando entre 12.00 y 17.21 mg/L (tabla 9). Mientras que en temporada de lluvia los valores oscilaron entre 0.15 y 1.15 mg/L, donde se registraron las concentraciones más bajas e incluso

que en la temporada de seca, pudiera deberse a la dilución por las lluvias torrenciales (tabla 10).

El plomo en los sistemas pluviales tiene su origen en las aguas residuales domésticas y en el uso de combustibles fósiles que transportados por la atmósfera se depositan en los cuerpos de agua y posteriormente pasan a los sedimentos, ya sea por precipitación o por fenómenos de adsorción a la materia particulada (Usero *et al.*, 1997).

En las muestras de agua, el plomo presentó valores más elevados en la temporada de seca que en la temporada de lluvia, en general, los valores de concentración para el plomo en la temporada de seca, presentaron concentraciones muy semejantes y ligeramente elevadas oscilando entre 3.15 y 12.10 mg/L (tabla 11). Lo contrario sucedió en la temporada de lluvia, los valores para el plomo se mantuvieron por debajo del límite de detección (tabla 12).

Tabla 9. Concentraciones medias de los metales pesados en sedimentos del río Hondo en temporada de seca.

Puntos de muestreo	As	Cd	Hg	Zn	Pb
1	0.456	3.470	<0.002	57.130	12.000
2	0.498	2.830	<0.002	10.500	15.310
3	0.783	4.360	<0.002	6.633	16.120
4	0.764	3.710	<0.002	16.200	15.170
5	17.549	5.740	<0.002	4.350	15.800
6	0.174	6.870	0.917	60.066	17.210

Tabla 10. Concentraciones medias de los metales pesados en sedimentos del río Hondo en temporada de lluvia.

Puntos de muestreo	As	Cd	Hg	Zn	Pb
1	NR	ND	4.600	0.141	0.750
2	NR	ND	2.900	0.052	0.260
3	NR	ND	4.500	0.065	0.220
4	NR	ND	3.000	0.144	1.150
5	NR	ND	3.400	0.126	0.540
6	NR	ND	3.400	0.055	0.150

NR: no realizado; ND: no detectable

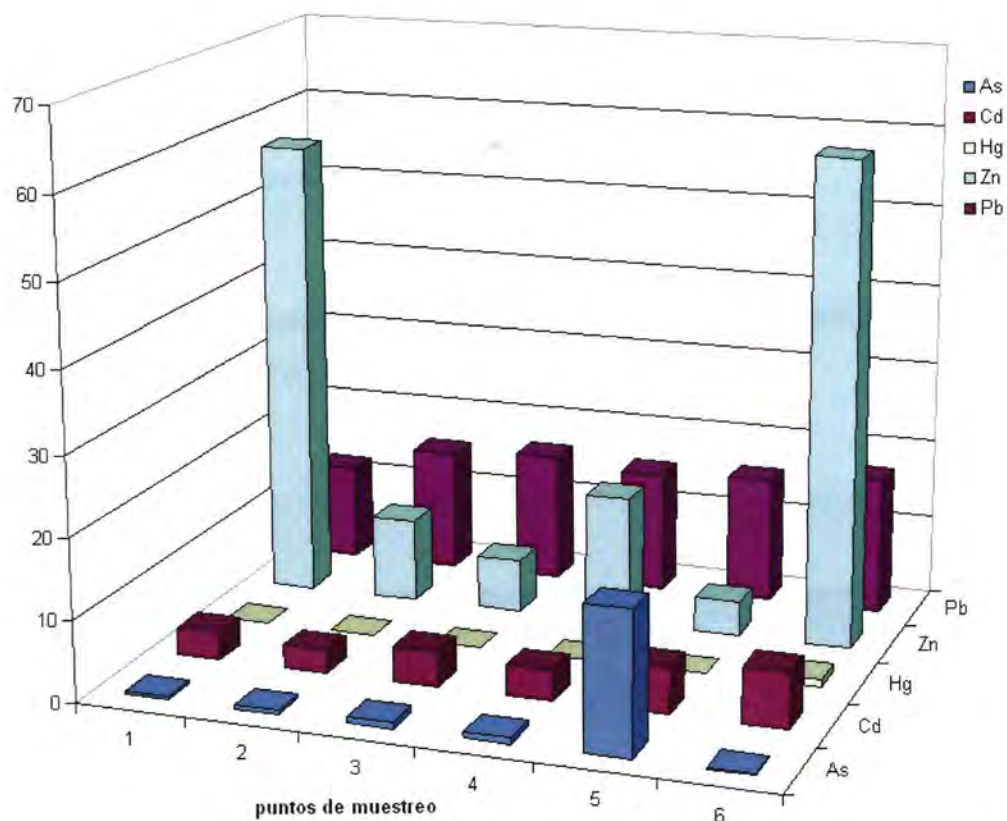


Figura 10. Distribución espacial y temporal de los metales pesados en sedimentos del río Hondo en temporada de seca.

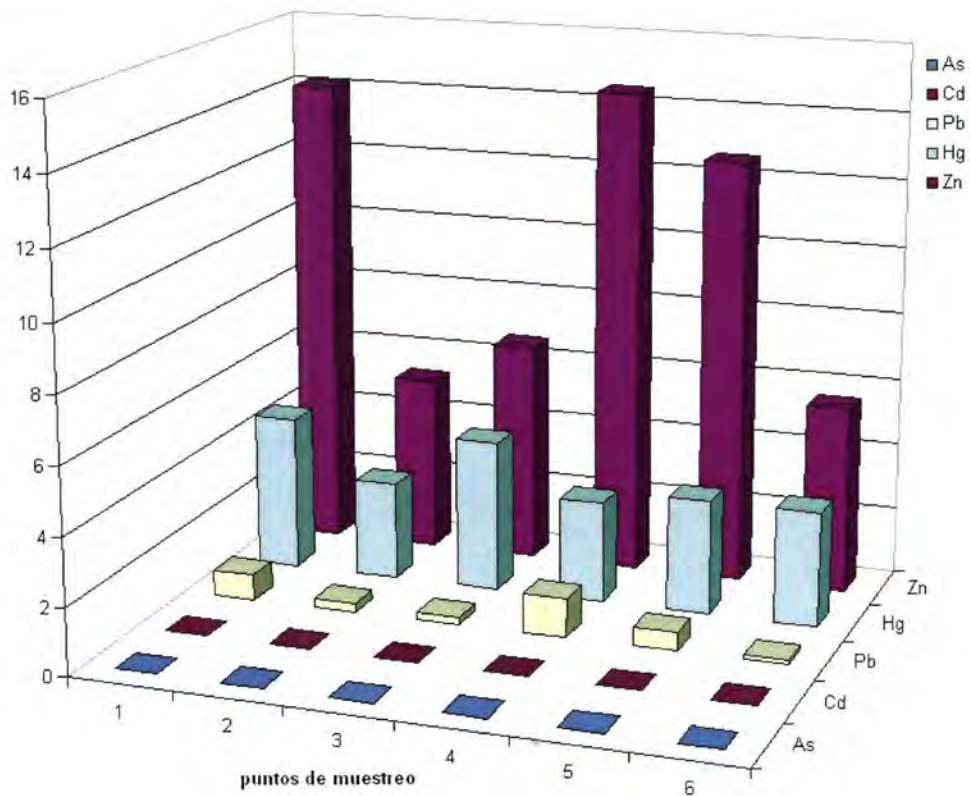


Figura 11. Distribución espacial y temporal de los metales pesados en sedimentos del río Hondo en temporada de lluvia.

Tabla 11. Concentración media de los metales pesados en agua del río Hondo en temporada de seca.

puntos de muestreo	As	Cd	Hg	Zn	Pb
1	<0.001	8	0.002	9.96	7.2
2	<0.001	8.3	0.002	6.83	6.21
3	<0.001	13.83	0.002	11.5	3.15
4	<0.001	13.23	0.002	10.85	4.1
5	<0.001	4.89	0.002	12.2	12.1
6	<0.001	5.18	0.002	8.43	7.12

Tabla 12. Concentración media de los metales pesados en agua del río Hondo en temporada de lluvia.

puntos de muestreo	As	Cd	Hg	Zn	Pb
1	NR	ND	11.9	<0.0017	<0.01
2	NR	ND	9.7	<0.001	<0.01
3	NR	ND	8.3	<0.001	<0.01
4	NR	ND	6.5	<0.001	<0.01
5	NR	ND	6.3	<0.001	<0.01
6	NR	ND	5.5	<0.001	<0.01

NR: no realizado; ND: no detectable

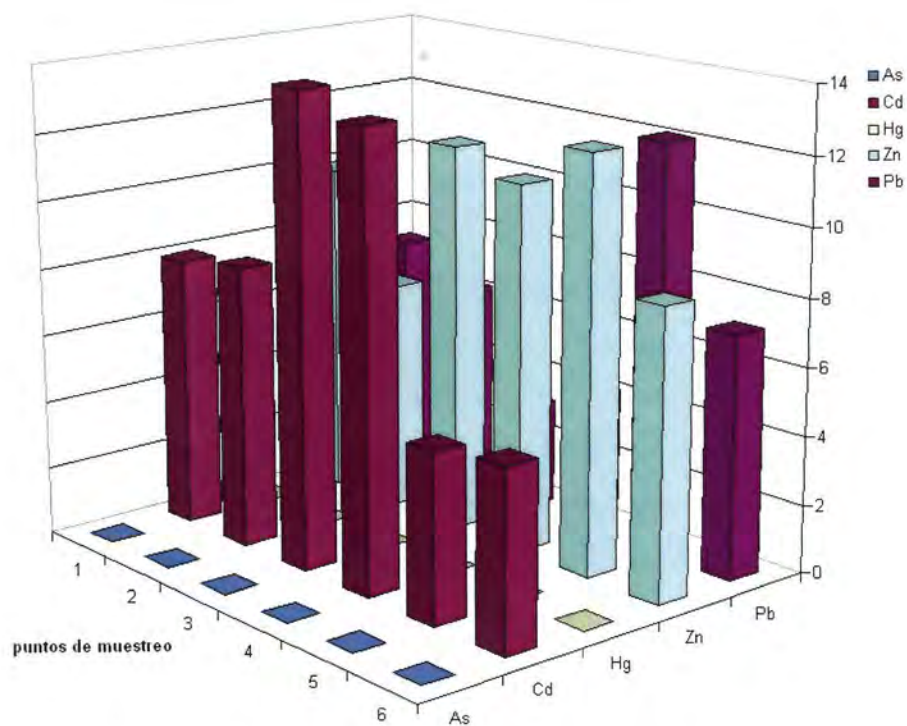


Figura 12. Distribución espacial y temporal de los metales pesados en agua del río Hondo en temporada de seca.

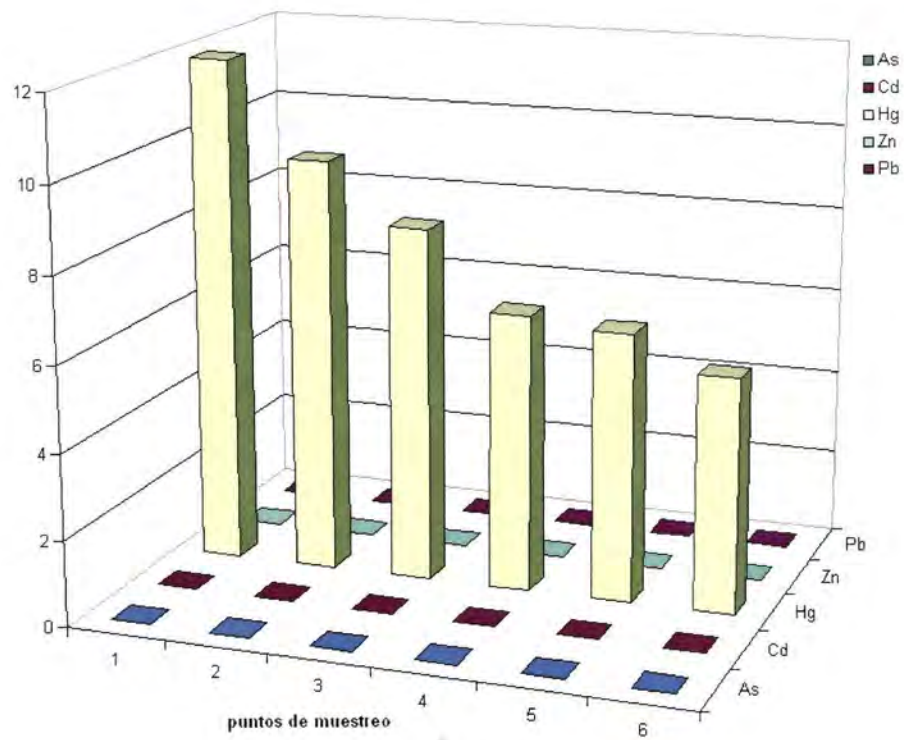


Figura 13. Distribución espacial y temporal de los metales pesados en agua del río Hondo en temporada de lluvia.

CONCLUSIONES

Este estudio realizado en 6 estaciones de muestreo en el río Hondo permite por primera vez tener un conocimiento en cuanto a la concentración pseudototal de metales pesados (Cd, Pb, Hg, As, Zn) en sedimento y en la columna de agua. A su vez aporta conocimientos como la composición elemental y estructural de los sedimentos del río, lo cual es de importancia para el conocimiento en lo que se refiere a contaminación inorgánica de esta fuente fluvial.

Los sedimentos del río Hondo presentan un elevado contenido de carbonatos y se encuentran correlacionados con el Pb. Por el contrario, la materia orgánica no presenta mucha variación con respecto a los demás puntos de muestreo a excepción del punto de muestreo localizado en el poblado de Álvaro Obregón.

Se detectó una correlación significativa del mercurio con la materia orgánica, concluyendo que el Hg está débilmente ligado a la materia orgánica que con un ligero de pH o temperatura cambio podrían ser biodisponibles.

La temperatura se encuentra en un nivel óptimo para la protección de la vida acuática que se localiza en el área de estudio. Los valores registrados para el pH, se consideran en un intervalo aceptable. Los valores obtenidos de metales pesados tanto en sedimento como en agua del río Hondo posiblemente sean de origen antropogénico debido a las descargas mínimas de aguas debido a los diversos usos y actividades que la población realiza en el mismo como es el lavado de ropa y utensilios de cocina; así mismo las concentraciones pseudototales pudieran ser de origen litogénico. Para ello sería conveniente realizar un análisis de extracción secuencial para conocer de manera más precisa el origen de los metales pesados. Así, es posible concluir que el estado de contaminación por metales pesados en el río Hondo se encuentra en un nivel bajo, y no representa un riesgo para la comunidad en el desarrollo de las actividades para las que se destina el agua del río.

Es muy probable que la contaminación por metales pesados provenga de las fuentes emisoras de los ingenios del país de Belice y México ubicados en la ribera del río Hondo, así como el uso de plaguicidas de fertilizantes en la zona cañera de la propia ribera, también, las descargas de aguas residuales a diferentes puntos del río

Este trabajo contribuye a la planeación y toma de decisiones en lo que refiere a acuerdos binacionales de fronteras con el fin de incluir programas de monitoreo continuo y evaluaciones sobre la condición de esta zona.

BIBLIOGRAFIA

- Adams, W., Kimberle, R.A., Barnet, J.W. (1992) sediment quality and aquatic life assessment. *Environment science technology*, 321 pp.
- Al-Shukry, R. (1993). "Détermination de la pollution des sédiments d'un tour d'eau par les métaux lourds (Cu, Zn, Cd, Pb, Ni). Etude de leur accumulation et de leur relargage: rôle du pH, de la température et de la composition du sédiment", Ph.D. Thesis, University of Limoges, France, 133 pp.
- Apha-Awwa-Wpcf, (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, Madrid, España. 2-1, 2-20.
- Athié, Lambarri, M. (1987). *Calidad y Cantidad del Agua en México*. Ed. Fundación Universo Veintiuno, DHTA-SARH, 152 pp., México.
- Back W., Hanshaw, B. (1974). Hydrogeochemistry of the Northern of the Yucatan Peninsula, Mexico with a section on Mayan Water Practices. Field Seminar and Carbonate Rocks of the Yucatan Peninsula, Mexico. USA: New Orleans Geological Society; 53-54.
- Baird, C., (2001). *Química ambiental*. Ed. Reverté. Barcelona España, 622 pp.
- Bordas, F and Bourg, A. (2001) Effect of solid/liquid ratio on the remobilization of Cu, Pb, Cd and Zn from polluted river sediments. *Water, air and soil pollution*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 128 pp.
- Calmano, W., Hong, J., Förstner, U. (1993). Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. *Water science technology editors*, 228 pp.
- Catalan L., J (1997). Contaminación física de las aguas. En *contaminación e Ingeniería Ambiental*, III.5 Ed. FICYT Oviedo pp. 131-151
- Chavira, M., Briseño, J., Negroe A., Pérez, J., Sánchez T. y Hoil R. (1992) Diagnostico de la calidad del agua en la Bahía de Chetumal, Q. Roo. *Avacient*: 3: 16-31
- Clarke K. R. y Green, R. H. (1988). Statistical design and analysis for a biological effects study. *Mar Ecol. Prog. Ser.* 46: 213-226.
- Chen, W. (1996). Distribution, Fraccional composition and release of sediment bound heavy metals in tropical reservoirs. *Water, air, and soil pollution*, 235 pp.

-
- Colas, R (1972). La pollution des eaux, Que sais-je?, Presses Universitaires de France. 4^a ed. 128 pp, Francia.
 - Fawcett, H. (1988). Hazardous and Toxic Material. Safe Handling and Disposal, Ed. John Wiley & Sons, 2a ed. 514 pp. EUA.
 - Förstner U., Wittmann G., (1981). Metal pollution in the aquatic environment. Berlin, 2nd.Ed. Springer-Verlag, Heidelberg, 112 pp.
 - Förstner, U. Calmano, W., Hong, J., (1987). Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. Water science technology Editions. 256 pp.
 - Förstner I., Gurnell, a., Webb, B., (1995). Sediment and water quality in river Catchments. Ed. John Wiley & Sons, 350 pp.
 - García, (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM 1^a Ed. México, México, D. F. 246 pp.
 - INEGI, 1998. Carta de aguas superficiales 1:50 000, Chetumal. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
 - INEGI, 1993. Cuaderno Estadístico Municipal de Othón P. Blanco, Quintana Roo.
 - International Standard Soil Quality, ISO 11047 (1998). Determination of Cadmium, Chromium, Cobalt, Copper, Lead, Manganese, Nickel, and Zinc in Aqua Regia Extracts of Soil – Flame and Electrothermal Atomic Absorption Spectrometric Methods.
 - Soil Quality, ISO 11466 (1994). Extraction of traces metals soluble in Aqua Regia.
 - Jiménez, B. (2002). La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada. Ed. Limusa, México, D.F. 925 pp.
 - Lester J.N. (1987) Heavy Metals in wastewater and sludge Treatment Processes, Vol. I, Sources, Analysis and Legislation, Ed. CRC Press, 183 pp., EUA.
 - Lilia A., (1990). Curso Básico de Toxicología Ambiental, 311 pp.
 - Ma, L.Q., Tan, F., Harris, W.G. (1997) Concentrations And Distributions Of Eleven Metals In Florida Soils. Published In Journal Environment Quality, 775 pp.

-
- Marín, R., (1996). Análisis de las aguas y ensayos de tratamiento. Ed. PACMER, S.A. Barcelona. 225 pp.
 - Ortíz, M. C. Y Sáenz, R. M. (1995). Plaguicidas organoclorados. Estudio Emergente sobre la mortalidad de bagres en la Bahía de Chetumal, El Colegio de la Frontera sur, Chetumal, 72 pp.
 - Polo, C. (2000). Estadística Multivariable Aplicada. Ed. EPOP Terrasa,
 - Prusty, B.G., Sahu, K.C., Godgul, G. (1994) Metal contamination due to mining and milling activities at the Zawar zinc mine, Rajasthan, India. I. Contamination of stream sediments. *Chemical Geology* 112, 275-291.
 - Repetto, E., Mato, M. (1999). El agua, una sustancia diferente e indispensable. Ed. Taravilla, Madrid, 355 pp.
 - Rojas, A. y Morales, B., (2002) Metales en hueso y sangre de manatíes (*Trichechus manatus manatus*) de la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México. *Contribución de la ciencia MIC*. 133-138.
 - Rosental, R. et al., (1996). Trace metal distribution in different fractions of nearshore marine sediments. *Coast Shelf Science*, 305 pp.
 - Salazar-Vallejo, S. I. y González E. (1993). Biodiversidad Marina y Costera de México. Centro de Investigaciones de Quintana Roo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Aprovechamiento de la Biodiversidad (CONABIO). México, 698-699 pp.
 - Salazar-Vallejo, S. I., Jiménez-Cueto, S., Oliva-Rivera, J. J. y González E. (1991) Fauna Béntica in: Camarena-Luhrs. T y Salazar-Vallejo Estudios Ecológicos preliminares de la zona sur de Quintana Roo. Centro de Investigaciones de Quintana Roo, México. Dirección de Investigación Científica, 231 pp.
 - Salomons W., Förstner U., (1982). Trace Metals Analysis on polluted sediments. *Environment Technology Letters*, 368 pp.
 - Scheiner, B.J., Doyle, F.M. & Kawatra, S.K. (1989). *Biotechnology in Minerals and Metal processing*. Society of Mining Engineers Inc., Littleton Company 209 pp.
 - Shen Hsie Wen (1973). *Environmental Impact on Rivers (River Mechanics III)* Ed. Fort Collins, EUA.
 - SRE, 1998. Acuerdo Binacional México-Belice. Secretaría de Relaciones Exteriores. México, D.F. (www.sre.org/acuerdos-internacionales).

-
- Tebbut, H. (1993). Fundamentos de control de la calidad del agua. Ed. Limusa 239 pp. México.
 - Usero, J., Morillo, J., Gracia, I. (1997) Contaminación por Metales en sedimentos Acuáticos. Tecnología Del Agua 166 pp.
 - Valiron F. (1983). La réutilisation des eaux useés. Technique et Documentation. 208 pp., Francia.
 - Word, J. and Mearns, A. (1979). 60-meter survey control off southern California. Southern California Coastal Water Research project. T.M. No. 229.pp.

ANEXO A

**ANEXO A. PREPARACIÓN DE ESTÁNDARES PARA EL ANÁLISIS DE
PLOMO, CADMIO, MERCURIO, ARSÉNICO Y ZINC CON ESPECTROSCOPIA
DE ABSORCIÓN ATÓMICA.**

Tabla I. Plomo (Varian, 1999).

ADICIÓN	ESTANDAR μL	SOLVENTE ml	MATRIZ μL (HNO_3 , 5%)	CONCENTRACIÓN mg/L
Blanco	0	100	5	0
1	2.5	100	5	2.5
2	5.0	100	5	5.0
3	10.0	100	5	10.0
Muestra	---	100	5	---

Tabla II. Parámetros Instrumentales para análisis del Plomo (Varian, 1999).

Parámetros Instrumentales	
Longitud de Onda	217 nm
Método	Concentración
Flujo de aire	3.5
Flujo de combustible	1.5
Corrección de fondo	Si

Tabla III. Cadmio (Varian, 1999).

ADICIÓN	ESTANDAR μL	SOLVENTE ml	MATRIZ μL (HNO_3 , 5%)	CONCENTRACIÓN mg/L
Blanco	0	100	5	0
1	10	100	5	10
2	20	100	5	20
3	40	100	5	40
Muestra	---	100	5	---

Tabla IV. Parámetros Instrumentales para análisis del Cadmio (Varian, 1999).

Parámetros Instrumentales	
Longitud de Onda	228.8 nm
Método	Concentración
Flujo de aire	3.5
Flujo de combustible	4.5
Corrección de fondo	si

Tabla V. Mercurio (Varian, 1999).

ADICIÓN	ESTANDAR μL	SOLVENTE mL	MATRIZ μl (HNO_3 , 5%)	CONCENTRACIÓN mg/L
Blanco	0	100	5	0
1	35	100	5	35
2	70	100	5	70
3	140	100	5	140
Muestra	---	100	5	---

Tabla VI. Parámetros Instrumentales para análisis del Mercurio (Varian, 1999).

Parámetros Instrumentales	
Longitud de Onda	253.7 nm
Método	Concentración
Flujo de aire	10.00
Flujo de combustible	2.00
Corrección de fondo	Si

Tabla VII. Arsénico (Varian, 1999).

ADICIÓN	ESTANDAR μL	SOLVENTE mL	MATRIZ μl (HNO_3 , 5%)	CONCENTRACIÓN mg/L
Blanco	0	100	5	0
1	10	100	5	10
2	20	100	5	20
3	40	100	5	40
Muestra	---	100	5	---

Tabla VIII. Parámetros Instrumentales para el análisis del Arsénico (Varian, 1999).

Parámetros Instrumentales	
Longitud de Onda	193.7 nm
Método	Concentración
Flujo de aire	10.00
Flujo de combustible	2.45
Corrección de fondo	Si

Tabla IX. Zinc (Varian, 1999).

ADICIÓN	ESTANDAR μL	SOLVENTE mL	MATRIZ μl (HNO_3 , 5%)	CONCENTRACIÓN mg/L
Blanco	0	100	5	0
1	0.100	100	5	0.100
2	0.200	100	5	0.200
3	0.400	100	5	0.400
Muestra	---	100	5	---

Tabla X. Parámetros Instrumentales del Zinc (Varian, 1999).

Parámetros Instrumentales	
Longitud de Onda	213.9 nm
Método	Concentración
Flujo de aire	10.0
Flujo de combustible	2.0
Corrección de fondo	Si

ANEXO B

Tabla B.1. Resultados obtenidos en las muestras de agua y sedimento en la temporada de seca (Febrero de 2005).

Punto de muestreo y localización geográfica		PARAMETROS				As		Cd		Hg		Zn		Pb		Materia Orgánica (%)	Carbonatos (%)
		Conductividad (µS)	Temperatura (°C)	pH	Oxígeno disuelto	Agua	Sedimento	Agua	Sedimento	Agua	Sedimento	Agua	Sedimento	Agua	Sedimento		
1	Álvaro Obregón 18° 17.930 N 88° 35.851 W	1.43	26.4	7.089	3.75	<0.001	0.4566	8.00	3.47	< 0.002	< 0.002	9.9666	57.13	7.20	12	4.40	56.96
2	Sabidos 18° 20.589 N 88° 33.534 W	1.47	27.1	7.07	3.3	<0.001	0.4984	8.30	2.83	< 0.002	< 0.002	6.8333	10.5	6.21	15.31	4.69	51.49
3	Sacxan 18° 24.891 N 88° 31.845 WO	1.83	27.9	7.05	3.6	<0.001	0.7831	13.83	4.36	< 0.002	< 0.002	11.5	6.6333	3.15	16.12	5.04	46.33
4	Juan Sarabia 18° 27.851 N 88° 31.024 WO	1.93	26.4	7.07	3.8	<0.001	0.7640	13.23	3.71	< 0.002	< 0.002	10.85	16.2	4.10	15.17	5.97	40.33
5	Subteniente López 18° 29.548 N 88° 23.749 WO	3.83	26.6	7.07	3.4	<0.001	17.5495	4.89	5.74	< 0.002	< 0.002	12.2	4.35	12.10	15.80	5.23	49.03
6	Desembocadura 18° 29.354 N 88° 23.674 WO	6.83	27.6	7.07	3.8	<0.001	0.1746	5.18	6.87	< 0.002	0.917	8.4333	60.066	7.12	17.21	8.82	51.38

Tabla B.2. Resultados obtenidos en las muestras de agua y sedimento en la temporada de lluvia (Junio de 2005).

Punto de muestreo		PARAMETROS				As		Cd		Hg		Zn		Pb		Materia Orgánica (%)	Carbonatos (%)
		Conductividad (mS)	Temperatura (°C)	pH	Oxígeno disuelto	Agua	Sedimento	Agua	Sedimento	Agua	Sedimento	Agua	Sedimento	Agua	Sedimento		
1	Álvaro Obregón	1.52	30.6	7.3	3.5	NR	NR	ND	ND	11.9	4.6	0.0017	0.1412	<0.01	0.750	6.96	68.14
2	Sabidos	1.87	31.7	6.7	3.6	NR	NR	ND	ND	9.7	2.9	<0.0010	0.0523	<0.01	0.260	8.28	64.76
3	Sacxan	1.75	31.1	7.0	3.4	NR	NR	ND	ND	8.3	4.5	<0.0010	0.0658	<0.01	0.220	8.01	53.17
4	Juan Sarabia	1.93	32.8	6.9	3.3	NR	NR	ND	ND	6.5	3.0	<0.0010	0.1446	<0.01	1.150	7.89	93.61
5	Subteniente López	5.13	33.1	6.7	2.9	NR	NR	ND	ND	6.3	3.4	<0.0010	0.1263	<0.01	0.540	8.64	57.726
6	Desembocadura	15.5	34.5	6.5	3.2	NR	NR	ND	ND	5.5	3.4	<0.0010	0.0556	<0.01	0.150	8.15	66.20

NR: no realizado; ND: no detectable