

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



EL REGISTRO SEDIMENTARIO Y LA ACUMULACIÓN  
DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS  
EN LA PLANICIE DELTAICA DEL RÍO COLORADO

**T E S I S**

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**DOCTOR EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

PRESENTA

**KARINA DEL CARMEN LUGO IBARRA**

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO, JULIO 2011.

## RESUMEN

La alteración humana del Río Colorado (RC) ha causado cambios en la sedimentación de su planicie deltaica. El registro de estos cambios se preservó en los sedimentos y es posible identificarlo a través de herramientas geoquímicas y sedimentológicas aplicadas a núcleos extraídos de los canales de RC. Los sedimentos están compuestos por capas de sedimento alternadas de limos arcillosos y arcillas limosas; estas últimas interpretadas como el depósito durante los períodos de inundación antes y después del represamiento del RC. La tasa de sedimentación mediante actividad de  $^{210}\text{Pb}$  es de  $\sim 0.9 \text{ cm a}^{-1}$ . Los bifenilos policlorados (BPCs) y plaguicidas organoclorados (POCs) utilizados como marcadores cronoestratográficos indican tasas de sedimentación de  $1.5 \text{ cm a}^{-1}$  para el Río Hardy (RH) y  $3.6 \text{ cm a}^{-1}$  para el RC. Las máximas concentraciones de  $\Sigma\text{BPCs}$  y  $\Sigma\text{POCs}$ , al igual que la mayoría de los metales se asocian a las facies de arcilla. La distribución y concentración de BPCs y POCs es controlada por las diferentes composiciones de las fuentes de agua y/o el grado de exposición a los flujos de inundación. El BPC-138 fue el más abundante en RH y se relaciona a los aceites dieléctricos provenientes de los efluentes de la geotermia de Cerro Prieto. El BPC-28 fue el más abundante en RC y se asocia a aportes atmosféricos y/o redeposición a través del RC. El DDE fue el compuesto de los POCs más abundante en el RH. En el RC los clordanos presentaron las mayores concentraciones. Las concentraciones  $\Sigma\text{DDTs}$  y  $\Sigma\text{DDE}$  en los sedimentos del RH excedieron los valores de las guías de calidad para sedimento dulceacuícola y marino. Las máximas concentraciones de As en RH, son comparables con los máximos propuestos por diversas guías de calidad para sedimento y el Pb, Cu y Cr, están ligeramente por encima del TEC probablemente sean los plaguicidas arseniatados utilizados durante la primera mitad del siglo XX.

## DEDICATORIA A

**Díos** Por el don y la gracia de vivir de acuerdo a su voluntad. Por todo lo que haz destinado para mí.

**Mis padres Norma Alicia Ibarra Méndez e Ildefonso Armando Lugo Quijada**, por darme la oportunidad de ser su hija y realizar mis sueños con sus consejo, experiencia y amor.

**Mis hermanas Erica Esther, Olivia Magdalena y María Guadalupe** por su amor, fortaleza, perseverancia y ejemplo de vida.

**Rodolfo Alatorre Gutiérrez** Por tu amor. Por compartir el gusto por la ciencia, trabajo y nuestra tierra.

**Juan José Dorantes Aranda, Mónica Iranía Hernández Luna, Melba de Jesus Huerta, Otilia M. Ortega, Clariza B. Contreras López, Jesús Rolando Gautrín Contreras, Luis González Covarrubias, Daniel Amador Bartolini, Francisco Flores de Santiago, Raúl Alfredo Gutiérrez Espinoza**, Por su amor. Por emprender conmigo el viaje de regreso a mi verdadero hogar.

**Familia Daesslé Corona, Luis Walter, Griselda, María Katerina, Ana Karen y Sasha Colucci**, Para ustedes por su cariño e interés auténtico en éste trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Dr. Luis Walter Daessle Heuser. *Por dirigir y realizar este sueño/trabajo, con los ingredientes extraordinarios de cariño, confianza, consejo, disciplina, ingenio y tiempo (7 años). Gastprofessor Walter Dankeschön, por compartir el conocimiento, la experiencia y amor a la ciencia. Wal gracias por tu dirección en mi formación integral en arte y ciencia. Por compartir el gusto por las bellas artes, ballet, dibujo, diseño, arte culinario y música. Por el gusto de la nutrición y por viajar. Por decirme: "La vida pasa tan rápido Karina, que lo que hoy te agobia mañana ni si quiera lo recordarás, así que vive lo mejor que puedas y nunca dejes de sorprenderte ante la vida". MUCHÍSIMAS GRACIAS*

Dr. Vinicio Macías Zamora *Por compartir su conocimiento, experiencia y gusto por la química orgánica, con el sentido común de la geoquímica marina y desde la perspectiva de un oceanólogo. Por apoyar, dirigir, revisar y corregir el presente trabajo. Por su consejo y cariño GRACIAS.*

Dr Víctor Froylán Camacho Ibar *Por apoyar, cuestionar, dirigir y revisar éste trabajo. Por compartir su conocimiento y experiencia. Por el cariño y la confianza de todo este tiempo GRACIAS.*

Dr. Adán Mejía Trejo *Por compartir su experiencia y conocimiento. Por cuestionar y revisar el presente trabajo. GRACIAS por tu cariño y tiempo.*

Dra. Jacqueline Hernández García *Por aceptar revisar este trabajo, por sus comentarios, por compartir su experiencia en el área de estudio y conocimiento. GRACIAS Por su cariño y tiempo.*

M.C. Eduardo Ortiz Campos, Dra. Nancy Ramírez Álvarez y M.C. José Luis Sánchez Osorio *Por compartir, su conocimiento y experiencia. Por todo su apoyo, tiempo y cariño, muchas gracias.*

CONACYT *Por financiar mis estudios y estancia en el posgrado de oceanografía costera de la UABC.*

A las Instituciones, Facultades y Personal docente administrativo y manual de la UABC-110-FCM-Posgrado en Oceanografía Costera, Posgrado en Medio Ambiente y Desarrollo y al Centro Gestalt A. C. Ensenada, B. C. *Por recibirme, facilitar lo necesario y extraordinario para el desarrollo y término del presente trabajo.*

Proyectos, programas a cargo del Dr. L. Walter Daesslé Heuser, al PIFI, UABC, cuerpo académico consolidado, AGUA, ENERGIA Y AMBIENTE, Revista Ciencias Marinas y Fundación Alexander von Humboldt, Instituto Nacional de Geoquímica, Instituto de Geología y Mineralogía de la Universidad de Erlangen-Nürnberg, Alemania, ***Por el apoyo financiero para asistencia a cursos, congresos y estancias nacionales e internacionales.***

Familia Camacho-Covarrubias-Peimbert y Bobby, ***Gracias por compartir su cariño, confianza y casa durante todo este tiempo muchas Gracias.***

Eduardo Morales Estrada, EDD, ***Muchas Gracias por compartir tu tiempo, cariño, confianza, conocimiento y gusto por el arte culinario.***

***Gracias a todos por iluminar y adornar mi vida y trabajo, con sus bellísimas sonrisas, anécdotas, abrazos, consejos, lágrimas, cantos y gastronomía. Por todo cuanto han dejado en mí, nuestra convivencia ha sido gratificante.***

Adriana Licona, Alexandro Orozco Duran, Amabel Ortega Rívera, Angélica Arce Bastidas, Arturo Gámez Torres, Antroposofía México, A. C. Alida, Arturo Siqueiros Valencia, Bertha García, Aurelio Rodríguez Castillo, Carlos Torres Navarrete, Carlos Sierra, Celia Pérez Capetillo, Christine Llona Harris Grunder, Dora Alicia Barrón Aguirre, Dora Wauman Rojas, Eduardo Santamaría del Angel, Eliseo Almanza Heredia, Emmanuel Martínez Montaña, Emilio Ohíiaishi Manjarrez Masuda, Epímenio Gámez Villarreal, Ernesto Lugo Zazueta, Esther Araíza, Evelia Manríquez Lozano, Félix Augusto Hernández Guzmán, Francisco Aranda Manteca, Grupo de lectura Gestalt; Miriam, Coco, Laura, Nancy, Angie, Gabriel Rendon Marquez, Gabriela Montaña Moctezuma, Guillermo E. Ávila Serrano, Hortensia Andrade León, Irma Soría Mercado, Isaura Bañuelos, Isaí Pacheco Ruiz, Iván Verdugo, Ivonne Best Guzmán, Jesus Arturo Martín Barajas, Jesús Galarza Plascencia, Jorge Ledesma Vasquez, José D. Carriquiry Beltrán, José Luis Ferman Almada, José Manuel Guzmán Calderón, José Manuel Ornelas Orozco, Julio Alberto Villaescusa C., Juan Pablo D'Olivo, Luis A. Cupul Magaña, Karina Cruz Vasquez, Leopoldo Guillermo Mendoza Espinoza, Lidia Queraltó, Lizeth Avendaño Cecinea, Luz del Carmen Ochoa Muñoz, Manuel Moreno Mercado, Midalia Margarita Chávez Maldonado, María Concepción Flores García, María del Milagro Ceniceros Ruiz, María Evarista Arellano García, María Guadalupe Morteo Reyes, Martín Hernández Ayón, Michael F. Holland, Miguel Agustín Téllez Duarte, Miriam Jácome Enríquez, Moníca torres Beltrán, Natalie Millán Nuñez, Nidia Teresa Angulo, Norma Alicia de Jesus Ramos Delgado, Oscar Delgado González, Omar Salah, Oscar González Yajimovich, Pedro Germán Castro Castro, Perla Karina Barba Rojo, Ramón Cajal Medrano, Rigoberto Guardado, Roberto Millán Nuñez, Rodrigo Villalpando García, Rosa Isabel Trujillo, Suemy Franco Orlayneta, Sylvain Merel, Teresa González Beltrán, Vanesa Torres, Víctor Macías Carranza, Victoria Orozco Borbón, Xochitl Padilla Rosas, Yolanda Navarrete Gutiérrez, Yolanda Schramm Urrutia, Zaida Garivay Quiridi.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

EL REGISTRO SEDIMENTARIO Y LA ACUMULACIÓN DE CONTAMINANTES  
ORGÁNICOS E INORGÁNICOS EN LA PLANICIE DEL DELTA DEL RÍO  
COLORADO

**T E S I S**

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**DOCTOR EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA**

PRESENTA

**KARINA DEL CARMEN LUGO IBARRA**

Aprobada por:

---

Dr. Luis Walter Daesslé Heuser  
Presidente del Jurado

---

Dr. Víctor Froylán Camacho Ibar  
Sinodal propietario

---

Dr. Vinicio Macías Zamora  
Sinodal propietario

---

Dr. Adán Mejía Trejo  
Sinodal propietario

---

Dra. Jaqueline Hernández García  
Sinodal propietario

## ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 La zona costera .....	1
1.2 Deltas.....	2
1.3 Estuarios.....	4
1.4 Estuario del Río Colorado.....	6
1.5 Río Hardy-Río Colorado .....	9
1.6 Contaminación inorgánica del delta del RC .....	10
1.7 Contaminación Orgánica del delta del RC .....	12
1.8 Registro Sedimentario en el delta del RC .....	16
1.9 Radioisótopos ( $^{210}\text{Pb}$ y $^{137}\text{Cs}$ ) .....	16
1.10 ANTECEDENTES.....	20
1.11 HIPÓTESIS.....	23
1.12 OBJETIVOS.....	24
1.12.1 General .....	24
1.12.2 Particulares.....	24
2 MÉTODOS .....	25
2.1 Área de estudio.....	25
2.2 METODOLOGÍA .....	28
2.2.1 Campo .....	28
2.2.2 Tratamiento primario de núcleos.....	28
2.2.3 Analítico .....	29
2.2.4 Análisis y distribución de tamaño de partículas. ....	29
2.2.5 Análisis de Carbono orgánico .....	30
2.2.6 Geoquímica Inorgánica.....	30
2.2.7 BPCs y POCs .....	31
2.2.8 Análisis de $^{210}\text{Pb}$ y $^{137}\text{Cs}$ .....	32
3 RESULTADOS .....	34

3.1 Sedimentología y facies sedimentarias.....	34
3.2 Carbono Orgánico.....	37
3.3 Óxidos mayores y elementos traza.....	38
3.6 COPs .....	49
3.6.1 BPCs.....	49
3.6.2 POCs .....	52
3.6.1 DDTs.....	56
3.6.3 HCHs .....	57
3.6.4 Cilodienos .....	57
3.6.5 Endosulfan.....	58
3.7 Análisis de componentes principales.....	58
3.8 Guías de Calidad de Sedimento de COPs.....	60
3.9 Cronología Química .....	62
4. DISCUSIONES.....	65
4.1 Procesos de sedimentación en el delta del RC .....	65
4.2 Geoquímica Sedimentaria .....	67
4.3 Consideraciones toxicológicas para contaminantes inorgánicos. ....	71
4.4 BPCs.....	72
4.5 POCs .....	74
4.6 Razones DDT .....	76
4.7 COPs y procesos sedimentarios en el delta RC .....	78
5. CONCLUSIONES .....	81
6. BIBLIOGRAFÍA .....	84
7. ANEXOS .....	99

## LISTA DE TABLAS

Tabla I. Análisis de componentes principales (Varimax) de los núcleos del delta del RC.....	46
Tabla II. Datos radiométricos de los núcleos RC1 y RH.....	48
Tabla III. Concentraciones en $\text{ng g}^{-1}$ de los BPCs en los núcleos RH y RC5...	49
Tabla IV. Plaguicidas organoclorados ( $\text{ng g}^{-1}$ peso seco) en el núcleo HR1 del delta del RC.....	53
Tabla V. Plaguicidas organoclorados ( $\text{ng.g}^{-1}$ peso seco) en el núcleo RC5 del delta del RC.....	54
Tabla VI. Análisis de componentes principales (Varimax) de los núcleos de RH y RC5, incluyendo %CO, POC y BPCs. ....	59
Tabla VII. Comparación de las concentraciones de COPs en los núcleos RH y RC5 con los índices de efecto probable en organismos bentónicos: TEL (Threshold effect level) and PEL (Probable effect level) MacDonald et al. (2000), ERL (Effect range low) y ERM (Effect range median) Long y Morgan (1990) y CCME (Canadian Council of Ministres of Environment 1999).....	61
Tabla VIII. Concentraciones de los elementos traza en núcleos de sedimento del delta del RC (RH y RCs) y criterios de calidad en sedimentos, niveles de guías toxicológicas. ....	68
Tabla X. Concentraciones de Óxidos mayores de los núcleos del delta del RC. ....	100
Tabla XI. Concentraciones de metales analizados por FDRX en $\mu\text{g.g}^{-1}$ en núcleos del delta del RC.....	104

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema simplificado que representa la modificación de una señal química transportada a través de un río en un ambiente estuarino (p=particulado; d=disuelto). .....	5
Figura 2. Estructuras moleculares de DDT, DDE, DDD y Dicofol (modificado de ATSDR, 2000). .....	14
Figura 3. Esquema simplificado del decaimiento radiactivo del $^{238}\text{U}$ que muestra la acumulación en sedimentos subacuáticos de $^{210}\text{Pb}$ exceso (no soportado) transportado por vía atmosférica y de $^{210}\text{Pb}$ formado in situ (soportado), así como las explosiones y accidentes nucleares como fuente de $^{137}\text{Cs}$ hacia los sedimentos (Bernal et al., 2010).....	18
Figura 4. Localización del área de estudio y de los núcleos estudiados en la planicie deltáica del RC. ....	26
Figura 5. Distribución de los porcentajes de arenas, limos, arcillas y media textural ( $\mu\text{m}$ ), facies sedimentarias y %CO (excepto para RC3) en núcleos extraídos en el RH, RC y CSC. ....	35
Figura 6. Concentraciones de Óxidos mayores ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{MnO}$ , y $\text{CaO}$ ) en núcleos del delta RC.....	40
Figura 7. Concentraciones de As, Ba, Cr, Cu, Hg y Pb en núcleos del delta RC. ....	41
Figura 8. Factores de enriquecimiento de As, Cu, Pb, con respecto al $\text{Al}_2\text{O}_3$ y Mn con respecto a $\text{CaO}$ en nucleos del delta del RC. ....	44
Figura 9. Distribución de los puntajes para CP-3 en el núcleo RH (As, Ba, Cu y Pb) determinados a partir del análisis de CP.....	47
Figura 10. Comparación de las concentraciones de los congéneres de BPCs-LMW con respecto a los BPCs-HMW en RH.....	50
Figura 11. Comparación de las concentraciones de los congéneres de BPCs-LMW con respecto a los BPCs-HMW en RC5.....	50

Figura 12. Distribución vertical de $\Sigma$ BPCs ( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) en los núcleos RH y RC5...	51
Figura 13. Frecuencia de aparición de los POCs en RH. ....	55
Figura 14. Frecuencia de aparición de los POCs en RC5.....	55
Figura 15. Distribución vertical de $\Sigma$ POCs en los núcleos RH y RC5. (Observar la diferencia en las escalas en ambos núcleos). ....	56
Figura 16. Interpretación cronoestratigráfica de la edad de los sedimentos en los núcleos RH y CR5, comparada con los flujos de agua a través de la frontera México con EUA. ....	63
Figura 17. Variación vertical de los valores de razón (DDD+DDE)/DDTs sugerida por Doong et al. (2002) comparada con la concentración de DDTs para el núcleo RH.....	77
Figura 18. Modelo conceptual de la fuente, transporte y depósito de COPs en el delta del RC.....	80

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 La zona costera

La zona costera es la región donde se unen e interactúan el continente, la atmósfera y el océano. Es considerada una franja que se extiende desde el parteaguas, que es el punto más alto de la planicie costera dentro de la cuenca hidrográfica, hasta el quiebre de la planicie continental, que incluye ~200 m por encima y por debajo del nivel medio del mar.

La zona costera es altamente dinámica y productiva y es de vital importancia para el planeta, por los sistemas, fronteras y flujos que en ella se presentan; como flujos se consideran los biofísicos, geoquímicos y socioeconómicos. Algunas de las situaciones más graves que se presentan en la zona costera y que por tanto provocan cambios drásticos en el desarrollo económico, son las alteraciones antropogénicas que desvían o anulan el curso natural de los aportes de agua y sedimento hacia el mar. Por ejemplo, la construcción de presas, provocan la reducción de aporte y modifican la morfología de los cuerpos costeros, por tanto disminuye la extensión de las playas. También se considera la dinámica natural de las mareas, la incidencia del oleaje y el incremento del nivel medio del mar cuando este es mayor que el suministro de sedimento hacia la costa, estos factores provocan una mayor erosión tanto de playas como de cantiles. De este modo se presentan de manera inevitable algunos cambios de regímenes y morfologías de sistemas costeros, deltaicos, estuarinos y/o lagunares, los cuales reducen o eliminan los hábitats para organismos, especialmente para los migratorios y endémicos.

Dentro de la zona costera se delimita la zona económica exclusiva, en la que existen una gran variedad de ecosistemas arrecifales, deltaicos, estuarinos, lagunares, manglares y marismas. Esta zona representa el 18% de la superficie total del planeta, en la que se tiene una productividad del ~26%, mientras que en el océano abierto la productividad primaria es del 33%. Dentro de las principales actividades que se desarrollan en esta zona son; acuicultura, pesquerías, tráfico marítimo, recreación y turismo.

## **1.2 Deltas**

Un delta es una protuberancia progradante discreta de la línea de costa, donde el río deposita el material detrítico en el lecho marino o lacustre (Elliott 1986; Bhattacharya y Walker, 1992). Los deltas se forman cuando la tasa de aporte de sedimento fluvial a la costa excede la energía erosiva de las olas y mareas. Las estructuras y morfologías de un delta, se adquieren con base en la dispersión de los sedimentos transportados por los ríos, por la acción de las olas, mareas y/o corrientes fluviales. El depósito de sedimento en un delta cuando es aportado a través de los flujos del río, se denomina progradacional, debido a que es hacia el sistema marino.

Los deltas se forman en ambientes tanto de baja como de alta energía a lo largo de extensiones costeras. En zonas con baja energía se presenta poca fluctuación de la marea y corrientes litorales débiles, por lo cual la formación del delta refleja principalmente la naturaleza del flujo de la corriente fluvial. La distribución del sedimento está directamente relacionada con la morfología de los canales distributarios. Sin embargo, las márgenes deltaicas en ambientes de alta energía son afectadas por las mareas, se asocian a fuertes corrientes

litorales, o a prolongada incidencia de las olas. Estos presentan un alto grado de alteración, tanto en la fisiografía como en la distribución de los sedimentos.

La estructura general del ambiente deltaico consiste de tres zonas principales; la zona superior o planicie deltaica, zona inferior o frente deltaico y el prodelta que se encuentra dentro del frente deltaico. En la planicie se localiza el canal distributivo y las barras de desembocadura, que representan la parte emergente del delta y forman una llanura de inundación subaérea, con marismas, que se desarrolla después de que el delta ha rellenado el espacio disponible en la plataforma. Las barras presentan una estructura de depósito progradacional, a medida que los canales distributivos mantienen un aporte continuo de sedimentos. El sedimento en esta zona está compuesto principalmente por arcillas ricas en materia orgánica.

El frente deltaico es la plataforma marina somera que bordea la planicie deltaica. En esta zona el depósito de sedimento forma estructuras de barras compuestas por areniscas y arena fluvial, que se acumula en la desembocadura de los canales distributivos y el prodelta. Dentro del frente se encuentra el lodo deltaico, que es la franja que se extiende desde el límite marino del frente deltaico, hasta la línea donde inicia el depósito de arcilla. La acumulación de limo y arcilla del frente deltaico y del prodelta forman la plataforma, sobre la cual se construyen las barras de desembocadura y se extienden hacia los canales distributivos. El prodelta es un sub-ambiente de depósito de sedimento fino, donde se deposita el limo y la arcilla transportados en suspensión por los canales distributivos, después de que la arena de fondo es depositada en el frente deltaico.

En el delta del río Colorado el depósito de sedimento fue progradacional hasta antes del inicio del represamiento del río en 1932, debido a que el aporte de sedimento fue predominantemente a través de los flujos del RC. Actualmente el

delta del RC es dominado por la acción hidrodinámica de la marea y su morfología presenta barras arenosas. En esta zona se ha registrado una altura de la onda de marea  $> 4$  m, y con flujo y reflujo de mareas que se extiende hasta 56 km río arriba hacia la zona alta del estuario (Payne et al., 1992 en Luecke et al., 1999). De acuerdo a la clasificación asignada por Fisher et al. (1962), el delta del RC es un delta dominado por las mareas y con base a la clasificación de Galloway (1975) es un delta estuarino.

### **1.3 Estuarios**

Los estuarios son cuerpos costeros con conexión libre con el mar abierto. Forman parte de una planicie y reciben agua a través de la recarga natural por ríos y/o corrientes superficiales, por lo que el agua es considerablemente diluida. También recibe incursiones marinas a través de la planicie de mareas, (Pritchard, 1955; Chester, 1990; Dalrymple et al., 1992). La planicie está influenciada por un río y es bañada e inundada por agua marina, principalmente.

Actualmente los estuarios tienen estructuras morfológicas comunes en las bocas de los ríos, debido a la transgresión del mar provocada por el deshielo durante el Holoceno. Durante la transgresión muchos valles fueron inundados, por lo que actualmente, éstos nos proporcionan una amplia gama de morfologías costeras y de controles de procesos que son utilizados para construir los modelos del depósito de sedimento de los estuarios (Dalrymple et al., 1992).

Debido a que los estuarios se encuentran en una planicie costera, el flujo de un río en un estuario tiene conexión directa con el agua de mar, donde esta última es diluida con el agua de río y da origen a zonas de mezcla (Chester, 1990).

Los estuarios funcionan como sumideros naturales de iones disueltos y particulados fluviales que se encuentran en la zona de mezcla (Hunter, 1983; Chester, 1990). Para elucidar los procesos que se presentan en un estuario, éste se ha dividido conceptualmente en tres secciones: a) estuario-marina (o baja), la cual está conectada con el mar; b) una estuario-medio, la cual está sujeta a una fuerte mezcla entre el agua de río y mar, y c) una estuario-alta (o fluvial), la cual es caracterizada por entrada directa del agua de río y además está sujeta al régimen de marea diario. Por lo anterior, una modificación drástica en el flujo del río afecta los niveles y cursos de algunos procesos químicos, biológicos y geoquímicos en un estuario (Fig. 1) (Chester, 1990; Nichols, 2009).

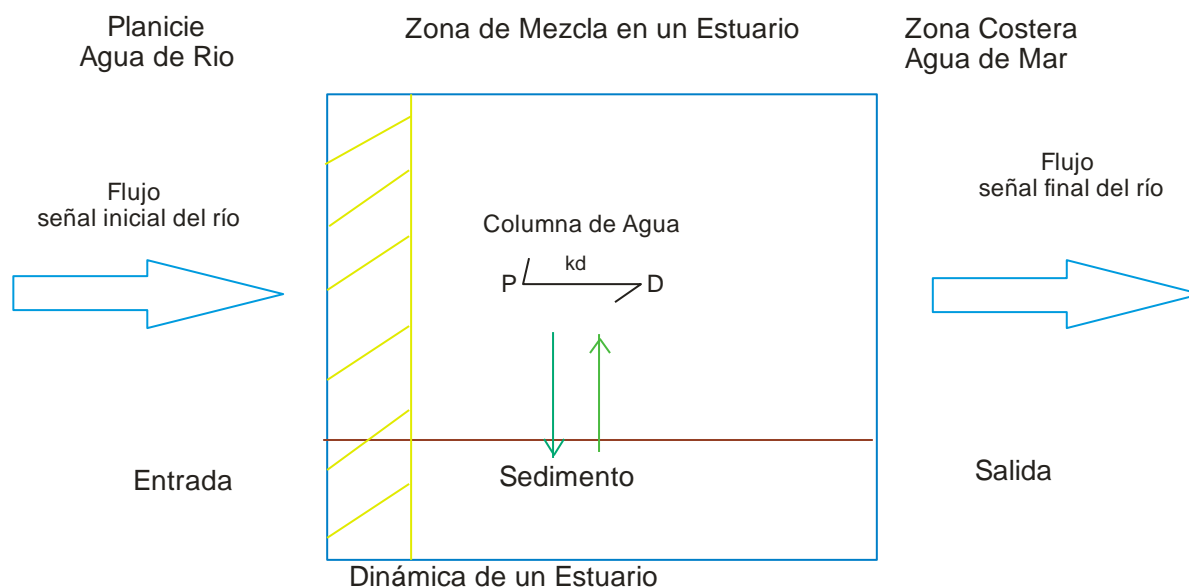


Figura 1. Esquema simplificado que representa la modificación de una señal química transportada a través de un río en un ambiente estuarino ( $p$ =particulado;  $d$ =disuelto).

[Donde:  $P \xrightarrow{k_d} D$  indica la reactividad de material particulado y disuelto asociado a procesos físicos, químicos y biológicos en la zona de mezcla de un estuario. En aguas naturales la partición en equilibrio de un elemento entre la fase disuelta y particulada se describe por el coeficiente de partición ( $k_d$ ).  $k_d = X/C$ , donde  $X$  es la concentración de un elemento intercambiable en la fase particulada y  $C$  es la concentración de un elemento en la fase disuelta.  $\uparrow\downarrow$  Indica el intercambio de material entre dos fases agua-sedimento (modificado de Chester, 1990)].

## 1.4 Estuario del Río Colorado

El RC desemboca en el Golfo de California y da origen al delta de RC. Debido a las condiciones actuales, es conocido como el delta estuarino del RC. Es un sistema hipersalino geológicamente joven (<15000 años), con un régimen macromareal (>4m) (Fairbridge, 1998). El RC se originó por el deshielo en las Montañas Rocallosas en el estado de Colorado en Estados Unidos de América (EUA). Su cuenca de drenaje cubre un área de  $647 \times 10^9 \text{ m}^2$  y se extiende a través de siete estados en EUA (Arizona, California, Colorado, Nevada, Nuevo México, Utah y Wyoming), dos en México (Baja California y Sonora), veinte reservas indígenas en EUA, diversos embalses y canales de riego, 35 presas en EUA, 1 presa en México (Committee to Review the Glen Canyon Environmental Studies, 1990; Morrison et al., 1996; Luecke et al., 1999; American Rivers Org, 2004).

En México la cuenca del RC pertenece a la región hidrológica No. 7a que a su vez se divide en 7 subcuencas. El RC comprende el 1.12% ( $7100 \times 10^6 \text{ m}^2$ ) del total de la cuenca de drenaje, del cual el 0.8% ( $5100 \times 10^6 \text{ m}^2$ ) pertenece a Baja California (POMEMM, 2007). El recorrido del RC en México es de Noroeste a

Sureste, con una longitud de 187 Km; su agua ha sido utilizada para consumo humano y riego agrícola (POMEMM, 2007).

La cuenca del RC ha sido intensamente explotada y manipulada por el hombre. Desde inicios del siglo XX la intervención del hombre ha modificado los flujos de agua y sedimento hacia el delta del RC. Desde 1932 el flujo de agua que pasaba a través de la frontera de México con EUA fue significativamente reducido por la construcción de las presas Hoover cerca de Las Vegas, Nevada y la presa Glen Canyon localizada en la frontera de Arizona con Utah. Durante 1960-1979 prácticamente no fluía agua a través de la frontera internacional sur de EUA con México, debido al llenado de la presa Glenn Canyon. Asimismo, el agua proveniente de los lagos Mead y Powell, localizados cuenca arriba de las presas fue retenida, completamente por dichas construcciones (Glenn et al 1996; Nagler et al., 2007). Ésto provocó una disminución drástica del flujo del RC hacia su desembocadura. Consecuentemente el abundante flujo que llegaba al delta en el norte del Golfo de California disminuyó drásticamente (American Rivers Org., 2004), modificándose así de un ambiente estuarino a uno anti-estuario hipersalino (Vandivere y Vorster, 1984; Lavin et al., 1998).

Se estima que antes de que las presas Hoover (1935) y Glen Canyon (1964) se construyeran, la descarga de agua de RC al delta alcanzaba casi los  $6000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Glenn et al., 1996). Antes del represamiento del RC la zona de mezcla del estuario del RC, se localizaba a más de 65 km al sur de la boca del RC (Rodríguez et al., 2001). El corte drástico en el suministro de agua convirtió una amplia zona de humedales en una de las áreas agrícolas más importantes de Norteamérica, reduciendo la extensión del delta de  $7100 \text{ km}^2$  a  $5100 \text{ km}^2$  (Luecke et al., 1999).

En 1940 se dió inicio a una serie de desacuerdos y presiones por parte de los gobiernos de México y EUA, con el fin último de controlar y establecer un

volumen anual del flujo de agua proveniente del RC, debido a la disminución del flujo de agua hacia México a través de su frontera internacional. Con esto se buscaba que dicho volumen cubriera las necesidades de la población y los ecosistemas, tanto en EUA como en México. De este modo en 1944 ambos países firmaron el Tratado Internacional sobre la Distribución de aguas que reglamenta el uso de los tres sistemas de ríos compartidos: Colorado, Tijuana y Bravo. De las aguas del RC, se le asignó a México un volumen garantizado de  $1\,850\text{ Mm}^3\text{ a}^{-1}$ , sin exceder de  $2\,100\text{ Mm}^3\text{ a}^{-1}$  (Cortéz-Lara et al., 2005; Alles et al., 2006; POMEM 2007). De este volumen garantizado, tan solo en las zonas agrícolas de los valles de Mexicali (Baja California) y San Luis Río Colorado (Sonora), se utiliza el 52% (CONAGUA, 2007). Los principales cultivos son trigo, algodón y forrajes, además de algunos otros de menor importancia en cuanto a la superficie de siembra como maíz, hortalizas como cebollín y espárrago (Avendaño-Ruiz, 2005).

Después de 1981 el lago Powell y por consiguiente la presa Glen Canyon, alcanzaron su nivel máximo de almacenamiento, debido a las máximas precipitaciones pluviales registradas, producto de las condiciones del fenómeno natural de El Niño (1983-1984) (Rhodes et al., 1984; Glenn et al., 2001; Nagler et al., 2007). Ésto permitió una mayor liberación de agua ( $100\text{-}800\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ ) hacia la región del delta del RC durante esta época (Nagler et al., 2007), lo que provocó una recuperación parcial del sistema estuarino en el delta del RC.

En los años 1993 y 1997-2000, se registraron nuevamente precipitaciones asociadas al fenómeno de El Niño. Sin embargo, éstas fueron de menor intensidad y por lo tanto hubo un menor aporte de agua ( $2\text{-}5\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ ) hacia el delta del RC (Nagler et al., 2007).

A partir de 1993, tras la evidente disminución de aporte de agua, la zona estuarina ha estado sujeta a la escasez de agua dulce, excepto por el aporte

de los drenes agrícolas de los valles Imperial y Mexicali, las filtraciones del canal Wellton-Mohawk, Arizona EUA, los flujos provenientes de la planta geotérmica de Cerro Prieto y, a partir de 2008, los flujos de agua provenientes de la planta de tratamiento “Las Arenitas”. Estos aportes, excepto por las filtraciones del canal Wellton-Mohawk, son vertidos hacia el canal de riego principal del Río Hardy (RH), el cual funciona precisamente como vertedero de drenes agrícolas y desemboca río abajo en el canal principal del RC (Valdés-Casillas et al., 1998; Zamora-Arroyo et al., 2005; Cortéz-Lara et al., 2005).

Actualmente, tanto la población como los ecosistemas, aún dependen del aporte de agua del RC para consumo humano y para irrigación, desde su origen en EU hasta su desembocadura en México (Clean Colorado River, 2006). Tan solo en EUA el RC abastece de agua para consumo humano (doméstico e industrial) a ~25 millones de personas, así como la irrigación de alrededor de  $1.8 \times 10^6$  ha de cultivo (Clean Colorado River, 2006).

Además del represamiento del RC y la escasez de lluvia, la evaporación es otro de los factores considerados en la disminución del flujo del RC. Por lo que más del 20% del agua del RC se evapora cada año, antes de que sea almacenado en las presas en la cuenca alta del RC (American Rivers Org., 2004).

El flujo de las aguas residuales agrícolas, geotermales y municipales hacia el Río Hardy, además de las altas tasas de evaporación a lo largo del RC, hacen que el estuario del delta del RC sea un área especialmente susceptible debido a la acumulación de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

## **1.5 Río Hardy-Río Colorado**

El RH es uno de los principales tributarios del RC en México y da origen a la subcuenca hidrológica 7Bf (POMEM, 2007). El RH tiene su origen cerca de las instalaciones de la planta geotérmica de Cerro Prieto, con una longitud aproximada de 24 km previo a la confluencia con el RC.

El RH aporta al RC alrededor de  $85 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$  de agua proveniente principalmente de drenes agrícolas con una concentración de sólidos disueltos  $\sim 7 \text{ g l}^{-1}$ . El agua que transporta el RH es producto de escurrimientos de las sierras situadas al occidente del Valle de Mexicali (Cucapáh y el Mayor) y en mayor parte es por infiltraciones producidas por drenes agrícolas (POMEM, 2007). La mayoría de los canales del antiguo RC que actualmente son canales de irrigación o drenes agrícolas, y los ecosistemas asociados al actual delta del RC, son mantenidos por estos flujos de agua de rechazo o drenes agrícolas (Zengel et al., 1995; Glenn et al., 2001a y b; Cohen et al., 2001).

Los aportes de aguas de retornos agrícolas del Valle de Mexicali que recibe el RC, contienen altas concentraciones de agroquímicos. Aproximadamente 700, 000 toneladas de fertilizantes y 400, 000 litros de insecticidas fueron aplicados en el Valle de Mexicali tan solo durante los ciclos de 1990-1991 I (DGE, 1993).

## **1.6 Contaminación inorgánica del delta del RC**

La planta geotérmica de Cerro Prieto inició operaciones en 1973, para exportar energía hacia EUA. Se ha reportado contaminación por mercurio (Hg) en agua y aire asociado al campo geotermal de Cerro Prieto (Acosta y Asociados 2001., en Yarto-Ramírez et al. 2004). Altas concentraciones de Hg, arsénico (As), Sb (antimonio) y B (boro), pueden ser encontradas en vegetación terrestre y roedores (hígado y riñones) cerca de las instalaciones geotermales (Bargagli et al., 1997).

En las cercanías del RC, en Salton Sea (EUA), se han observado defectos en embriones de peces relacionados con contaminantes provenientes de las aguas residuales municipales y descargas agrícolas de la zona (Matsui et al., 1992). También se ha observado un incremento en la exposición al Se, B y Zn en aves de la región del delta (Mora y Anderson, 1991). De acuerdo a García-Hernández et al. (2001), únicamente el Hg y Cd excedieron ligeramente el límite establecido para potencial tóxico en algunas muestras de biota de la región del delta del RC.

En el delta del RC se han encontrado contaminantes como Se, Hg y pesticidas en biota, en un 25% por encima de las concentraciones o niveles tóxicos permisibles establecidos por Lemly (1993), Skorupa et al. (1996) y USDI (1998). Radtke et al. (1988) y Presser et al. (1994) mencionan que concentraciones elevadas de Se en las aves de la localidad podrían presentar teratogénesis. Datos de García-Hernández et al. (2001) sugieren la biodisponibilidad de Se y Hg por encima de la norma oficial en varias especies residentes del RH. Las rocas sedimentarias marinas del Cretácico a lo largo de la cuenca de drenaje del RC son una fuente natural de Se (Presser et al., 1994). Las concentraciones de Se en el RC han aumentado debido a la baja precipitación, la alta evaporación y la baja circulación (García-Hernández et al., 2001).

Aunque los componentes químicos utilizados en la agricultura que contienen Hg fueron prohibidos en 1969, la gran capacidad de adsorción de este metal favorece su transporte y suspensión en el sistema de drenaje hacia la cuenca receptora. Los procesos de suspensión son comunes en regiones estuarinas dominadas por las mareas. De esta manera el Hg y otros contaminantes pueden representar un peligro toxicológico potencial para la diversidad de especies por procesos de biomagnificación en los niveles tróficos (Bloom,

1992) del delta del RC. La estación geotermal de Cerro Prieto que inició operaciones en 1973, representa desde entonces una fuente potencial de Hg al ambiente local (Gutiérrez y Helio, 2000). Dado que gran parte de las emisiones de Hg son volátiles, una parte se reintegra a los procesos acuáticos y sedimentarios a través de la precipitación (Fitzgerald et al., 1981). Estudios realizados en 1997 indican que las cantidades de Hg que se liberan a la atmósfera en este lugar son mayores de 47 kg año, lo que representa el 90 % y el resto se reintegra en descargas de agua (Acosta y Asociados, 2001).

También se ha reportado contaminación por As y B producto de la actividad del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CFE, 1987), lo que coincide con lo reportado para otros campos geotermales donde se han encontrado que la concentración de Hg, B y As en flora y mamíferos pequeños es mayor en un radio de 100 km alrededor de dichos campos (Axtman et al., 1975; Dall'aglio y Ferrara, 1986 en Bargagli et al., 1997).

Shumilin et al. (2002) sugieren que no existe contaminación por metales en la sección marina del delta. Sin embargo, Daesslé et al. (2009) mencionan que los resultados de Shumillin et al. para un núcleo de sedimento adyacente al ambiente de plataforma marina somera, muestra el doble en la concentración de As en la base (más antiguo) del núcleo, comparado con la mitad superior del mismo. Ésta característica no fue discutida por Shumulin et al. (2002).

## **1.7 Contaminación Orgánica del delta del RC**

Los compuestos orgánicos persistentes (COPs) incluyen a los plaguicidas organoclorados (POCs), que son principalmente los compuestos del DDT (diclorodifeniltricloroetano) y los bifenilos policlorados (BPCs), además de las dioxinas y furanos. El DDT es un potente plaguicida que fue muy empleado a

inicios de los 80's. El DDT comenzó a ser producido en 1940 y su uso se incrementó ligeramente entre 1950-1974. Después de 1972 fue restringido en EUA a partir de su reglamentación (Venkatesan et al., 1999).

Debido a que el DDT es un compuesto sintético es muy persistente en el medio ambiente, su degradación tiende a ser muy lenta y sus productos intermedios de degradación, DDE y DDD, también son muy persistentes y presentan propiedades químicas, físicas y toxicológicas similares a los del producto original. Todos ellos poseen una elevada tendencia a bioacumularse en los seres vivos y la exposición a estos compuestos se ha asociado a efectos teratogénicos, disrupción del sistema endócrino, efectos a largo plazo relacionados con el sistema nervioso y disfunciones hepáticas. El DDT es, además muy tóxico para los organismos acuáticos y aves. A pesar de estar prohibido en la mayoría de los países desde hace cuatro décadas, es un contaminante comúnmente detectado en los diferentes compartimentos ambientales. Dentro de los organismos acuáticos, los mejillones y otros moluscos bivalvos tienen la habilidad de acumular niveles traza de ciertos pesticidas organoclorados y bifenilos policlorados (BPCs), además de hidrocarburos del petróleo y metales traza (Chen et al., 2002).

Las altas concentraciones de DDD y DDE en algunos lugares cercanos a ríos y lagos son debido a los procesos de diagénesis que ocurren sobre las concentraciones de DDT (Hitch y Day, 1996 en Chang et al., 1999). En sedimentos el DDT se degrada para transformarse a DDD (en condiciones anaeróbicas) y/o DDE (en condiciones aeróbicas) (Ballschmitter y Wittlinger, 1991).

Las fuentes primarias de DDT y sus metabolitos (Fig. 2) en el medio ambiente en la actualidad son: la volatilización a la atmósfera en zonas de aplicación o síntesis, transporte atmosférico, y probablemente el uso continuo de Dicofol.

Éste es un plaguicida obtenido de la hidroxilación del DDT (Qiu et al, 2004). Las emisiones de este plaguicida al medio ambiente, al menos en EUA y Canadá, indican que son bajas. La volatilización desde los suelos o de las aguas superficiales se considera la principal fuente de aporte de DDT a la atmósfera (Lee et al., 1998). Además, los suelos y sedimentos pueden ser fácilmente removidos por el viento, actividades de dragado o por la actividad de los peces, lo que provoca que los pesticidas se liberen al ambiente en estuarios, lagos y ríos y por consiguiente a la atmósfera por medio del intercambio gaseoso (Zhang et al., 1999).

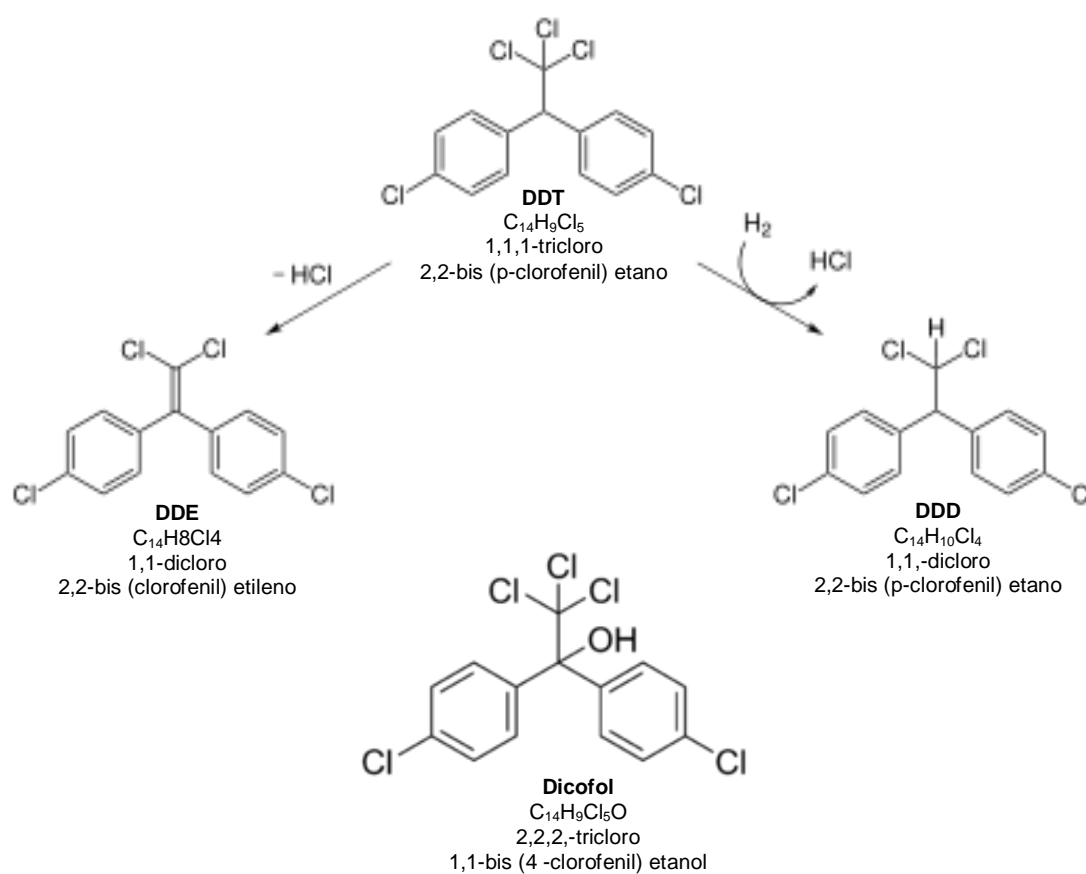


Figura 2. Estructuras moleculares de DDT, DDE, DDD y Dicofol (modificado de ATSDR, 2000).

La Comisión Económica Europea de la Organización de las Naciones Unidas (1999) permite el uso de DDT en dos casos: a) protección de la salud pública en enfermedades como la malaria y b) como producto intermedio en la síntesis del Dicofol (Fig.2), siempre que el contenido total de DDT sea inferior a 0.1%.

En los años 1950's -1980's, se aplicaron grandes volúmenes de POCs con el objeto de eficientizar los cultivos en México, principalmente los compuestos de la familia del DDT (POMEMM, 2007). La aplicación de estos POCs ha ocasionado que actualmente se registre contaminación de aire, suelo y agua (POMEMM, 2007). No obstante, se ha documentado que en el Valle Imperial (zona adyacente a la frontera internacional con Mexicali) EUA, se aplicaron 270 t de dicofol (contiene en su mezcla principal residuos de DDT) y 110 t de endosulfan. La presencia de los POCs en el delta del RC se ha registrado en aves, peces, moluscos y sedimentos superficiales. Datos reportados por García-Hernández et al., 2001 y Gutiérrez-Galindo et al., 1992 indican que existe contaminación y efectos tóxicos en esta zona.

En cuanto a los BPCs, comenzaron a ser producidos en EU en 1930 y se emplearon como parte de transformadores, capacitores, fluidos hidráulicos, lubricantes, adhesivos, pinturas, recubrimientos y aislantes. Su producción se incrementó después de la segunda guerra mundial, alcanzando un máximo en el ámbito mundial en 1970. En el período comprendido entre 1970 y 1977 fueron prohibidos por la EPA-EU (Environmental Protection Agency), reflejándose en un decremento considerable de sus concentraciones ambientales (Hom et al., 1974; Hermanson et al., 1991; Valette-Silver et al., 1993; Latimer y Quinn, 1996; Venkatesan et al., 1999).

En el delta del RC los estudios de COPs, se han enfocado principalmente en organismos, y en menor grado, en suelo y sedimento. A pesar de que durante los últimos cien años el RC y su delta han experimentado cambios históricos,

aun es posible identificar concentraciones de COPs en sedimentos, aun cuando fueron prohibidos desde ~1970.

## **1.8 Registro Sedimentario en el delta del RC**

La información histórica contenida en el registro sedimentario es de suma importancia para elucidar los cambios provocados por la intervención humana en esta. Los depósitos de sedimento en la planicie baja son de periodos intermareales (marea muerta) con aproximadamente 13 m de profundidad, mientras que los depósitos en la planicie alta fueron sobrepuestos en periodos intermareales (marea viva) del Pleistoceno (Eisma et al., 1981).

Al sur del delta RC, en el norte Golfo de California, la manipulación del RC ha provocado cambios en el transporte de sedimento, y por lo tanto actualmente se hace evidente la erosión de la cuenca estuarina y de la zona costera adyacente (Carriquiry y Sánchez, 1999). Daesslé et al., 2002, sugieren que existe resuspensión y dispersión activa de material sedimentario arcilloso proveniente del delta del RC y de la plataforma adyacente a lo largo de la costa de Baja California incluso hacia la cuenca Delfín. También mencionan que las arcillas son caracterizadas por su relativamente alto contenido de metales y particularmente por su partición de Mn con la fracción geoquímica de carbonatos.

## **1.9 Radioisótopos ( $^{210}\text{Pb}$ y $^{137}\text{Cs}$ )**

En el presente trabajo la presente tesis se consideraron núcleos de sedimento del estuario del RC para evaluar la variación temporal del depósito de sedimento, así como de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos.

La técnica más utilizada para establecer un marco geocronológico en los sedimentos recientes (~100 años) lacustres y marinos, es la aplicación del radioisótopo natural  $^{210}\text{Pb}$  y el radioisótopo artificial  $^{137}\text{Cs}$ , debido a que sus vidas medias son de alrededor de 22 y 30 años respectivamente (Goldberg y Koide, 1962; Krishnaswamy et al., 1971; Koide et al., 1972; Krishnaswamy y Lal, 1978; Robbins, 1978; Appleby y Oldfield, 1983; Oldfield y Appleby, 1985; Appleby, 2001; Carroll y Lerche, 2003).

Dentro de la serie de desintegración del  $^{238}\text{U}$  se encuentra el  $^{226}\text{Ra}$  (vida media = 1,602 años) (Fig. 3), que se desintegra para generar el gas  $^{222}\text{Rn}$  (vida media= 3.83 días). Parte del  $^{222}\text{Rn}$  generado en la parte externa de la litósfera se difunde a la atmósfera con una tasa constante de aproximadamente 42 átomos  $\text{min}^{-1} \text{cm}^{-2}$ . Posteriormente se desintegra a través de varios productos de vida media muy corta hasta dar origen al  $^{210}\text{Pb}$ . El  $^{210}\text{Pb}$  atmosférico (como sólido) regresa a la litosfera durante eventos de precipitación pluvial y/o adsorbida a aerosoles (Fig. 3). Su tiempo de residencia atmosférica es de sólo 5 a 10 días (Krishnaswamy et al., 1971).

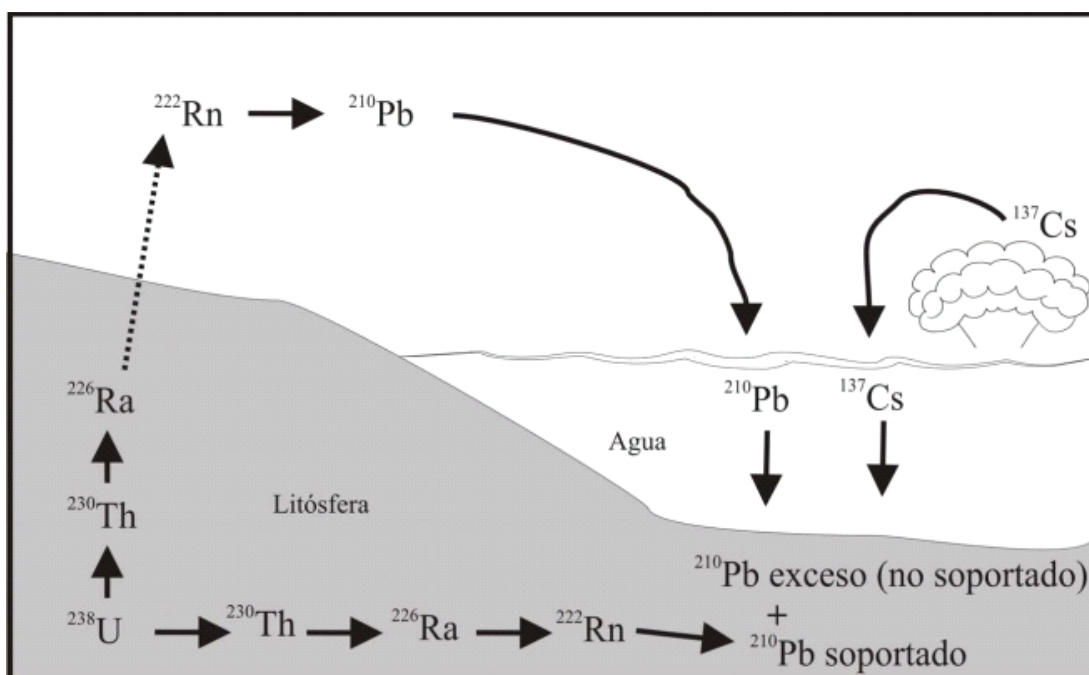


Figura 3. Esquema simplificado del decaimiento radiactivo del  $^{238}\text{U}$  que muestra la acumulación en sedimentos subacuáticos de  $^{210}\text{Pb}$  exceso (no soportado) transportado por vía atmosférica y de  $^{210}\text{Pb}$  formado in situ (soportado), así como las explosiones y accidentes nucleares como fuente de  $^{137}\text{Cs}$  hacia los sedimentos (Bernal et al., 2010).

La datación de sedimentos con  $^{210}\text{Pb}$  se fundamenta en la determinación de la actividad del  $^{210}\text{Pb}$  atmosférico ( $^{210}\text{Pb}$  no soportado o en exceso) presente en los sedimentos marinos y lacustres. Su actividad en el sedimento está controlada principalmente por la mineralogía del substrato y se considera constante a lo largo de una columna determinada de sedimento. El fechado con  $^{210}\text{Pb}$  se establece a partir de los valores de la actividad del  $^{210}\text{Pb}$  no soportado, que está en función de la profundidad dentro del sedimento. (Oldfield y Appleby, 1985).

El radioisótopo  $^{137}\text{Cs}$  o radiocesio, tiene una vida media de 30.3 años y es producido por las reacciones termonucleares, principalmente la bombas

nucleares a mediados del siglo XX. La presencia de este isótopo en sistemas naturales está directamente relacionada a la actividad termonuclear atmosférica (Fig. 3). El  $^{137}\text{Cs}$  es adsorbido y fijado rápidamente por las partículas en los sedimentos, especialmente en los minerales de arcilla y en particular la vermiculita (Staunton, 2002).

El depósito de  $^{137}\text{Cs}$  en el hemisferio norte inició en 1952, con un pico máximo en 1963 y 1964. El accidente de Chernobyl, ocurrido en 1986, produjo un segundo pulso en el  $^{137}\text{Cs}$  atmosférico el cual es detectable en muestras ambientales (Pourchet et al., 1986, 1988).

Varios autores han estudiado el depósito de  $^{137}\text{Cs}$  en diversos sistemas lacustres (Pennington et al., 1973; Robbins y Edgington, 1975; Robbins, 1978). La precipitación del  $^{137}\text{Cs}$  ha servido como un trazador muy valioso en sedimentos en varios casos de estudio ambientales, especialmente los que proporcionan información de las tasas de erosión de suelos o las tasas de depósito de sedimento en ambientes lacustres.

Pocos estudios han abordado la relación entre las alteraciones ambientales provocadas por la construcción de las presas en EUA y el impacto ambiental en la zona de desembocadura del RC México. La mayoría de estos estudios se enfocan en organismos y/o en sedimentos superficiales, sin la perspectiva histórica. Lo anterior, probablemente, debido a la dificultad de coleccionar núcleos largos (1 – 2 m) preservados y/o llevar a cabo fechados precisos. La presente tesis es el primer estudio en la zona que considera el registro sedimentario para evidenciar las variaciones de flujos y contaminantes en una zona del delta del RC.

## 1.10 ANTECEDENTES

La mayoría de los trabajos geoquímicos que se han realizado en la zona del RC, se enfocan en organismos y sedimentos superficiales. De acuerdo a la Dirección general de Ecología del Estado de Baja California (DGE, 1993), los RH-RC reciben aguas provenientes de los campos agrícolas del valle de Mexicali, las cuales contienen alta concentración de agroquímicos. En ciclo agrícola 1990-1991 se aplicaron grandes cantidades de fertilizantes e insecticidas (DGE, 1993; PSIDES, 1999).

Las sustancias tóxicas derivadas del lavado de los campos agrícolas en la cuenca del RC, han incrementado considerablemente con el uso de fertilizantes y pesticidas (García-Hernández et al., 2001). Los fertilizantes fosfatados, contienen significantes concentraciones de metales pesados, tales como, Cd, Cr, V y Zn, los cuales son persistentes en el ambiente y su adición a los suelos provoca una acumulación a través del tiempo (Alloway, 1990).

Algunos contaminantes como Se, Hg y pesticidas orgánicos han sido previamente reportados en el área de estudio (García-Hernández et al., 2001; Núñez-Esquer et al., 1975; Gutiérrez-Galindo et al., 1992). Sin embargo, Gutiérrez-Galindo et al. (1990) mencionan que el Hg presente en sedimentos y organismos no excede  $1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , y se encuentra por debajo de los límites de  $1.0\text{ mg kg}^{-1}$  establecidos por la Food and Drug Administration (FDA), en almejas y tejidos de peces, en los humedales asociados al delta del RC.

En Salton Sea, que es una zona cercana a nuestra área de estudio, ahí se han presentado deformaciones en embriones de peces, aparentemente relacionadas con aguas residuales municipales y descargas agrícolas (Matsui, et al., 1992). García-Hernández et al. (2001), encontraron que las concentraciones de Se en el material de fondo y biota del delta del RC

excedieron en el 23% de las muestras el nivel de toxicidad propuesto por Lemly (1993). Aunque las concentraciones de Hg en peces e invertebrados fueron altas, no excedieron el nivel de toxicidad propuesto por Walsh et al. (1997). Dichas concentraciones se han asociado a la cercanía que existe entre el área de estudio y la estación geotérmica de Cerro Prieto, la cual se considera como una fuente de Hg al ambiente local. Otra fuente potencial de Hg es el beneficio del oro y plata que se lleva al cabo por la empresa Minera Frisco, S.A. de C. V. en la Sierra Cucapá (Acosta y Asociados, 2001). Gutiérrez-Galindo et al. (1990), determinaron la biodisponibilidad de Cu, Cd, Cr en ostiones y almejas del delta del RC y mencionan que las concentraciones de dichos metales se asocian al aporte del RC. El estudio de estos elementos además del As y Hg, es de suma importancia debido a la genotoxicidad y a su potencial biomagnificación que presentan (Cohen et al., 2006).

Con respecto a las concentraciones de DDE en la biota, los niveles de toxicidad excedieron el límite propuesto por Blus (1996) en el 30% de las muestras con concentraciones de 45-190 ng g<sup>-1</sup> de 4, 4'-DDE (huevos de aves, tejidos de peces y almejas) en el RH (García-Hernández et al., 2001). Asimismo, Mora y Anderson (1991) encontraron 50-5050 ng g<sup>-1</sup> de 4, 4'-DDE en huevos de aves del Valle de Mexicali. Se ha reportado que los POCs están ampliamente distribuidos y se encuentran biodisponibles en las aguas del norte del Golfo de California (Galindo et al., 1992). Los peces y ostiones en la zona de humedales del delta del RC contienen 100–1916 ng g<sup>-1</sup> y 190–1746 ng g<sup>-1</sup> de  $\Sigma$ DDT respectivamente (Gutiérrez-Galindo et al., 1992). En ambos casos, el compuesto más abundante fue el 4, 4'-DDE.

Debido a la presencia de plaguicidas en el Golfo de California se presenta una serie de patologías que provocan reducciones en proteínas y ADN en larvas expuestas a estos pesticidas (Galindo-Reyes et al., 1992). En sedimentos de los canales de irrigación en el Valle de Mexicali también se encontraron

concentraciones entre 10-20 mg kg<sup>-1</sup> de DDT (Núñez-Esquer, 1975) y recientemente Ramos-Delgado (2008) encontró máximos subsuperficiales de DDT (4,4'-DDE + 4,4'-DDD) en el 88% de las muestras de sedimento colectadas (<3 - 87 ng.g<sup>-1</sup>) en el RH y sus inmediaciones.

En zonas cercanas al delta del RC en EUA, Kigley et al. (1999) mencionan que durante 1995, en el Valle Imperial se utilizaron 270 000 kg de dicofol, (plaguicida que contiene como compuesto principal en su mezcla técnica al DDT) y 110 000 kg de endosulfan, uno de los plaguicidas organoclorados más ampliamente utilizados a nivel mundial (Liu et al., 2003, Xue et al., 2006, Jayashree y Vasudevan, 2007; Ozkoc et al., 2007; Singh et al., 2007). Sapozhnikova et al. (2004) encontraron concentraciones de 4,4'-DDE en un rango de no detectados a 46.9 ng.g<sup>-1</sup> en sedimentos del Salton Sea, una laguna al norte de nuestra zona de estudio, que es el destino final de los drenes agrícolas del Valle Imperial. Weston et al. (2004) en la zona agrícola del Valle Central de California, encontró concentraciones de DDT totales de 408 ng.g<sup>-1</sup> y de 571 ng.g<sup>-1</sup> de endosulfan.

Actualmente existen pocos estudios publicados de BPCs en sedimentos en zonas cercanas al delta del RC (Hom, 1974; Pereira et al., 1994; Venkatesan et al., 1999 y Eganhouse y Pontolillo, 2000). Por ejemplo en la Bahía de San Francisco se han registrado concentraciones de 0.8-34 ng g<sup>-1</sup> (Venkatesan et al., 1999), en el Estuario de San Francisco de <0.1- 8.1 ng g<sup>-1</sup> (Pereira et al., 1994), 0.0-24 ng g<sup>-1</sup> en Palos Verdes (Eganhouse y Pontolillo, 2000) y 0.8-32 ng g<sup>-1</sup> en la cuenca de Santa Bárbara (Hom, 1974).

## **1.11 HIPÓTESIS**

Los sedimentos de los canales modernos en la planicie deltáica RC, conservan el registro de la variabilidad temporal de la acumulación de contaminantes inorgánicos y orgánicos, producto de las actividades antropogénicas desarrolladas en la cuenca del RC. Dicha variabilidad se asocia tanto a las actividades agrícolas e industriales de la cuenca, como a las fluctuaciones en la deposición de sedimento inducida por eventos de represamiento y el desfogue del caudal del RC durante los últimos ~100 años.

## **1.12 OBJETIVOS**

### **1.12.1 General**

Determinar la variación temporal de contaminantes en la desembocadura del RC y relacionar dichos cambios con las fluctuaciones en el caudal del río hacia su delta.

### **1.12.2 Particulares**

Evaluar la variación histórica de la sedimentación en núcleos de sedimento de los canales modernos de la planicie deltáica.

Determinar la concentración y variabilidad vertical del carbono orgánico (CO) y de los elementos químicos (As, Ba, Cu, Hg y Pb) asociados con las actividades agrícolas, geotermales e industriales, en los núcleos de sedimento del RC-RH.

Determinar la tasa de sedimentación reciente en los núcleos del RC y RH mediante técnicas isotópicas de  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y marcadores químicos orgánicos.

Determinar la concentración y variabilidad vertical de BPCs y POCs, en los núcleos de sedimento del RC-RH.

## 2 MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio

El RC en México tiene una extensión de ~100 km a lo largo de su cauce desde la frontera de EUA hasta su desembocadura en el Golfo de California. Su delta se localiza al sur de la ciudad de Mexicali, Baja California, entre los 115° y 114° 30' de longitud oeste y 31° 30' y 32° de latitud norte (Fig. 4). Las extensas planicies del delta del RC cubren un área de alrededor 2000 km<sup>2</sup> (Thompson, 1975).

A partir de 1977, los flujos provenientes de EUA que fueron descargados en el suroeste del delta crearon la zona pantanosa de la Ciénega de Santa Clara (CSC) (Fig. 4). Agua de retorno (agua proveniente de los lavados de campos agrícolas), menos significativa en la zona agrícola de México, crearon algunos humedales pequeños en la región (Glenn et al., 1996).

El canal principal del RC en la zona estuarina alta (conexión directa del RC con el estuario) tiene una longitud de ~5 km y llega a ensancharse hasta ~16 km en la zona inferior hacia la desembocadura en el mar, creando una cuenca estuarina (en forma de cono) con una longitud de ~50 km (Fig. 4). Hacia la boca se forman tres canales principales separados por tres barras perpendiculares-elongadas submarinas, que emergen en forma de islas denominadas, Montague y Pelicano (de Meckel 1975).

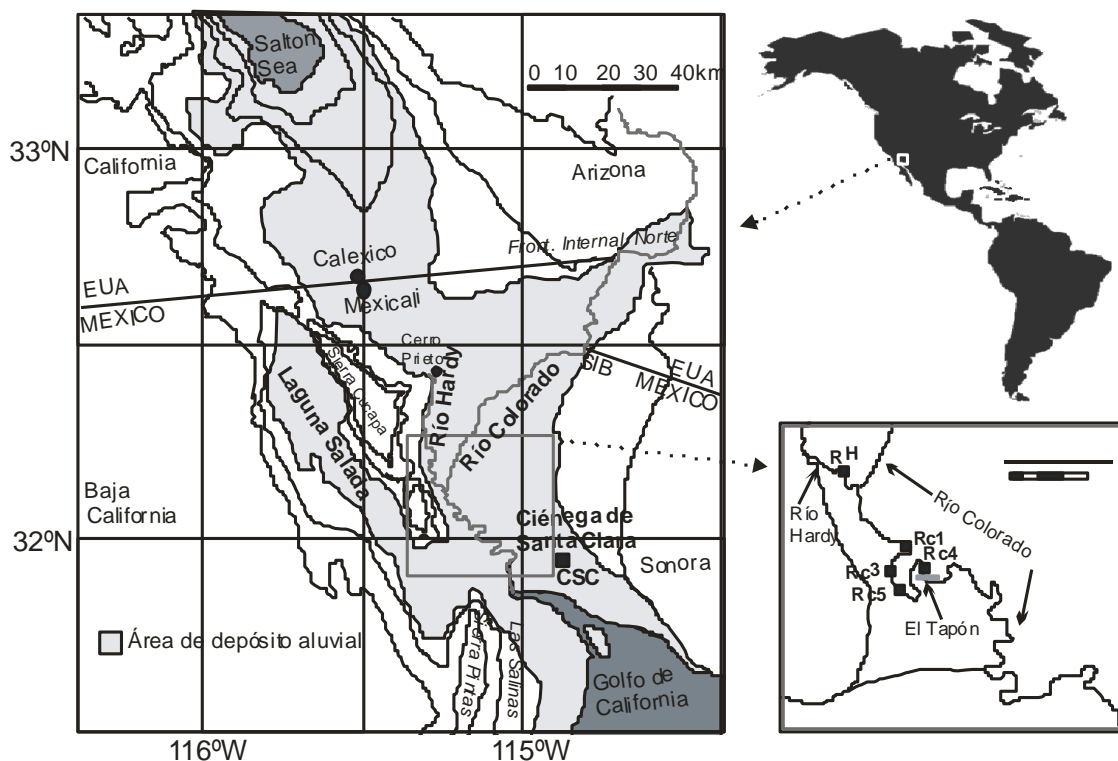


Figura 4. Localización del área de estudio y de los núcleos estudiados en la planicie deltáica del RC.

Es tal su importancia ambiental que la región del delta del RC y Alto Golfo de California, fue declarada reserva de la Biósfera en 1993, la cual incluye la parte marina y terrestre de este ecosistema. Debido a que el delta del RC es reconocido por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) como sitio prioritario por su diversidad marina y terrestre, también ha sido designada como un área de importancia para la conservación de las aves (AICA), sitio RAMSAR que, forma parte del corredor migratorio del Pacífico (Pacific flyway), reconocido como un área prioritaria dentro del Golfo de California por las organizaciones internacionales de

Conservation International (CI) y World Wildlife Fund (WWF) (SEMARNAT, 2007).

El clima es seco, debido a que es una región semidesértica, con máximas temperaturas en verano de 46°C y mínimas en invierno de -4°C. Los niveles de evaporación son de ~1 m al año (Lavín y Organista, 1988) que excede los niveles de precipitación durante todo el año. El promedio anual de lluvia es de 68 mm (Miranda-Reyes et al., 1990). Los valores de salinidad son más altos en la parte norte del delta marino que en el golfo de California (Hernández-Ayón et al., 1993). Antes de que el RH confluya con el RC se encuentra la zona conocida como “El Riñón”, donde se estableció desde 2001 una especie de tapón o bordo. Con el objeto de retener el agua que fluye a través de este río para el desarrollo de actividades recreativas y de pesca como apoyo al crecimiento económico de la zona (Mini Estuary Experiment Workshop summary, 2007). Actualmente los RH y RC están separados del medio ambiente marino, por este bordo (López-Hoffman et al., 2008).

Las planicies del estuario del RC están expuestas a las mareas y oleaje de máxima energía que proviene del sureste del Golfo de California. Esto provoca un transporte de sedimento a lo largo de la línea de costa hacia el norte. El estuario presenta rangos de marea de 7-12 m (promedio 8 m) las cuales son semidirunas con una combinación de secuencia de mareas vivas a muertas (Eisma et al., 1981).

El material sedimentario de la planicie del alto Golfo de California es de 80-90% de tamaño limo fino y arcilla, además contienen halita y yeso. El sedimento es predominantemente fino y evaporítico. Las depresiones (arroyo el Diablo y las Salinas; Fig. 4) de la cuenca del RC se caracterizan por grandes depósitos evaporíticos. En las salinas estos depósitos son mayores a 1 m con un área de 15 km<sup>2</sup>. Los depósitos en el Arroyo el Diablo son menores (~80 cm) y menos

extensos (Eisma et al., 1981). El sedimento en el delta del RC es transportado al Golfo de California principalmente a 100 m de la costa de Baja California por corrientes de marea, la circulación es baroclínica y con eventos de corrientes de gravedad (Carriquiry et al., 2001; Álvarez y Jones, 2002; Daesslé et al., 2002, 2004; Palacios-Hernández et al., 2002).

## **2.2 METODOLOGÍA**

### **2.2.1 Campo**

Se colectaron 6 núcleos de sedimento con 30-150 cm de longitud (RH, Rc, RC1, RC3, RC4 y CSC) en 2005, con tubos de acrílico a bordo de una lancha, en la zona estuarina de la desembocadura del RC. Dentro de dichas zonas se encuentra el canal principal del RC. El RH que es un canal que confluye con el canal RC y la Ciénaga de Santa Clara. Los núcleos fueron almacenados en refrigeración.

### **2.2.2 Tratamiento primario de núcleos**

Una vez en el laboratorio los núcleos, fueron seccionados horizontalmente. Se realizó una descripción litológica y se tomaron muestras cada 0.5 - 1 cm. Las submuestras fueron liofilizadas y maceradas con mortero de agata. Las submuestras se utilizaron para análisis sedimentológicos (análisis textural de tamaño de grano y mineralogía de arcillas) y geoquímicos (análisis de carbón orgánico, metales y metaloides, isótopos de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , BPCs y POCs).

### 2.2.3 Analítico

De los seis núcleos se analizaron un total de 102 horizontes. De estas muestras, se estudio la granulometría, el carbóno orgánico, perdida por ignición (LOI), SiO<sub>2</sub> TiO<sub>2</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MnO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub>, Cl, As, Ba, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, Hf, La, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, Th, U, V, Y, Zn, Zr y Cu.

Para el análisis de los COPs, se consideraron 2 núcleos (RH y RC5) con 49 horizontes y 23 compuestos orgánicos; 2,4'- DDE, 2,4'-DDD, 2,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD, 4,4' DDT,  $\alpha$  hexaclorociclohexano (HCH),  $\gamma$ -HCH,  $\beta$ -HCH,  $\delta$ -HCH, Aldrín, Dieldrin, Endrín, Endrín Aldehído, Heptacloro, Heptacloro epóxido, Metoxiclor, Endosulfan I, Endosulfan II, y Endosulfan sulfato. En el núcleo RC5 adicionalmente se determinó,  $\alpha$  Clordano, Clordano, Mirex y 32 congéneres de PCBs 18, 28, 44, 49, 52, 70, 74, 87, 99, 105, 110, 114, 119, 128, 132, 138, 149, 151, 156, 158, 169, 170, 177, 180, 183, 187, 189, 191, 194, 206.

Para la datación de los núcleos con <sup>210</sup>Pb y <sup>137</sup>Cs, se consideraron 4 horizontes de cada uno de los núcleos RC1 y RH.

### 2.2.4 Análisis y distribución de tamaño de partículas.

El análisis y distribución de tamaño de partículas, se realizó mediante un analizador láser de partículas marca Horiba LA-910, utilizando el índice de refracción de cuarzo en agua. Se utilizó hexametáfosfato como disgregante de partículas. La metodología ha sido descrita de acuerdo al manual de procedimientos y operaciones en Daesslé et al. (2002). El control de la calidad de los resultados se llevó a cabo mediante el análisis material de referencia certificado por la NIST 8010D para el análisis de tamaño de grano de arenas y esferas de 0.9  $\mu$ m de poliestireno NIST 1690.

### **2.2.5 Análisis de Carbono orgánico**

La determinación del contenido de %CO se llevó a cabo con el uso de un analizador elemental LECO CHNS 932. El tratamiento para la determinación de CO de las muestras se llevó a cabo según el método de Chang et al. (1991), empleando HCl diluido para eliminar el carbono asociado a los minerales de carbonato.

### **2.2.6 Geoquímica Inorgánica**

Para la determinación de óxidos mayores y elementos traza mediante de fluorescencia de rayos X (FRX), las muestras fueron sujetas a combustión (LOI) a 1030 °C. Al hacer ésto se elimina en las fases gaseosas provenientes de los minerales de carbonatos y materia orgánica, así como de deshidratación de los minerales de arcilla y oximetales. La sumatoria de %LOI y el % de la suma de los óxidos mayores debe ser 100%.

La determinación de óxidos mayores y elementos traza, se realizó por medio de un equipo de fluorescencia de rayos X (FRX) marca Philips PW 2400 XRF, en la Universidad de Erlangen Nürnberg, Alemania. Para ello se fundió el sedimento en navcillas de platino, tras mezclarlo con hexaborato de litio y metaborato de sodio para fabricar tabletas de vidrio.

Dado que los resultados de Cu mediante FRX no fueron satisfactorios, el Cu se determinó mediante un espectrómetro de emisión atómica ICP-AES, después de realizar una digestión total de la muestra en vasos de PTFE a 180°, utilizando una combinación de HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>3</sub> y HF.

La recuperación (en porcentaje) de cada elemento fue determinada por medio del análisis de réplicas de material de referencia USGS MAG-1. La mayoría de los elementos tuvieron entre 92 y 110% de recuperación excepto Ce, Cu, Pb y Zr (82-88%), y Cr, La y Mo (121-125%). El % de recuperación para As fue de 98%. La precisión analítica fue estimada con análisis al azar de replicas, y el error fue de  $\pm 1\%$  para óxidos mayores y  $\pm 10\%$  para elementos traza. El Hg fue determinado en 8 muestras del núcleo RH y 4 muestras del núcleo RC1 por vapor frío en FIMS, después de realizar digestiones con agua regia y disolución acida. Se usó el material de referencia USGS GXR-4 como control de calidad, y se obtuvo 106% de recuperación.

### **2.2.7 BPCs y POCs**

El análisis de las muestras se realizó de acuerdo a la técnica propuesta por Zeng y Vista (1997). Para la extracción de compuestos se pesaron ~30 g de sedimento. Posteriormente se colocaron en dedales de porcelana. A cada muestra se agregaron estándares surrogados (TCMX y BPC-209) y posteriormente se colocaron en el sistema de extracción soxhlet por 12 hrs. Se agregaron 200 ml diclorometano y esferas de alambre de cobre activadas para remover impurezas por sulfuros. Cada extracto fue concentrado mediante el intercambio de solvente por hexano, y posteriormente fue reducido a 1 ml, bajo un flujo suave de Nitrógeno. La fraccionación y purificación de los extractos se realizó mediante el uso de cromatografía por columna de vidrio con alúmina: sílica gel en una razón de 1:2. Los extractos fueron eluidos con n-hexano puro para la primera fracción y una mezcla de 70:30 (v/v) de diclorometano:hexano para la segunda fracción. Esta última contiene los BPCs y POCs, este extracto fue colectado y finalmente concentrado a 0.5 ml, bajo un flujo suave de nitrógeno. Se adicionaron estándares internos a las muestras, previos al

análisis instrumental. Los BPCs y POCs fueron cuantificados con un cromatógrafo de gases (CG) HP6890 Plus con detector (ECD) de captura de electrones Ni equipado con una columna de 60 m x 0.32 mm (0.25 $\mu$ m DBXLB columna J&W). Algunos compuestos (4,4' DDE, 4,4' DDT ) y congéneres (BPC-138, 194 y 206) fueron confirmados con un cromatógrafo de gases Agilent 5975C Series GC acoplado con un selector de masas. Las concentraciones de BPCs y POCs fueron determinadas mediante el uso de estándares internos.

Como control de calidad se usaron blancos de procedimiento y estándares de referencia. Además se consideró el porcentaje recuperación de estándares surrogados. El porcentaje de recuperación fue en promedio de  $80 \pm 10$  % en el núcleo RH y  $80 \pm 20$  % en el núcleo RC5. La eficiencia de procedimiento se estimó colocando un material de referencia para sedimentos marinos SMR-1941b-NIST, a cada 10 muestras. El límite de detección fue calculado en 20 muestras. Para RH fue de 0.0005 ng g<sup>-1</sup> y para RC5 fue de 0.002 ng g<sup>-1</sup>. Todos los resultados son presentados en concentraciones de peso seco.

### **2.2.8 Análisis de <sup>210</sup>Pb y <sup>137</sup>Cs**

El análisis de <sup>210</sup>Pb y <sup>137</sup>Cs de las 8 muestras seleccionadas a diferentes profundidades en los núcleos RC1 y RH, se realizó, por conteo mediante un detector gamma de germanio hiperpuro marca Canberra. Los primeros 5 cm del núcleo RH estaban saturados con agua, por lo que no se consideró para este análisis. El detector se calibró por la energía y la eficiencia del equipo, y se realizaron correcciones por muestra en cada transmisión usando geometrías apropiadas de varias densidades y estándares certificados marca Isotope Products. Se calculó la densidad del sedimento seco y posteriormente se almacenó por 21 días en vasos sellados, para asegurar el equilibrio entre <sup>226</sup>Ra

y su hijo, el gas  $^{222}\text{Rn}$ . El conteo se llevó a cabo con una precisión de 5-10%, con un tiempo máximo de conteo de 72 hrs.

El  $^{210}\text{Pb}$  total se determinó mediante el conteo de la actividad de este isótopo en su energía específica gamma (46.5 Kev). La estimación de la actividad de  $^{210}\text{Pb}$  en exceso o no soportado, se realizó sustrayendo los promedios de energía de las actividades de los hijos de  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{214}\text{Pb}$  (351.9 keV) y  $^{214}\text{Bi}$  (609.3)) y asumiendo su equilibrio secular (Joshi, 1987). La sustracción de la actividad promedio del  $^{210}\text{Pb}$  total (46.5 keV) obtenido es una estimación del  $^{210}\text{Pb}$  no soportado presente en cada profundidad en los sedimentos (Appleby y Oldfield, 1978; Smith y Hamilton, 1992). Los conteos por unidad de tiempo fueron transformados a decaimientos usando las curvas de calibración y expresados en  $\text{Bq kg}^{-1}$ . Sin embargo, no fue posible aplicar los modelos de depósito de sedimento constante y flujo variable (Carroll y Lerche, 2003), dada las bajas o nulas concentraciones de  $^{210}\text{Pb}$  no soportado y su distribución heterogénea. El procedimiento para conteo de  $^{137}\text{Cs}$  se llevó a cabo utilizando su energía específica gamma (661.6 keV), calibrando en energía y eficiencia con material de referencia y geometrías diseñadas. Dada la ausencia de este radioisótopo antropogénico, tampoco se pudo utilizar como un marcador temporal adicional.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Sedimentología y facies sedimentarias

De manera general, los 6 núcleos que se presentan en la Fig. 4, tienen abundancias y distribuciones en porcentaje del tamaño de sedimento (arcilla, limo y arena) similares. Éstos núcleos, excepto por el de CSC, presentan alternancia de capas de sedimentos ricos en arcillas (máx. 68% arcilla) y limos (máx. 81% limos), con algunas capas de limos acompañadas por la presencia de arena (máximos de arena: 21% en RH, 30% en RC3, 15% en RC1, 10% en RC5 y 40% en RC4).

RH es el núcleo que presenta más claramente distintos períodos regulares de depósito de arcillas limosas, con interrupciones cambiando abruptamente a capas dominadas por limos arcillosos (Fig.5). En el resto de los núcleos los períodos de deposición de arcillas limosas y limos arcillosos es más irregular, En RC3 se observan únicamente en tres secciones (30-45; 65-75 y 105-110 cm) los períodos de depósito de arcillas limosas; en RC1 se presenta de los 40 cm hacia la base del núcleo, en RC5 únicamente de la mitad hacia la base del núcleo se observa un claro período constante de deposición de arcilla limosa, similar a lo observado RH; en RC4 predominan los sedimentos limosos y únicamente de los 35-45 cm predominan los limos-arcillosos. Esta información nos permite proponer una asociación de capas de sedimentos a lo largo del los núcleos (Fig. 5).

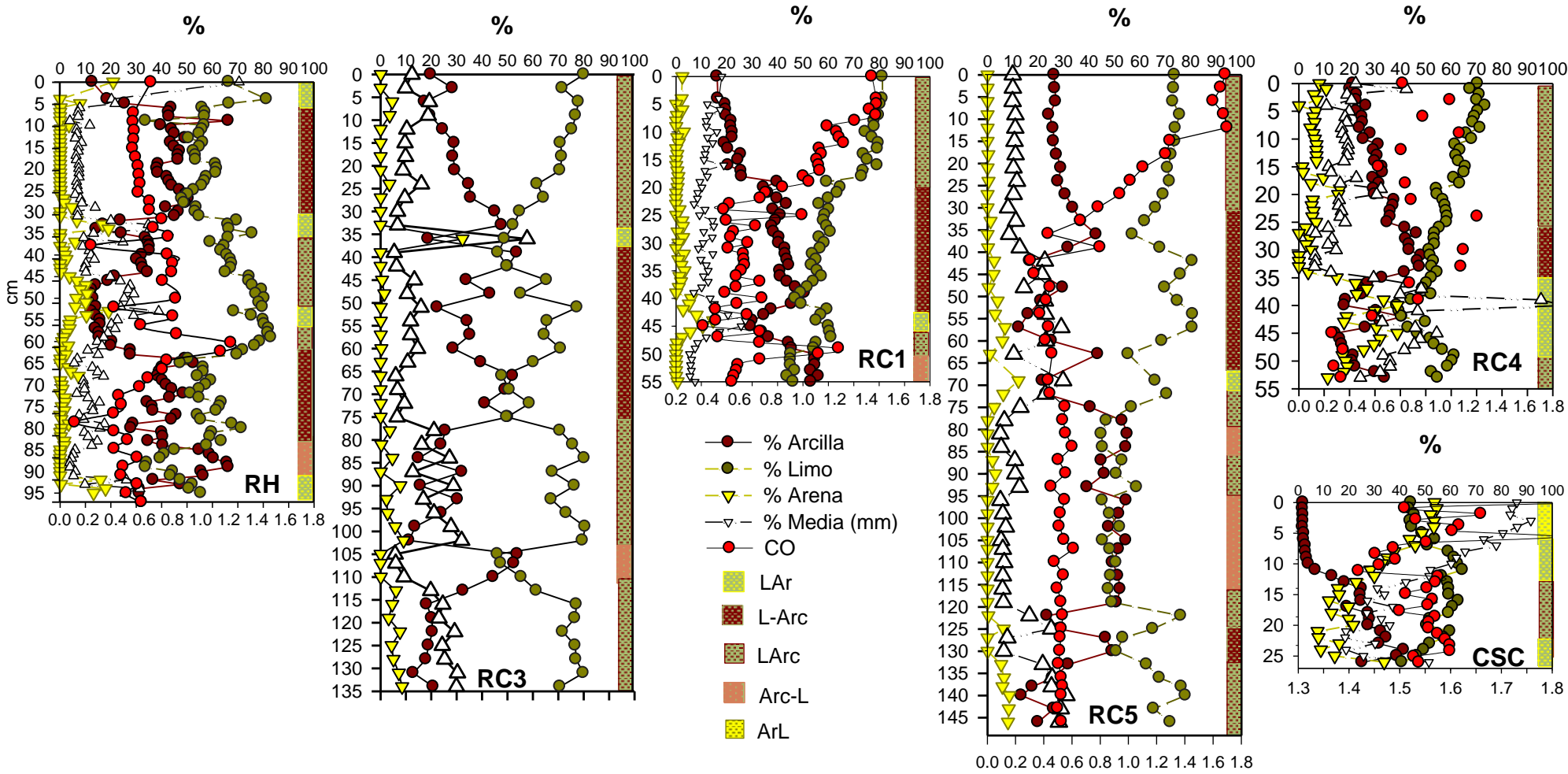


Figura 5. Distribución de los porcentajes de arenas, limos, arcillas y media textural ( $\mu$ m), facies sedimentarias y %CO (excepto para RC3) en núcleos extraídos en el RH, RC y CSC.

El núcleo CSC presenta una distribución del tamaño de sedimento diferente al resto de los núcleos, debido a que este se encuentra fuera de la recarga del cauce del RC, en las proximidades al desierto de Sonora. El núcleo CSC presenta una capa predominante de arenas y limos con ausencia de arcillas en los primeros 11 cm (Fig.5). Debajo de esta capa arenosa, se observa un cambio abrupto hacia el sedimento rico en arcilla y limos, el cual podría asociarse al tiempo previo a la interrupción del flujo del RC hacia la CSC.

En todos los núcleos la abundancia de arena, cuando está presente, alterna con los limos (Fig. 5). La variación de la abundancia y el tamaño de sedimento de estos horizontes, sugieren que las tasas y procesos de depósito de sedimento fueron diferentes a lo largo del cauce del RC. Las capas arcillosas comúnmente presentan una variación de color café a café-rojizo.

La abundancia y distribución del tamaño de sedimento se usó para interpretar los cambios en los ambientes sedimentarios del delta RC. Con base en esto se sugieren dos facies sedimentarias dominantes: Limo arcillosa y arcilla limosa (Fig. 5), lo que nos indica que estas dos facies sedimentarias estuvieron sujetas a diferentes condiciones hidrodinámicas. De acuerdo a Shepard (1974) se identificaron las siguientes facies sedimentarias; LAr Limo arenosa; L-Arc Limo-Arcilla; LArC Limo arcillosa; Arc-L Arcilla-Limo; ArL Arena limosa (Fig. 5). Las facies LAr y LArC están presentes en todos los núcleos. En el núcleo RH, la LAr se encuentra a los 30-35 y 55 cm, y la LArC a los 35-55 y 60-65 cm. También presenta otros horizontes aislados de LAr en la superficie (0 – 10 cm) y en la base del núcleo (90-95 cm). El enriquecimiento en arena acompañado de una disminución de arcillas a los 31-34 cm en RH, tiene una geometría similar al enriquecimiento observado en RC1 a los 42-45 cm y los 65-75 cm de RC5 (Fig. 5), dichos horizontes se emplearon para correlacionar estratigráficamente éstos núcleos. En el resto de los núcleos también se

observó un enriquecimiento de arenas acompañados de la disminución de arcillas (RC3, RC4 y CSC).

Previo a la construcción de las presas en el delta RC, la arcilla era el tamaño de sedimento dominante aportado a través de los flujos del RC hasta el GC. Esto ha sido confirmado en el Alto Golfo de California por Daesslé et al. (2004), quienes realizaron un estudio en núcleos de sedimentos y reportan una capa masiva de arcilla color café rojizo, debajo de una capa de arena limosa superficial.

Las facies ArcL se registraron en 4 de los 6 núcleos analizados (RH, RC1, RC3 y RC5), ésto debido probablemente a que estos 4 núcleos fueron extraídos dentro de una zona del delta del RC, donde las fuentes de sedimento, los aportes de agua, la morfología de los cauces y arroyos provocaron una dinámica de depositación de sedimento distinta para cada sitio. De manera general sí fue posible registrar y comparar los mayores aportes de sedimento entre estos núcleos, ya que en los núcleos no.

### **3.2 Carbono Orgánico**

La distribución vertical del % CO a lo largo de los núcleos se presenta en la figura 5. De manera general el promedio del CO varía de la siguiente manera, en el núcleo RH es de 0.6 % (0.1 mín. y 1.2 máx.), en RC1 de 0.8 % (0.4 mín. y 1.5 máx.), en RC5 es de 0.5 % (0.3 mín. y 1.7 máx.), en RC4 0.8 (0.2 mín. y 2.1 máx.) y CSC es de 1.6 % (1.4 mín. y 1.9 máx.).

La asociación de la distribución vertical del CO con el tamaño de grano dominante a lo largo de los núcleos (Fig. 5) nos sugiere que, la preservación del CO fue controlada parcialmente por procesos sedimentarios. Sin embargo,

esta asociación es diferente entre los núcleos, con respecto al tipo de sedimento y la profundidad de cada uno. El enriquecimiento de CO en la superficie de RC1, RC4, RC5 y CSC, refleja la acumulación reciente de materia orgánica, misma que no ha sido aun oxidada a través del proceso de diagénesis temprana (óxica/subóxica). El máximo de CO (57-58 cm) en RH, está debajo de un horizonte de arena (52-53 cm), el cual probablemente fué depositado rápidamente, inhibiendo la disponibilidad de oxígeno disuelto desde la superficie que pudiera oxidar el CO. Lo mismo se puede observar a los 49 cm de RC1. De manera general no fue posible identificar una correlación estadística entre la distribución vertical del CO entre los núcleos con la distribución del tamaño de sedimento. Sin embargo, se observa una mayor relación de éste con los limos. Ya que todos los núcleos (excepto RH) muestran un incremento en CO hacia la superficie. El enriquecimiento superficial inicia a la misma profundidad donde inicia el máximo superficial de la capa de limos. Estos enriquecimientos en CO son indicativos de un frente diagenético y/o un incremento en el depósito biogénico en tiempos más recientes.

El CO y la asignación de las facies sedimentarias para los núcleos, se compararon entre sí, con el fin de elucidar la asociación de los contaminantes inorgánicos y orgánicos al tamaño de sedimento.

### **3.3 Óxidos mayores y elementos traza**

La distribución de las concentraciones de los óxidos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MnO}$  se presentan en la figura 6 y la de los elementos traza en la figura 7 (As, Cu, Cr, Pb y Hg). Los resultados de concentración de todos los elementos analizados, se presentan en la Tabla X del anexo.

Como se puede observar en las figuras 5 y 6, la distribución de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es similar a la distribución de arcillas. Estadísticamente estas variables se asocian en el mismo componente principal (ver Tabla I en la sección 3.4). Los máximos porcentajes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , se registraron en las facies LArc y ArcL en todos los núcleos y los máximos valores se observan en la superficie y base del núcleo en RH.

La distribución de CaO y MnO presentan una variación similar entre sí y en el RH presentan una distribución especular con respecto a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . En el resto de los núcleos únicamente el CaO presenta una marcada imagen especular con respecto al  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , presenta poca variación vertical a lo largo de los núcleos, con un máximo de 5% de concentración. Daesslé et al. (2002) encontraron una correlación entre los óxidos de Ca y Mn en sedimentos del alto Golfo de California. En ésta región se infiere que el Mn posiblemente es parte de los minerales de carbonato de calcio, más que de los sedimentos detríticos dominantes. Un máximo superficial de MnO en los núcleos RC1 y CSC, sugiere que dicho elemento se movilizó hacia la superficie debido a la reducción de MnO durante el proceso de oxidación de la materia orgánica en sedimentos subóxicos subsuperficiales (Fig. 6).

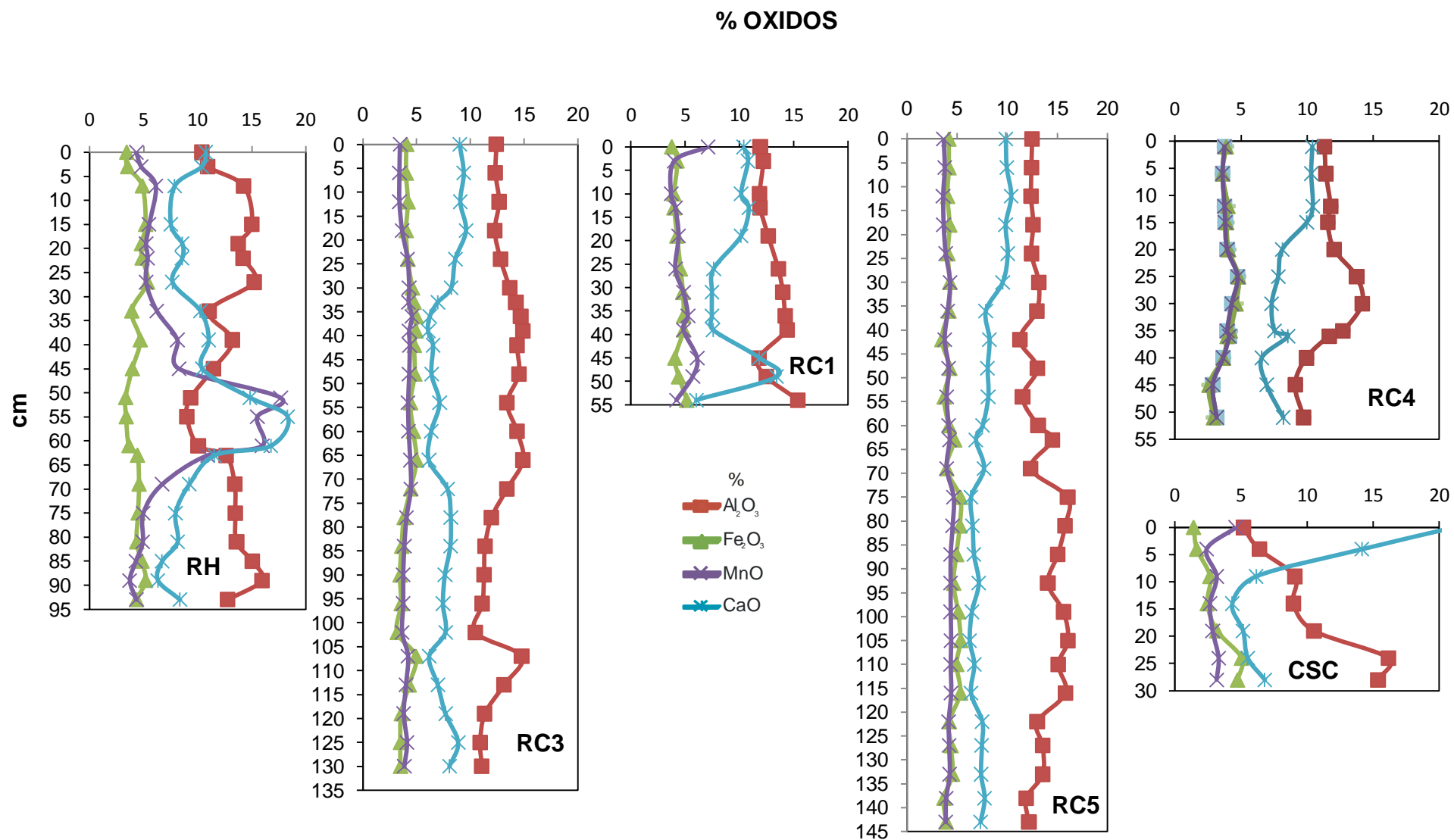


Figura 6. Concentraciones de Óxidos mayores ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ , y  $\text{CaO}$ ) en núcleos del delta RC.

## Concentraciones de metales

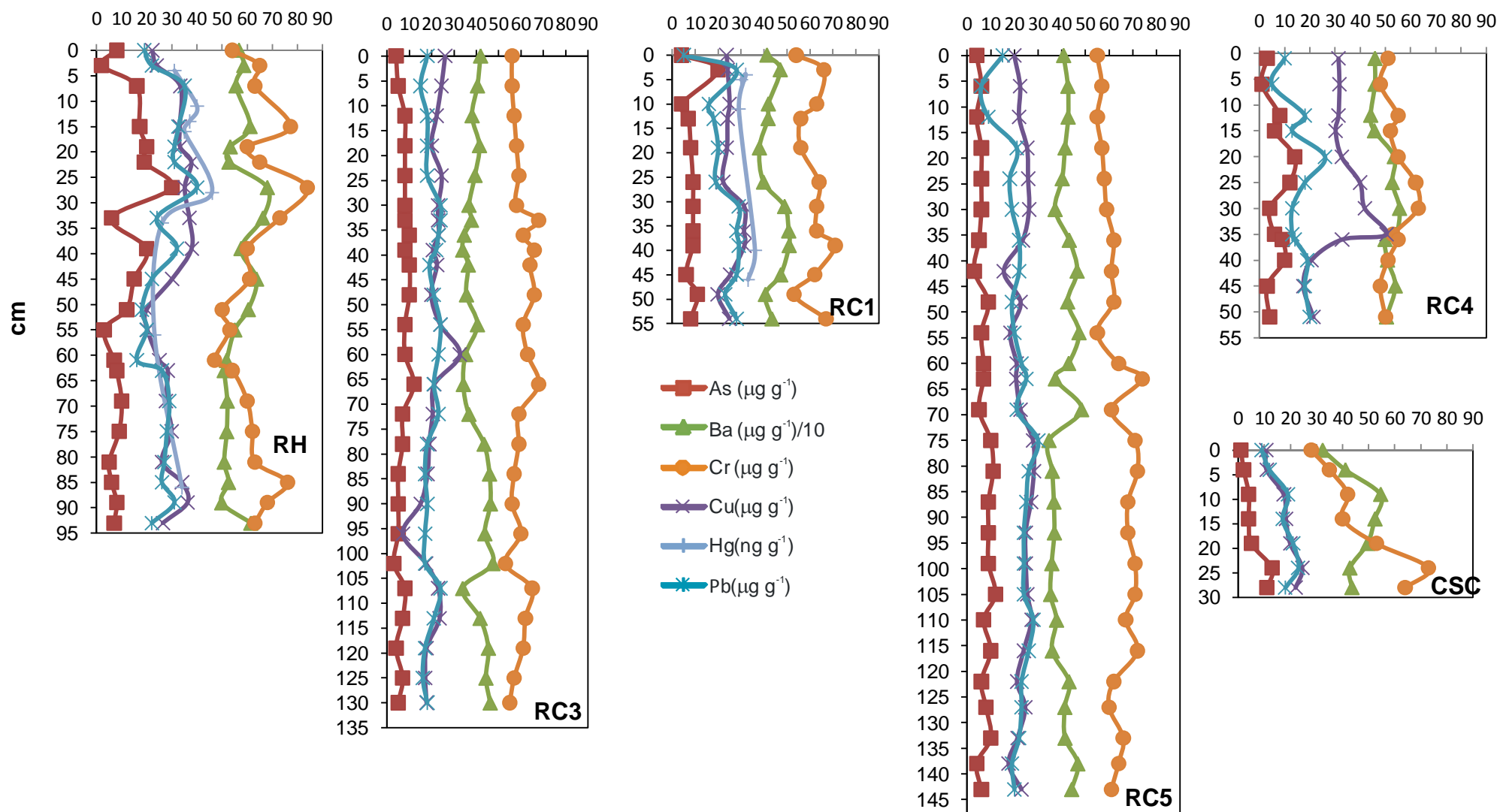


Figura 7. Concentraciones de As, Ba, Cr, Cu, Hg y Pb en núcleos del delta RC.

Por lo general, el CaO varía poco a lo largo de los núcleos y normalmente se tiene una concentración de 10-20% (Fig. 6). Todos los núcleos muestran un enriquecimiento de CaO en la superficie. El enriquecimiento superficial de CaO coincide en todos los núcleos con la facies L-Arc (Figs. 5 y 6). El máximo en CSC se presenta en la facies Lar. Estos máximos de CaO conciden con los enriquecimientos en CO lo que indica una mayor acumulación y/o preservación de restos biogénicos en tiempos recientes, los picos de CaO y MnO en los núcleos RH, RC1, RC4 y RC5 coinciden con a una capa arenosa a los 55 cm en RH, a los 50 cm en el núcleo RC1, justo debajo de una capa de limo, a los 35 cm en RC4 a los 70 cm en RC5 y hacia la base de CSC (Figs. 5 y 6). El núcleo CSC presenta diferente distribución CaO al resto de los núcleos.

La mayoría de los elementos traza presentan una distribución similar a lo largo de todos los núcleos excepto para RH (Fig. 7), donde las concentraciones son más altas con respecto al resto de los núcleos (Tabla XI del anexo). También son similares a la distribución de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Fig. 6), por lo que se encuentran enriquecidos en las facies L-Arc y L-Arc.

De manera general entre los 6 núcleos considerados, las concentraciones de los elementos traza se presentaron de la siguiente forma (Fig. 7): en la parte superior de los núcleos RH y RC1 se observan las relativamente altas concentraciones de As, Ba, Cu y Pb que coinciden en las facies L-Arc y L-Arc. En estos núcleos el As presenta un intervalo de concentración de 0-30  $\mu\text{g g}^{-1}$  (máximo y mínimo RH), el Cr 28-85  $\mu\text{g g}^{-1}$  (máximo y mínimo RH), el Hg 20-45  $\text{ng g}^{-1}$  (máximo y mínimo RH) en la facies L-Arc y el Pb 2-38  $\mu\text{g g}^{-1}$  (máximo RH y mínimo RC1) en las facies L-Arc y LARC respectivamente. Diversos los máximos subsuperficiales se presentan en el todos los núcleos.

Para identificar posibles enriquecimientos de los elementos traza con respecto a su concentración en la matriz del sedimento, se calculó el factor de enriquecimiento (FE) de acuerdo al procedimiento establecido por Covelli y

Fontolan (1997) y Herut y Sandler (2006). Éste factor se calculó con el uso de la razón descrita en la ecuación 1. Se consideró la base del núcleo RH, como el sedimento más viejo disponible y por lo tanto no afectado por contaminantes. De esta forma, se divide la concentración del elemento traza entre el  $Al_2O_3$  de una muestra determinada y se normaliza contra la misma relación en la muestra de la base del núcleo:

$$FE = \frac{\left[ \frac{E}{Al_2O_3} \right]_{muestra}}{\left[ \frac{E}{Al_2O_3} \right]_{base\ nucleo}} \quad \dots\dots\dots \quad Ecuación\ 1$$

En la figura 8 se presenta la distribución de los FE para cada uno de los núcleos del delta del RC, donde se observa que en todos los núcleos se obtuvo un FE >1 para As. Sin embargo, los máximos FEs para As se presentaron en RH, RC1 y RC4 (Fig. 8A). El máximo FE de As fue > 3 en el núcleo RH. Los núcleos RH, RC1 y RC4 también presentan un FEs >1 para Pb y Cu (Fig. 8B y B).

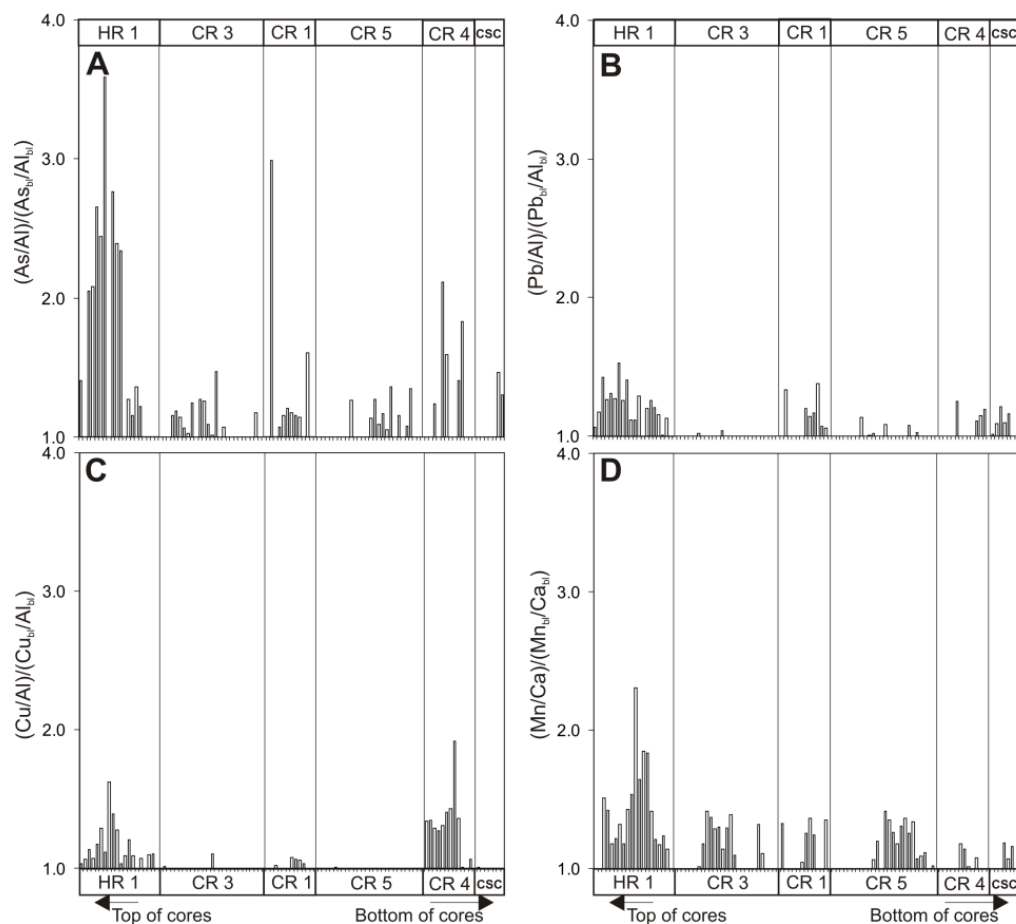


Figura 8. Factores de enriquecimiento de As, Cu, Pb, con respecto al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Mn con respecto a CaO en nucleos del delta del RC.

En vista de que la adsorción de elementos traza a MnO y la diagénesis de este pudiera ser un mecanismo de enriquecimiento de elementos traza, también se calculó el FE del MnO con respecto al CaO (elemento con el que se correlaciona) (Fig. 8D). Sin embargo, se observó únicamente un solo traslape entre los picos de los FE de As y MnO, lo que nos sugiere que el enriquecimiento de As en sedimentos no está controlado por el MnO y/o por su diagénesis.

### 3.4 Componentes principales

El análisis estadístico de todos los datos del presente estudio se realizó con el software STATISTICA versión 8.0 2008. Se emplearon componentes principales, con el método de rotación Varimax y se consideraron como variables el % arcillas, todos los elementos traza (excepto Hg) y %LOI, para los 6 núcleos. Se aplicó estadística multivariada para identificar los distintos componentes geoquímicos del sedimento. Se determinaron tres componentes principales que en conjunto son responsables por el 74% de la varianza total (Tabla I).

El primer componente (CP-1) tiene una carga significativa positiva para la mayoría de las variables reportadas, excepto  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , Ba, Sr y Zr. CP-1 explica el 51% de la varianza total y se identifica como el componente arcilloso rico en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y metales traza. El CP-2 describe el 15% del total de la varianza, con una carga significativa positiva para %LOI,  $\text{CaO}$ , Sr y  $\text{MnO}$  lo que sugiere que este factor describe el componente de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Dado que CP-2 también agrupa a los  $\text{MnO}$ , es probable que este elemento esté presente como parte de los carbonatos de calcio y/o como carbonatos de Mn (rodrocrosita). La carga significativa negativa en CP-2 para  $\text{SiO}_2$  y Na, señala que estos elementos probablemente están presentes como cuarzo y plagioclasa-Na de las muestras aisladas con arena.

**Tabla I.** Análisis de componentes principales (Varimax) de los núcleos del delta del RC.

Variable	CP-1	CP-2	CP-3
% Arcillas	<u>0.83</u>	0.03	-0.06
SiO <sub>2</sub>	-0.33	-0.92	0.01
TiO <sub>2</sub>	<u>0.88</u>	-0.06	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>0.97</u>	-0.12	-0.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>0.98</u>	0.03	0.02
MnO	-0.07	<u>0.55</u>	0.37
MgO	<u>0.89</u>	-0.06	-0.34
CaO	-0.51	<u>0.80</u>	0.04
Na <sub>2</sub> O	-0.38	-0.50	-0.07
K <sub>2</sub> O	<u>0.89</u>	-0.40	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<u>0.79</u>	0.22	0.19
% LOI	0.02	<u>0.96</u>	-0.03
As	<u>0.55</u>	0.09	<u>0.54</u>
Ba	-0.12	-0.02	<u>0.91</u>
Ce	<u>0.52</u>	-0.06	0.17
Co	<u>0.78</u>	0.05	0.25
Cr	<u>0.89</u>	-0.17	0.16
Cu	<u>0.53</u>	0.20	<u>0.42</u>
Ga	<u>0.95</u>	0.02	-0.02
La	<u>0.64</u>	0.05	0.26
Nb	<u>0.84</u>	-0.18	0.18
Ni	<u>0.78</u>	-0.35	-0.09
Pb	<u>0.62</u>	-0.16	<u>0.48</u>
Rb	<u>0.86</u>	0.10	<u>0.41</u>
Sr	-0.55	<u>0.78</u>	0.04
V	<u>0.95</u>	0.05	0.09
Y	<u>0.72</u>	-0.33	-0.19
Zn	<u>0.92</u>	0.13	0.21
Zr	-0.61	-0.31	0.28
<b>% Varianza Total</b>	51	15	8

Finalmente, el CP-3, agrupa a elementos como el As, Ba, Cu y Pb con una carga positiva y es responsable por el 8% de la varianza total. Dado que los

elementos As, Cu y Pb son elementos asociados a plaguicidas inorgánicos (arseniatos), es probable que este componente represente una fuente antropogénica.

Es probable que el Ba en CP-3 se asocie a los lodos de perforación de la geotermia. Adicionalmente se evaluaron los puntajes (scores) del CP-3 para cada muestra individualmente y su distribución (para el núcleo RH), se presenta en la figura 9.

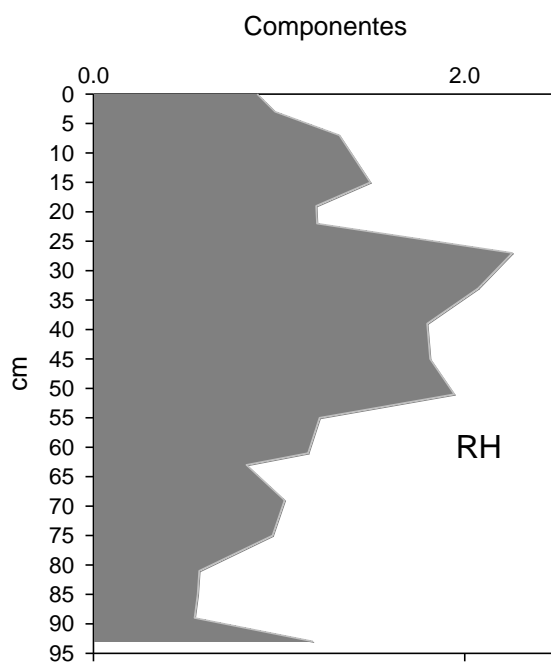


Figura 9. Distribución de los puntajes para CP-3 en el núcleo RH (As, Ba, Cu y Pb) determinados a partir del análisis de CP.

Dado que es el núcleo más enriquecido en As, Pb y Cu. Se observa que el CP-3 en el núcleo RH es significativo entre los 5-50 cm de profundidad (Figura 8), lo cual coincide con el horizonte rico en limos, de las facies LArc y L-Arc. Para el núcleo RC5 los puntajes son significativos entre 0 y 30 cm, lo cual coincide con la facie LArc.

### 3.5 Actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$ y $^{137}\text{Cs}$

Las actividades de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  fueron muy bajas en la mayoría de las muestras, con un promedio de  $18 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Tabla III). El núcleo RC1 presentó la más baja actividad ( $0\text{-}14 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) y el RH ( $12\text{-}66 \text{ Bq kg}^{-1}$ ). La máxima actividad se registró a los 40-41 cm en ambos núcleos y en los primeros centímetros. Esto indica que tanto la sedimentación como los flujos de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  atmosférico no fueron constantes y variaron significativamente desde los 50 cm hacia la superficie. A manera de ejercicio, con la aplicación del modelo de tasa de suministro de sedimento constante (por sus siglas en inglés Constant Rate Sedimentation) para el núcleo RH, se sugiere una tasa de depósito de sedimento de  $0.9 \text{ cm a}^{-1}$  entre los 28-41 cm. Aunque se debe considerar que la aplicación de este modelo no es confiable, la sola presencia de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  a los 51 cm en el núcleo RH permite inferir una tasa de sedimentación de  $0.3\text{-}0.5 \text{ cm a}^{-1}$ , con base en el límite de detección de las 5 a 7 vidas medias de  $^{210}\text{Pb}$  (22 años). En ambos núcleos la actividad de  $^{137}\text{Cs}$  no fue detectada en ningún horizonte.

**Tabla II.** Datos radiométricos de los núcleos RC1 y RH.

Núcleo	$^{210}\text{Pb}$ ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )			$^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )
	Total	Soportado	No soportado (exceso)	
<b>RC1</b>				
0–3 cm	$28.2 \pm 2.0$	$24.2 \pm 1.2$	$4.0 \pm 0.3$	n.d.
7–8 cm	$37.1 \pm 2.2$	$28.2 \pm 1.4$	$9.0 \pm 0.7$	n.d.
19–20 cm	$24.3 \pm 2.7$	$24.2 \pm 1.5$	$0.1 \pm 0.0$	n.d.
40–41 cm	$53.3 \pm 3.2$	$39.2 \pm 1.6$	$14.0 \pm 1.0$	n.d.
<b>RH</b>				
6–7 cm	$80.1 \pm 5.6$	$56.5 \pm 2.3$	$23.7 \pm 1.9$	n.d.
27–28 cm	$76.8 \pm 5.4$	$61.1 \pm 2.4$	$15.7 \pm 1.3$	n.d.
40–41 cm	$133.3 \pm 8.0$	$67.6 \pm 2.0$	$65.7 \pm 4.4$	n.d.
50–51 cm	$63.1 \pm 3.8$	$51.3 \pm 2.6$	$11.8 \pm 0.9$	n.d.

## 3.6 COPs

### 3.6.1 BPCs

De manera general las concentraciones obtenidas para los 32 congéneres de BPCs, fueron menores a los obtenidos para POCs. Los intervalos de concentración de  $\Sigma$ BPCs van de 0.07-4.5 ng g<sup>-1</sup> para el núcleo RH y de 0.07-4.1 ng.g<sup>-1</sup> para el núcleo RC5 (Tabla III). En el núcleo RH, hay mayor proporción de congéneres de alto peso molecular de BPCs-HMW (High Molecular Weight BPC-90 a BPC-209) comparado con los de bajo peso molecular BPCs-LMW (Low Molecular Weigh BPC-17 a BPC-74) (Fig. 10). En el núcleo RH el BPC-138, fué el más abundante, seguido del BPC-194,198 y 206. En contraste, el núcleo RC5 tiene una mayor proporción de congéneres de BPC-LMW, de los cuales el BPC-28 es el más abundante seguido por el BPC-HMW 101, 194 y 195 (Fig. 11).

**Tabla III.** Concentraciones en ng g<sup>-1</sup> de los BPCs en los núcleos RH y RC5

	HR1 <sup>a</sup>				CR5 <sup>b</sup>			
	Superficie*	Núcleo			Superficie*	Núcleo		
		Media	Intervalo	$\sigma_1$		Media	Intervalo	$\sigma_1$
$\Sigma$ BPCs	2.16	1.11	0.08-4.9	1.06	2.1	1.58	0.07- 4.1	1.07
$\Sigma$ BPCs-LMW (BPC-17-74)	0	0.16	0.00-0.58	0.15	1.8	0.95	0.05- 2.3	0.15
$\Sigma$ BPCs-HMW (BPC-90-209)	2.16	0.79	0.06-4.17	0.98	0.28	0.63	0.02-2.90	0.98

\* (a) 0-3 cm, (b) 0-1 cm

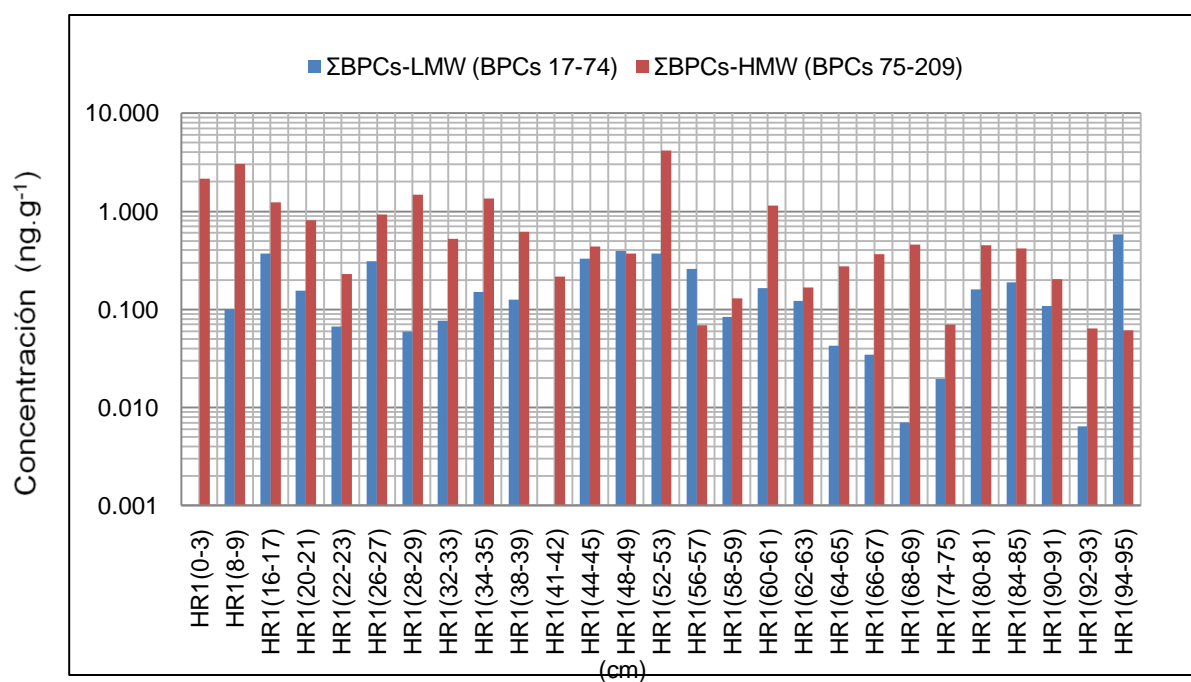


Figura 10. Comparación de las concentraciones de los congéneres de BPCs-LMW con respecto a los BPCs-HMW en RH.

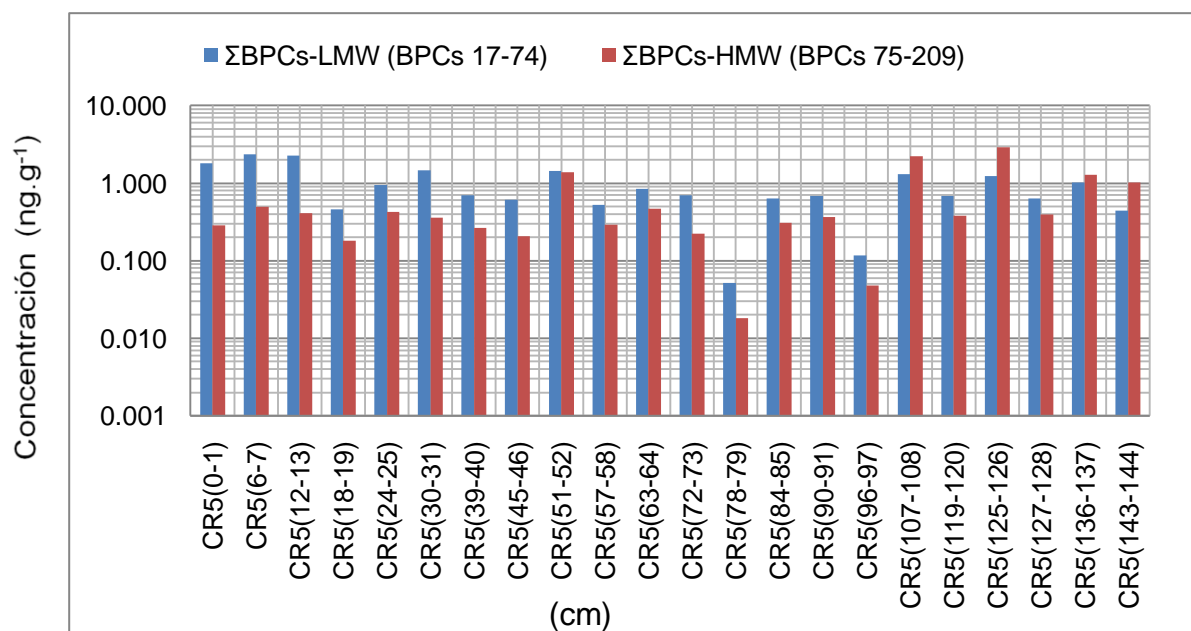


Figura 11. Comparación de las concentraciones de los congéneres de BPCs-LMW con respecto a los BPCs-HMW en RC5.

Las concentraciones de  $\Sigma$ BPCs a lo largo de los núcleos RH y RC5 no varían significativamente (Fig. 12) ya que tienen un intervalo de 0-5  $\text{ng.g}^{-1}$ , sin embargo dentro de este intervalo se observan máximos bien definidos a lo largo de ambos núcleos. En el RH los BPCs están enriquecidos entre 0-20 cm en la facies LArc, lo que coincide con una baja concentración de CO. También un pico aislado de BPCs a los 52 cm en la facie Lar coincide con una disminución de CO. En RC5 también existe un enriquecimiento en la superficie del núcleo en la facie LArc que coincide con el enriquecimiento superficial del CO. Se presentan otros tres máximos hacia la base del núcleo, a los 50, 105 y 125 cm, registrados en las facies L-Arc y ArcL. En estos horizontes la distribución constante de CO (0.4 %).

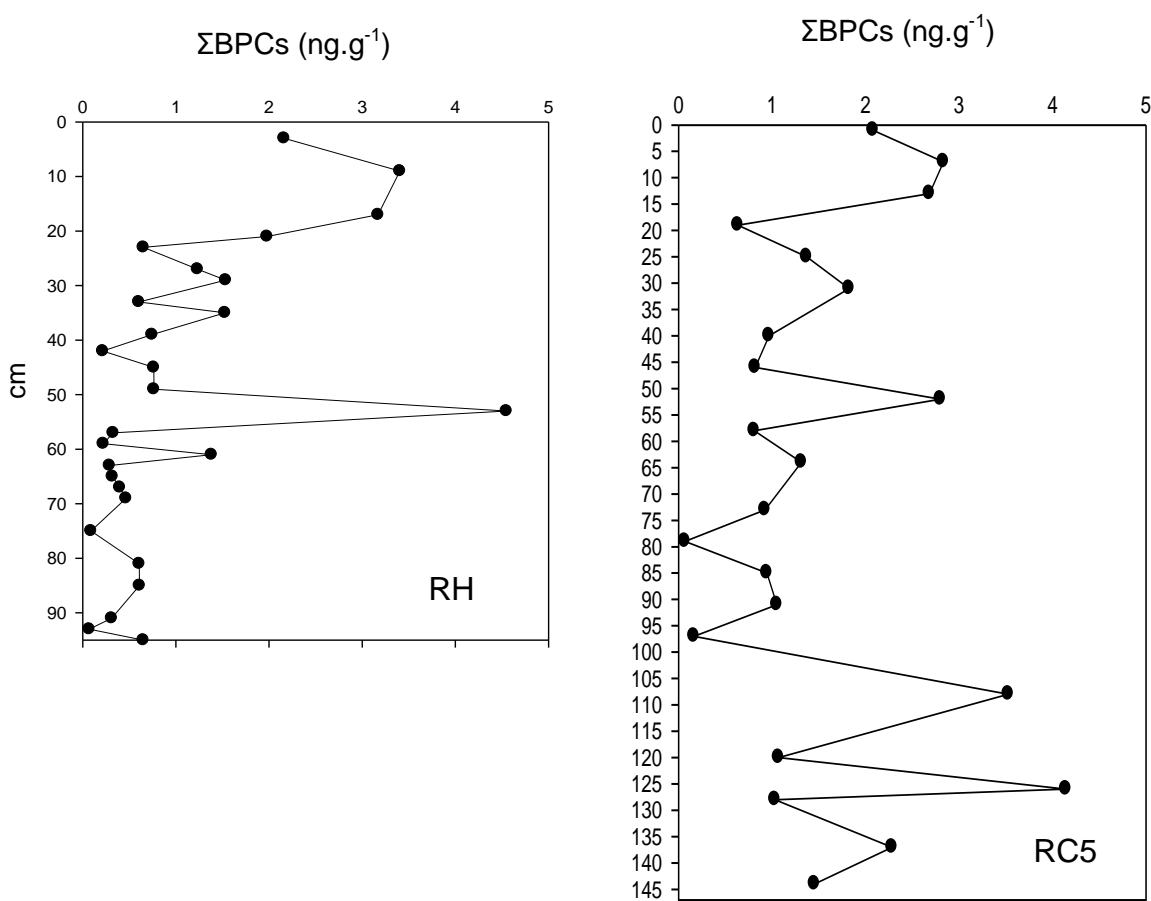


Figura 12. Distribución vertical de  $\Sigma$ BPCs ( $\text{ng.g}^{-1}$ ) en los núcleos RH y RC5.

### 3.6.2 POCs

De los 23 compuestos de POCs identificados y cuantificados, 15 se encontraron en más del 50 % de los horizontes en ambos núcleos RH y RC5, lo que sugiere una extensa contaminación por estos compuestos. El intervalo de  $\Sigma$ POCs es de 1.3 – 47.4 ng.g<sup>-1</sup> en el núcleo RH, mientras que en el núcleo RC5 fue significativamente menor, con un intervalo de 0.03-4.37 ng.g<sup>-1</sup> (Tablas IV y V).

También se calculó para ambos núcleos el % de ocurrencia y % de contribución a la concentración total de POCs. En el núcleo RH, los compuestos más frecuentemente encontrados son: el DDT (4, 4'-DDE y 4, 4' - DDT 100%) > HCHs ( $\alpha$ -HCH con 100% y  $\gamma$ -HCH con 50%), > Clordano (metoxiclor y heptaclor epóxico con 50%), > cilodienos (endrín 90% y aldrín 50%), > endosulfan (endosulfan I y endosulfan II, ambos 50%) (Fig. 13).

En contraste, en el núcleo RC5 los compuestos más frecuentemente encontrados son: clordanos (heptaclor y  $\alpha$  clordano 100%) > DDTs (4, 4'DDD y 4, 4' -DDE 91%) > HCHs ( $\alpha$  HCH 100%) > endosulfan (41%) > cilodienos (aldrin 86%) (Fig. 14).

**Tabla IV.** Plaguicidas organoclorados ( $\text{ng g}^{-1}$  peso seco) en el núcleo HR1 del delta del RC.

No.	Horizonte	HCHs	Clordanos	Cilodienos	Endosulfan	DDTs	$\Sigma$ POCs
1	0-3	0.018	0.000	0.067	0.01	9.5	9.54
2	8-9	0.845	0.363	0.054	0.30	16.7	18.29
3	16-17	1.389	0.864	0.197	0.82	37.2	40.45
4	20-21	0.012	0.026	0.407	0.00	46.9	47.39
5	22-23	0.009	0.006	0.111	0.00	22.3	22.39
6	26-27	0.061	0.003	0.200	0.00	37.4	37.71
7	28-29	0.208	0.012	0.108	0.04	37.0	37.39
8	32-33	0.055	0.087	0.009	0.00	4.7	4.83
9	34-35	0.060	0.009	0.097	0.09	14.4	14.68
10	38-39	0.073	0.000	0.054	0.00	25.5	25.66
11	41-42	0.333	0.125	0.011	0.03	33.0	33.49
12	44-45	0.036	0.029	0.042	0.06	16.7	16.84
13	48-49	0.027	1.129	0.018	0.05	8.5	9.73
14	52-53	0.179	0.032	0.030	0.02	11.7	11.91
15	56-57	0.345	0.021	0.062	0.03	5.7	6.20
16	58-59	0.143	0.028	0.006	0.02	6.4	6.61
17	60-61	0.246	0.116	0.019	0.00	4.5	4.87
18	62-63	0.019	0.009	0.069	0.04	5.0	5.16
19	64-65	0.021	0.000	0.026	0.00	9.0	9.01
20	66-67	0.020	0.014	0.030	0.03	3.2	3.31
21	68-69	0.016	0.000	0.003	0.01	2.8	2.87
22	74-75	0.044	0.002	0.007	0.00	7.2	7.31
23	80-81	0.168	0.033	0.034	0.06	16.7	16.98
24	84-85	0.526	0.019	0.092	0.08	5.3	6.02
25	90-91	0.725	0.000	0.037	0.05	4.5	5.28
26	92-93	0.039	0.033	0.038	0.01	1.2	1.33
27	94-95	0.015	0.830	0.000	0.00	1.1	1.91

**Tabla V.** Plaguicidas organoclorados ( $\text{ng.g}^{-1}$  peso seco) en el núcleo RC5 del delta del RC.

No.	Horizonte	HCHs	Clordanos	Cilodienos	Endosulfan	DDTs	$\Sigma$ POCs
1	0-1	0.58	2.24	0.04	0.00	1.18	4.03
2	6-7	0.44	3.03	0.05	0.54	0.31	4.37
3	12-13	0.21	2.89	0.03	0.00	1.13	4.25
4	18-19	0.07	0.93	0.00	0.14	0.87	2.01
5	24-25	0.13	1.55	0.01	0.01	1.56	3.27
6	30-31	0.18	1.62	0.08	0.19	1.47	3.56
7	39-40	0.11	0.87	0.01	0.00	0.31	1.31
8	45-46	0.07	0.57	0.06	0.00	0.29	1.01
9	51-52	0.10	0.86	0.02	0.00	0.68	1.74
10	57-58	0.09	0.67	0.00	0.07	0.31	1.17
11	63-64	0.07	0.78	0.01	0.00	0.24	1.10
12	72-73	0.09	0.84	0.00	0.02	0.14	1.11
13	78-79	0.41	0.45	0.02	0.00	0.29	1.17
14	84-85	0.12	0.92	0.02	0.03	0.42	1.51
15	90-91	0.09	1.05	0.03	0.02	0.40	1.60
16	96-97	0.02	0.11	0.09	0.00	0.08	0.30
17	107-108	0.32	1.05	0.28	0.60	1.13	3.41
18	119-120	0.31	0.68	0.08	0.03	0.57	1.69
19	125-126	0.41	1.00	0.26	0.04	0.62	2.42
20	127-128	0.19	0.60	0.04	0.06	0.61	1.52
21	136-137	0.42	0.96	0.08	0.03	1.13	2.66
22	143-144	0.27	0.60	0.04	0.02	1.10	2.06

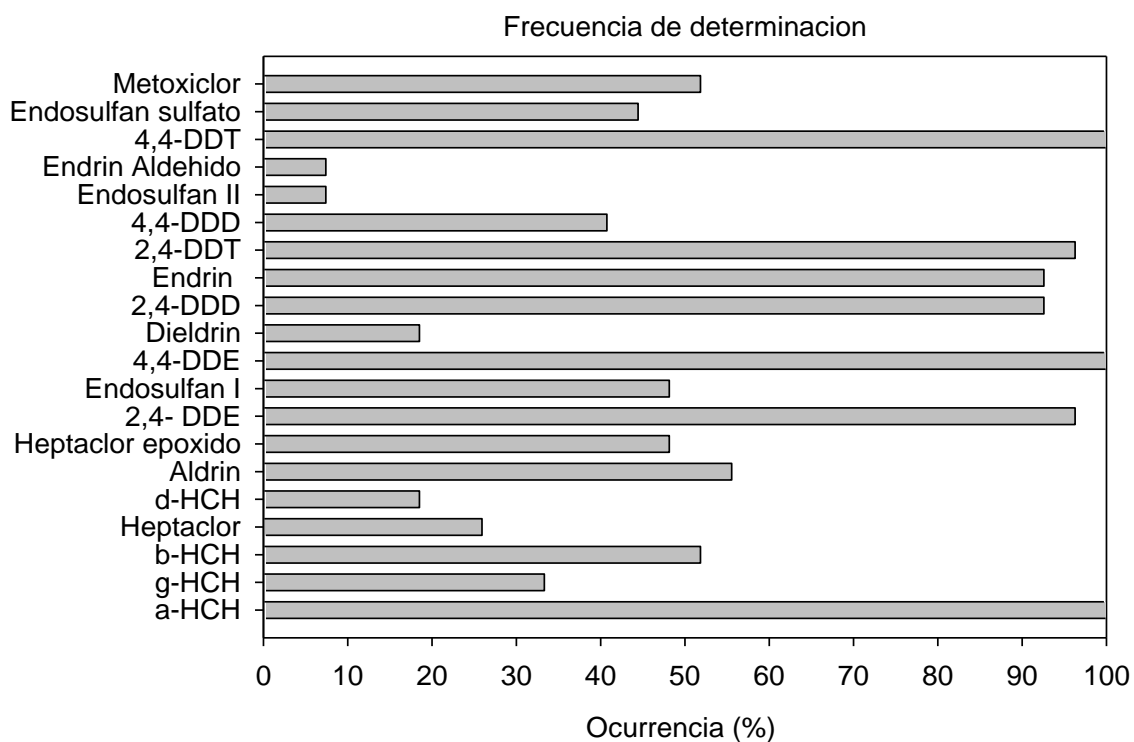


Figura 13. Frecuencia de aparición de los POCs en RH.

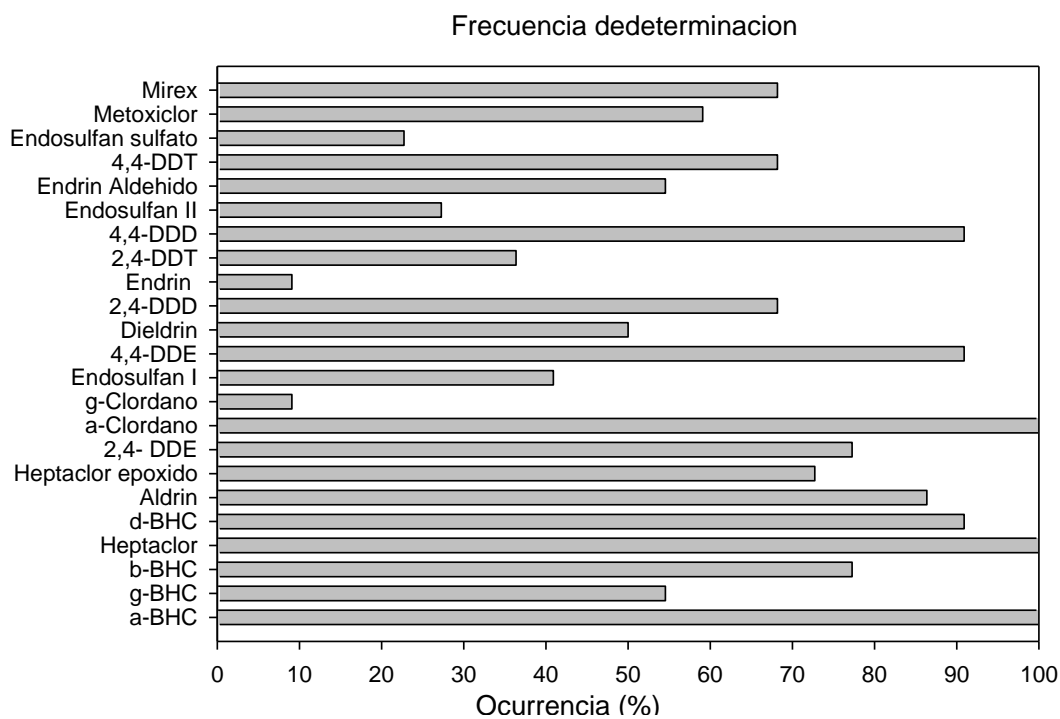


Figura 14. Frecuencia de aparición de los POCs en RC5.

Los POCs presentan una distribución vertical distinta entre los núcleos RH y RC5. De manera general ambos núcleos presentan las máximas cocentraciones hacia la superficie y disminuyen hacia la base. Sin embargo, los intervalos de concentración de RH con respecto a RC5, presentan concentraciones máximas de  $46 \text{ ng g}^{-1}$ , mientras que en RC5 el intervalo de concentración es un orden de magnitud inferior ( $4.6 \text{ ng g}^{-1}$ ). RH presenta tres máximos en la parte superior del núcleo ( $47.7 \text{ ng g}^{-1}$  a los 20-21 cm;  $37.5 \text{ ng g}^{-1}$  a los 28-29 cm y de  $33 \text{ ng g}^{-1}$  a los 40-41cm) y disminuyen su concentración hacia la base del núcleo. El núcleo RC5 presenta dos máximos en la parte superior ( $3.5 \text{ ng g}^{-1}$  a los 30-31 cm y  $4 \text{ ng g}^{-1}$  a los 13-14 cm). También presenta tres máximos de concentración hacia la base ( $3.4 \text{ ng g}^{-1}$  a los 108-109 cm;  $2.5 \text{ ng g}^{-1}$  a los 125-126 cm y de  $2.6 \text{ ng g}^{-1}$  a los 138-139 cm). (Fig. 15).

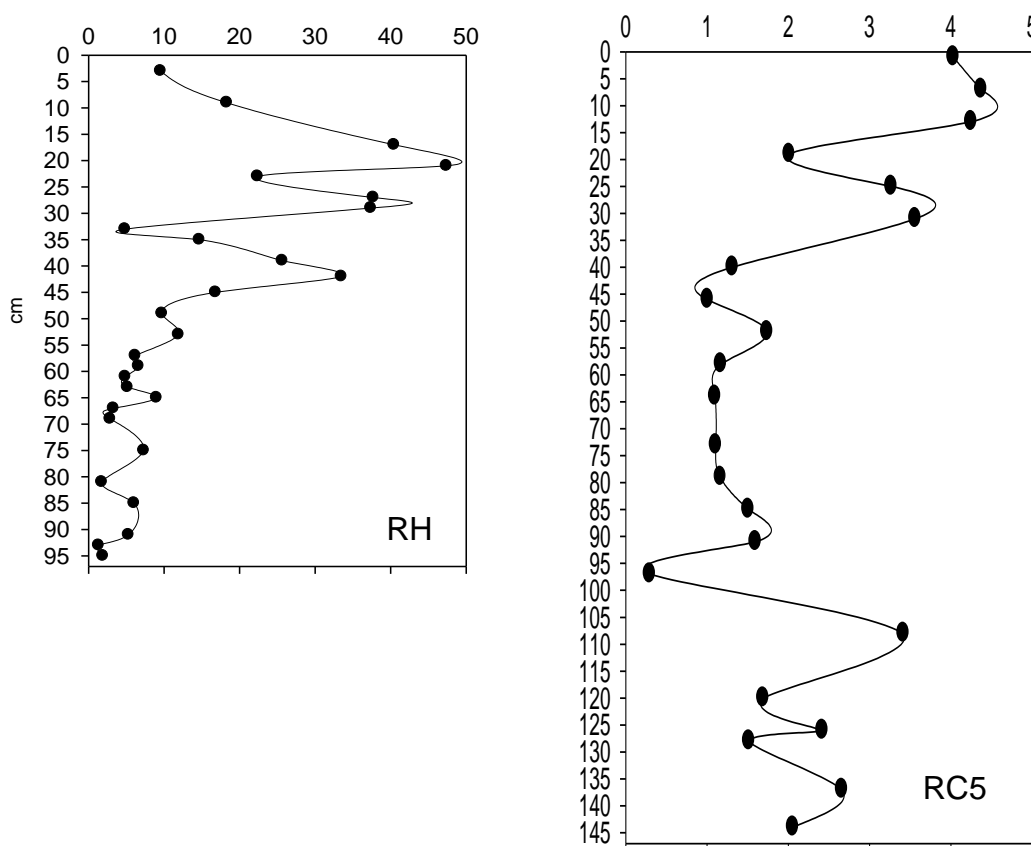


Figura 15. Distribución vertical de  $\Sigma\text{POCs}$  en los núcleos RH y RC5. (Observar la diferencia en las escalas en ambos núcleos).

### 3.6.1 DDTs

En el núcleo RH, del grupo de los DDTs los más abundantes y más frecuentemente encontrados son el 4, 4'-DDE (66%) y el 2, 4'-DDT (19%), con  $40.7 \text{ ng g}^{-1}$  a los 20-21cm y  $30.2 \text{ ng g}^{-1}$  a los 40-41cm, respectivamente (Tabla IV). Sin embargo en el núcleo RC5, el 2,4'DDT no contribuye con la concentración total de los POCs como el caso de RH. El núcleo RC5 tiene mayor proporción (91%) de 4,4'-DDE y 4, 4'-DDD (Fig. 15), con  $1.3 \text{ ng g}^{-1}$  a los 24-25 cm y  $0.72 \text{ ng g}^{-1}$  a los 136-137 cm, respectivamente (Tabla V).

### 3.6.2 Clordanos

En el núcleo RC5, los clordanos son los compuestos más abundantes con un intervalo de  $<LD-1.1 \text{ ng g}^{-1}$  (Tabla V y Fig. 15). De este grupo, el heptacloro es el más frecuentemente encontrado y contribuye con el 47 % del total de la concentración ( $4.3 \text{ ng g}^{-1}$ ) de los POCs con  $2.8 \text{ ng g}^{-1}$  a los 6-7 cm (Tabla V).

### 3.6.3 HCHs

Los isómeros de los HCHs se presentaron en el siguiente orden de abundancia en el núcleo RH:  $\beta\text{-HCH} > \alpha\text{-HCH} > \gamma\text{-HCH}$ . La suma de estos isómeros se presentó en el intervalo de  $<LD - 1.4 \text{ ng g}^{-1}$ . A diferencia del núcleo RH en RC5 el orden de abundancia es:  $\alpha\text{-HCH} > \beta\text{-HCH} > \gamma\text{-HCH}$ . El intervalo de concentración es de  $0.07 - 0.58 \text{ ng g}^{-1}$  (Tabla V).

### 3.6.4 Cilodienos

La abundancia del grupo de los cilodienos en el núcleo RH es: dieldrin>endrin>aldrin. En RC5, es dieldrin > aldrin > endrin (Tabla V y Fig. 13).

En RH y RC5, el aldrin se encontró en el 55 y 86% de las muestras, respectivamente, el dieldrin en el 18 y 50%, y el endrin en el 93 y 9% de las muestras (Figs. 13 y 14).

### **3.6.5 Endosulfan**

El grupo del Endosulfan presenta la siguiente abundancia de compuestos: endosulfan sulfato > endosulfan I > endosulfan II en el núcleo RH y endosulfan I > endosulfan II > endosulfan sulfato en el núcleo RC5. Todos los compuestos fueron encontrados en el 48% de las muestras.

De manera general, no se encontró correlación estadística entre el contenido de CO y BPCs o POCs ( $r^2 = 0.004$  y  $0.002$  en RH;  $r^2=0.2$  y  $0.4$  en RC5, respectivamente). Sin embargo, en la sección superior del RC5 el enriquecimiento en CO es gráficamente consistente con la mayor abundancia de BPCs. Esto sugiere que en general (excepto para la sección superior del RC5) la materia orgánica y los COPs, fueron depositados y/o enriquecidos por diferentes procesos. Tampoco, existe correlación estadística entre la abundancia del tamaño de sedimento arcilla o limo con los BPCS y/o POCs ( $r^2 = 0.02$  y  $0.04$  en HR1;  $r^2 = 0.06$  y  $0.07$  en CR5, respectivamente) (Figs. 5 y 15).

### **3.7 Análisis de componentes principales**

Se realizó un análisis de componentes principales empleando el método Varimax rotado. Se consideraron como variables el % de arcillas, todos los elementos traza (excepto Hg), %LOI, %CO, POCs y BPCS para los 2 núcleos considerados en el análisis de COPs (RC5 y RH) (Tabla IV).

**Tabla VI.** Análisis de componentes principales (Varimax) de los núcleos de RH y RC5, incluyendo %CO, POC y BPCs.

Variable	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4
SiO <sub>2</sub>	0.17	0.81	<u>-0.53</u>	-0.05
TiO <sub>2</sub>	<u>0.88</u>	0.26	-0.32	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>0.95</u>	0.18	0.21	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>0.96</u>	-0.05	0.22	-0.02
MnO	-0.49	<u>-0.61</u>	0.14	-0.29
MgO	<u>0.67</u>	0.57	0.30	0.21
CaO	-0.77	<u>-0.58</u>	0.16	-0.06
Na <sub>2</sub> O	-0.72	0.34	<u>-0.51</u>	0.15
K <sub>2</sub> O	<u>0.95</u>	0.19	-0.11	0.07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<u>0.58</u>	-0.30	-0.30	<u>0.53</u>
LOI	-0.29	<u>-0.74</u>	0.48	0.20
As	<u>0.57</u>	<u>-0.56</u>	-0.29	0.00
Ba	-0.10	<u>-0.69</u>	<u>-0.62</u>	-0.17
Ce	<u>0.43</u>	-0.09	0.05	0.17
Co	<u>0.66</u>	-0.28	-0.08	-0.02
Cr	<u>0.85</u>	0.07	-0.27	0.10
Cu	<u>0.59</u>	<u>-0.57</u>	-0.13	-0.25
Ga	<u>0.91</u>	-0.02	0.15	0.10
La	<u>0.84</u>	-0.24	-0.16	0.24
Nb	<u>0.77</u>	-0.05	-0.15	<u>0.43</u>
Ni	<u>0.74</u>	0.33	0.11	-0.29
Pb	<u>0.74</u>	-0.31	-0.25	-0.38
Rb	<u>0.80</u>	<u>-0.55</u>	-0.13	0.08
Sr	-0.69	<u>-0.66</u>	0.16	0.03
V	<u>0.88</u>	-0.20	0.17	-0.01
Y	<u>0.44</u>	0.64	0.23	-0.40
Zn	<u>0.83</u>	-0.30	0.17	-0.33
Zr	-0.56	0.22	<u>-0.56</u>	-0.27
CO	-0.32	0.12	0.15	<u>0.69</u>
Arcillas	<u>0.84</u>	-0.08	0.41	-0.13
POCs	0.35	<u>-0.69</u>	-0.34	0.09
BPCs	-0.24	-0.01	0.03	<u>0.48</u>
%Var. Tot	<b>47</b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>7</b>

Se aplicó estadística multivariada en orden para evaluar las distintas asociaciones sedimentológicas y geoquímicas del sedimento entre los elementos traza y los COPs e identificar los posibles procesos de depósito en los núcleos. Se determinaron cuatro CP que en conjunto son responsables por el 80% del total de la varianza (Tabla VI).

El primer CP-1 tiene una carga significativa positiva para la mayoría de las variables reportadas excepto para  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{CO}$ , POCs y BPCs. Este componente, explica el 47% del total de la varianza y se identifica como el grupo de los sedimentos arcillosos ricos en metales traza. El CP-2 describe el 18% del total de la varianza, con una carga negativa para POCs, %LOI,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Rb}$  y  $\text{Sr}$ , lo que sugiere que este componente describe el componente de los carbonatos de calcio al cual se asocian potenciales contaminantes orgánicos e inorgánicos. El CP-3 asocia a los silicatos ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{Zr}$ ) probablemente con las plagioclasas sódicas y el  $\text{Ba}$ .

El CP-4, tiene una carga positiva y es responsable del 7 % de la varianza total, agrupa a los BPCs junto con  $\text{CO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{MnO}$ . Esta asociación en CP-4 probablemente indica la asociación de BPCs con eventos de sedimentación de materia orgánica y fertilizantes fosfatados.

### **3.8 Guías de Calidad de Sedimento de COPs**

Las concentraciones de COPs en los sedimentos de RC y RH, se compararon con las diferentes guías de calidad establecidas para sedimentos marinos y dulceacuícolas (MacDonald et al., 2000; Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999; Long y Morgan, 1990) (Tabla VII). Las concentraciones de 4, 4' -DDT, 4, 4' -DDE y  $\Sigma\text{DDT}$  en los sedimentos superficiales del núcleo RH están por encima de los valores establecidos en las guías de calidad de

sedimento PEL (probable effect level), TEL (threshold effect level), ERL (effect range low), ERM (Effect range median) para biota béntica.

Las concentraciones de POCs en el núcleo de RC5 están por debajo de los valores establecidos en las guías de calidad de sedimento. Las concentraciones de 4, 4'-DDE están por encima de los valores establecidos en las guías de calidad del sedimento, en todas las muestras de RH, mientras que en RC5 están por debajo de éstos valores. Con respecto a 4, 4' -DDT, esta por encima y 4, 4'-DDD,  $\Sigma$ DDT y  $\Sigma$ PCBs en todas las muestras de ambos núcleos están por debajo de los valores establecidos en las guías de calidad del sedimento.

**Tabla VII.** Comparación de las concentraciones de COPs en los núcleos RH y RC5 con los índices de efecto probable en organismos bentónicos: TEL (Threshold effect level) and PEL (Probable effect level) MacDonald et al. (2000), ERL (Effect range low) y ERM (Effect range median) Long y Morgan (1990) y CCME (Canadian Council of Ministres of Environment 1999).

	Ecosistemas de sedimentos salobres (ng g <sup>-1</sup> )		Ecosistemas de sedimentos marinos (ng g <sup>-1</sup> )			RH	RC5
	TEL	PEL	PEL <sub>CCME*</sub>	ERL	ERM		
	4,4'-DDT	--	--		1		
4,4'-DDE	1.42	6.75	374	2.2	27	0.03-41	L.D-1.3
4,4'-DDD	3.54	8.51	7.8	2	20	0.0-0.2	L.D-0.7
$\Sigma$ DDT	6.98	4450	4.77	1.6	46	1.0-46.9	0.3-1.5
$\Sigma$ BPCs	34	277		22.7	180	0.08-4.9	0.07-4.1

### 3.9 Cronología Química

Los BPCs y POCs se usaron como marcadores químicos del tiempo (cronomarcadores químicos), y para calcular las tasas de sedimentación promedio. Estos compuestos son hidrofóbicos y muy resistentes a la biodegradación. Por esta razón son fácilmente preservados en sedimentos por largos periodos de tiempo.

Se asignaron diferentes edades a diferentes profundidades en los núcleos RH y RC5 con base en los siguientes criterios: a) la superficie del núcleo representa el año de extracción del núcleo en 2005; b) el año de 1970 se definió como el año de máximo depósito de BPCs, registrado en sedimentos del Sur de California (Venkatesan et al., 1999), y se interpretó en el núcleo RH como el pico de los 52-53 cm y en el núcleo RC5 a los 125-126 cm (Figs. 12 y 16); c) El año de máxima aplicación local y global de POCs también fue 1970 (Venkatesan et al., 1999; Moreno-Mena y López-Limón, 2005) y se interpretó como el pico en el núcleo RH a los 41-42 cm y en el núcleo RC5 a los 107-108 cm (Figs. 15 y 16); d) el año de la primera aparición de BPCs y POCs a nivel mundial fue en 1930 y 1940 respectivamente (Venkatesan et al., 1999) (Figs. 12, 15 y 16). Para ambos compuestos, las concentraciones mínimas se observan en la base del núcleo RH (94-95 cm). Sin embargo, en RC5 no se identificó un mínimo con precisión (Figs. 15 y 16). Por lo tanto, es probable que para el núcleo RC5 los sedimentos anteriores a 1930-1940 no hayan sido recuperados.

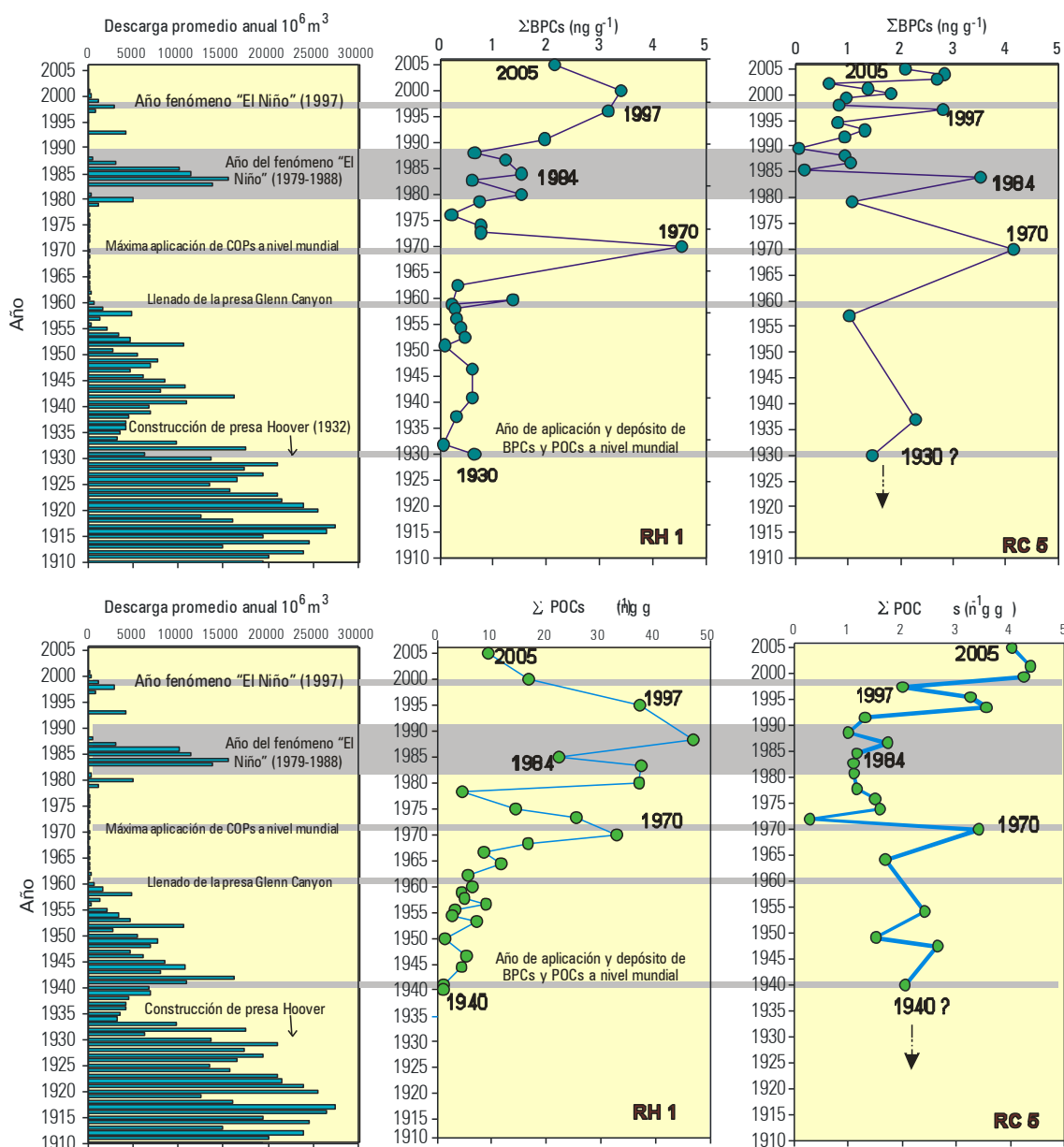


Figura 16. Interpretación cronoestratigráfica de la edad de los sedimentos en los núcleos RH y CR5, comparada con los flujos de agua a través de la frontera México con EUA.

Con base en las edades y profundidades anteriores, se calcularon independientemente dos tasas de sedimentación; una con el uso de la ΣBPCs y otra con la ΣPOCs. Con la ΣBPCs se obtuvo una tasa de sedimentación de

1.1 cm a<sup>-1</sup> después de 1970 y de 1.5 cm a<sup>-1</sup> antes de 1970 en el núcleo RH. En RC5 la tasa de depósito de sedimento fue de 3.6 cm a<sup>-1</sup> después de 1970. Para este núcleo fue imposible calcular la tasa de depósito de sedimento antes de 1970 (Fig. 16).

Con el uso de  $\Sigma$ POCs se calculó una tasa de sedimentación similar a la propuesta con  $\Sigma$ BPCs: En el núcleo RH fue de 1.2 cm a<sup>-1</sup> después de 1970 y 1.8 cm a<sup>-1</sup> antes de este año (Fig. 16). En RC5, las tasas de depósito de sedimento fueron de 3.1 cm a<sup>-1</sup> después de 1970.

## 4. DISCUSIONES

### 4.1 Procesos de sedimentación en el delta del RC

El RH a diferencia del RC, no está conectado directamente a alguna fuente de agua o cauce principal río arriba. El agua la recibe de los efluentes de la geotermia de Cerro Prieto, los retornos agrícolas y la planta de tratamiento de Las arenitas. El bajo flujo de agua y material particulado en RH, sugiere que los cambios en la sedimentación se derivan principalmente de los cambios hidrodinámicos inducidos durante los períodos de flujos en el cauce principal del RC. Luecke et al. (1999) observaron que cuando los flujos disminuyeron hacia el delta del RC, en la zona de confluencia del RH con el RC y en los alrededores de la frontera internacional norte, el ecosistema se convirtió en una zona más seca y árida (Fig. 3). Sin embargo, al sur del cauce principal del RC, en la confluencia con el RH y hacia dentro de éste, el ecosistema era perene, debido a la descarga de drenes agrícolas e inundaciones por la marea. Por esta razón, se esperaba que los sedimentos en el RH registraran un depósito más constante y menos alterado que los del canal principal del RC.

Los períodos de ausencia de flujos a través del RC provocaron una interrupción en el transporte y depósito del sedimento. Por el contrario, durante los períodos de flujos, la carga de sedimento transportada a través del RC era constante, y por lo tanto llegaba hasta la planicie del delta del RC, donde la energía hidrodinámica disminuía significativamente. Al iniciarse un evento de inundación, el frente de agua probablemente era turbulento y de alta energía, lo que provocaba transporte de sedimento en suspensión y de fondo, incluyendo sedimento tamaño arenas finas. El suministro de arena y la limitación del suministro de arena antes y después de la presa Glenn Canyon ya ha sido descrita en el Gran Cañon por Tooping et al. (2000). Es probable que tras la

avenida inicial de agua durante los eventos de flujo, la sedimentación de material lodoso (limo y arcilla) haya dominado, dada la baja pendiente del delta.

En éste trabajo el registro sedimentario de los principales eventos de inundación (Fig. 16) durante el siglo XX después de la construcción de la presa Hoover, se interpretó de la siguiente forma: a) una disminución drástica en el depósito de arcilla (Fig. 5), la cual indica el tiempo en el que el flujo histórico se interrumpió, b) el inicio del depósito de arena y limo, probablemente indican el inicio de un flujo de alta energía que acarrea partículas más grandes y c) el período de inundación del delta y la disminución de la energía hidrodinámica inicial con el consecuente depósito de limos arcillosos. Estos eventos se correlacionan bien con los marcadores cronoestratigráficos propuestos.

Por otro lado, la sola presencia de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  en el núcleo RH y RC1 (Tabla III) sugiere edades del sedimento del orden de decenas a cientos de años. Los sedimentos acarreados por el RC durante los periodos de flujo de inundación y liberación de las presas, fueron erosionados de zonas de la cuenca alta del RC, por lo que a pesar de que los sedimentos de la cuenca baja del delta del RC fueron depositados recientemente, éstos tienen probablemente material integrado de diferentes composiciones isotópicas. Una posible explicación de las mayores actividades del  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  a los 41 cm en estos núcleos, es que durante las intensas lluvias causadas por las condiciones del fenómeno “El Niño” después de 1979 (Fig. 15), los flujos atmosféricos locales de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  se incrementaron significativamente. No fue posible estimar con precisión las tasas de depósito de sedimento con  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  debido al bajo flujo atmosférico de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  y  $^{137}\text{Cs}$  en la zona. Existe una baja concentración de radioisótopos atmosféricos en la región del alto golfo de California y cuenca baja del RC. Rama et al. (1961) midieron la actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  ( $0.245 \text{ Bq l}^{-1}$ ) en la cuenca alta del RC y observaron una rápida disminución de este isótopo en el agua aportada hacia el lago Mead ( $0.0048 \text{ Bq l}^{-1}$ ), señalando la importancia de las reacciones químicas que afectan la composición del agua del RC. Los

sedimentos del estuario Río Culiacán (sur de Golfo de California) también tienen una relativamente baja actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  (1.1-28 Bq kg<sup>-1</sup>) y no detectable para  $^{137}\text{Cs}$  (Ruiz-Fernández et al., 2007). La mayor actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  en sedimentos de la zona central del Golfo de California al parecer es controlada por procesos de secuestro relacionados a las intensas surgencias de la zona. Ésto se sugiere por la baja concentración de  $^{210}\text{Pb}$  disuelto en aguas adyacentes a las grandes islas 0.00025 - 0.006 Bq l<sup>-1</sup> (Bruland et al., 1974) y a la alta concentración de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  en sedimentos de esta zona, comparada con el norte del Golfo de California (Daesslé et al. 2004 a, b). Adyacente a las grandes islas, el  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  en sedimentos es mayor a 670 Bq kg<sup>-1</sup> (Daesslé comunicación personal, 2009), y en la cuenca de Guaymas es de 500 Bq kg<sup>-1</sup> (Baumgarther et al., 1985).

Sin embargo, la ausencia y los flujos no constantes de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  en el área de estudio probablemente son atribuidos a uno o más de los siguientes factores: a) disminución de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  disuelto a lo largo del RC, b) escasa precipitación pluvial en esta área desértica, c) los bajos flujos atmosféricos de  $^{210}\text{Pb}$  derivados de la disminución de la influencia de masas de agua y aire oceánicos (Preiss et al., 1996) y d) el depósito y mezcla de sedimentos de estratos geológicos antiguos erosionados a lo largo de la cuenca del RC. Por lo que se sugieren estudios más detallados en lo que concierne a la datación en esta región.

## 4.2 Geoquímica Sedimentaria

Los resultados de los elementos traza considerados para los núcleos RH, RC1, RC3, RC4, RC5 y CSC para el delta del RC, fueron comparados con los diferentes sedimentos de la cuenca baja del RC en los EU, la frontera

internacional norte y el alto golfo de California (Horowitz et al., 2001; Shumillin et al., 2002; Hart et al., 2005; Randle et al., 2006) (Tabla VIII).

**Tabla VIII.** Concentraciones de los elementos traza en núcleos de sedimento del delta del RC (RH y RCs) y criterios de calidad en sedimentos, niveles de guías toxicológicas.

Área de estudio / nivel de efecto <sup>a</sup>	As ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Cr ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Cu ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Pb ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Zn ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) <sup>c</sup>
Lowest effect level (LEL) <sup>1</sup>	6	26	16	31	120
Probable effect level (PEL) <sup>2</sup>	17	90	197	9	315
Consensus-based TEC <sup>3</sup>	9.8	43.4	32	36	459
Consensus-based PEC <sup>3</sup>	33	111	149	121	121
Lago Powell, Utah EU (núcleos de sedimentos) <sup>4</sup>	7–13	38-75	20–38	16–40	59-217
Navajo Canyon, Arizona EU (sedimentos) <sup>5</sup>	4	20.1	10	12	27.8
Frontera internacional norte EU-México (sedimento suspendido) 2001 (% error) <sup>6</sup>	6 (13%)	58 (5%)	15 (15%)	16 (1%)	-
Sección marina del delta RC (sedimentos superficiales) <sup>7</sup>	4.5 ± 1.9	28± 9%	-	-	-
Sección marina del delta RC (núcleo) <sup>7</sup>	0.38–15	-	-	-	-
RH núcleo	3–30	50-84	20–38	16–40	74-122
RCs núcleos (RC1, RC3, RC4 y RC5)	1–20	48-74	7–50	5–29	62-133
CSC núcleo (húmedales)	1–13	28-73	11–25	9–23	34-94

Nota: Índices de efectos probables en organismos bentónicos: TEC, threshold effect concentration; PEC, probable effect concentration; <sup>a</sup>Referencias (súperíndices <sup>1-7</sup>): (1) Presaud et al. (1993); (2) Smith et al. (1996); (3) MacDonald et al. (2000); (4) Hart et al. (2005); (5) Randle et al. (2006); (6) Horowitz et al. (2001); (7) Shumilin et al. (2002) <sup>b</sup> en dos puntos *outlayers* (no incluido) en el núcleo 298 del lago Powell, Hg = 0.72 y 1.7  $\text{lg g}^{-1}$ . Hg en RC es el núcleo RC1 (n = 4) y un “*outlayer*” en el núcleo 298 del Lago Powell Zn de 989  $\text{lg g}^{-1}$ .

Los resultados con respecto a la geoquímica de los sedimentos en el RC y alto Golfo de California se muestran en la Tabla X en el anexo. Las máximas concentraciones de As, Cu, Cr, Pb y Hg en los núcleos estudiados en éste trabajo están por encima de las concentraciones reportadas por Horowitz et al. durante 2001, en sedimentos suspendidos del RC, en la frontera internacional norte (Tabla VIII); especialmente el As en el núcleo RH. A diferencia del Cr, Cu, Pb y Hg, el As en los núcleos del RH y RC también está enriquecido comparado con sus concentraciones en los sedimentos del Lago Powell y del Cañon Navajo en el RC. Las concentraciones de As en la mayoría de los núcleos del RC y CSC son comparables con los sedimentos en el alto Golfo de California. A diferencia del núcleo RH, donde las concentraciones de As son dos veces el máximo reportado para el Alto Golfo de California (Tabla VIII). Los factores de enriquecimiento calculados para As, Pb y Cu sugieren que existe una fuente adicional de estos elementos y que su concentración es mayor que la del material suspendido que pasó la frontera internacional norte en 2001, especialmente para As en núcleos de RH, RC1 y RH4.

La distribución de las cargas del CP-3 a lo largo del núcleo RH muestra un incremento en la carga positiva significativa de los 63 cm hacia la superficie. Es a los 63 cm que se registra el primer período de flujo posterior a la construcción de la presa Hoover y llenado de la presa Glen Canyon (Fig. 15). Arriba (hacia la superficie) en los 36 cm, los puntajes de CP-3 se incrementan nuevamente a la misma profundidad a la cual inicia el segundo período de flujo, asociado a las máximas precipitaciones provocadas por el fenómeno natural de “El Niño”. De este modo se sugiere que la asociación de As, Pb, Cu y Ba está relacionada a los eventos de inundación.

La principal fuente humana de As, Pb y Cu en esta zona agrícola fueron los pesticidas de arsenatos de plomo  $[Pb_5OH(AsO_4)_3]$ , acetoarsenato de cobre  $[(CH_3COO)_2Cu \cdot 3Cu(AsO_2)_2]$  y arsenato de calcio  $[Ca_3(AsO_4)_2]$ . Los arsenatos

de plomo fueron usados extensivamente como plaguicidas arsenicales durante la primera mitad del siglo XX, hasta 1947, cuando los plaguicidas orgánicos como el DDT fueron introducidos (Peryea, 1998). En 1920, con la intensificación de la agricultura y el incremento de plagas en el Valle de Mexicali, se inició la demanda de pesticidas y herbicidas, principalmente de arseniatos de Pb, Cu y Ca en esta región (Moreno-Mena y López-Limón, 2005). En este estudio se infiere que los arsenatos fueron probablemente transportados de suelos agrícolas hacia el RC y RH a través de los drenes agrícolas. Robinson y Ayuso (2004) estudiaron la contaminación de arsenatos de Pb en sedimentos de ríos en Nueva Inglaterra. Encontraron una asociación entre el Pb y el As que no podía ser explicada por el intemperismo de las rocas locales (sugerido por la no correlación del As y Pb con Fe). De acuerdo a Ayuso y Foley (2002), As y Pb en suelos es retenido a través de la adsorción a sedimento fino y los oxi-hidroxidos de Fe y Mn. Muchos de los estudios por contaminación de arsenatos de Pb en suelos sugiere que el As y Pb son retenidos usualmente en los primeros cm del sedimento debido a que la redistribución entre los suelos es limitada (Peryea, 1998). Sin embargo, la erosión de suelos y material residual en lagos y arroyos es un factor importante en la dispersión de As y Pb dentro de una cuenca de drenaje (Richardson et al., 1978; Kober et al., 1999). Si el inicio de la contaminación de As (como se refleja en el CP-3; Fig. 9) ocurrió durante los años 1920's, entonces es posible usar este dato para estimar un tiempo de correlación con los flujos provenientes de la cuenca alta del RC (Fig. 15). Una fuente alterna de As, Pb, Cu y Ba en los sedimentos estudiados son las aguas residuales y drenes provenientes de la estación geotérmica de Cerro Prieto. El efluente de la planta geotérmica hacia el RH es de  $1.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (POMEMM, 2007). Discusiones recientes sobre contaminación en Mexicali en la zona mencionada, cuestionan si el agua subterránea de Cerro Prieto fue contaminada inicialmente por As, Ba, Li y Na, derivado de los drenes agrícolas (Imperial Valley/ Mexicali Air Quality Taskforce, 2007). Las aguas residuales de la estación de Cerro Prieto contienen salmueras, carbonatos, bicarbonatos y metales pesados (POMEMM,

2007). Aunque las salmueras de Cerro Prieto tienen una baja concentración de As y Pb comparadas con la planta de energía de Salton Sea (Lippmann et al., 1999). El As por ejemplo, tiene  $0.25 \mu\text{g g}^{-1}$  en las aguas residuales de Cerro Prieto, pero  $> 5 \mu\text{g g}^{-1}$  en las salmueras de Salton Sea. Por lo que se sugiere que las concentraciones de As, Cu y Pb en los sedimentos estudiados se asocian principalmente a plaguicidas inorgánicos y es necesario estudiar con mayor detalle su probable asociación con los efluentes geotérmicos.

### **4.3 Consideraciones toxicológicas para contaminantes inorgánicos.**

Los resultados de los elementos traza fueron comparados con los criterios de calidad en sedimentos (por sus siglas en inglés SQG Sediment Quality Guidelines), los Índices consensus-TEL (Threshold Effects Level) y consensus-PEL (Probable Effects Level) desarrollados por MacDonald et al. (2000) para sedimentos dulceacuícolas. Estos índices de toxicidad fueron calculados con base en una compilación de datos de estudios de toxicidad de sedimentos en organismos bentónicos. Los autores utilizaron diferentes criterios para el cálculo; de manera general el TEL representa la concentración debajo de la cual raramente se observan efectos adversos en los organismos. El PEL representa la concentración arriba de la cual se espera observar efectos adversos de manera frecuente, sobre todo en organismos bentónicos sensibles. El LEL es el nivel más bajo de afectación (Lowest effect level, Persaud et al. 1993).

Las concentraciones de As en algunas muestras y de Cr en todas las muestras están por encima del nivel bajo de efecto (LEL), y del criterio basado en las concentraciones de efecto umbral (TEC). Los sedimentos con concentraciones debajo del LEL y TEC pueden ser considerados limpios o marginalmente

contaminados. Comparados con el efecto probable (PEL) y las concentraciones de efecto probable nocivo-base (PEC), se observa que la máxima concentración de As ( $30 \mu\text{g g}^{-1}$ ) rebasa éstas guías y las máximas de Cr ( $84 \mu\text{g g}^{-1}$ ) son similares a los valores de PEL y PEC durante el segundo periodo de flujo especialmente en el núcleo RH (Fig. 16).

Dado que algunas muestras rebasan las concentraciones que indican probables efectos adversos en organismos bentónicos (Smith et al., 1996; MacDonald et al., 2000), los organismos excavadores y o la perturbación de sedimentos, podrían provocar la removilización de estos elementos, de este modo ocasionar efectos adversos por lo que es necesario evaluar estos contaminantes potenciales con más detalle en la región.

#### **4.4 BPCs**

Hasta el momento, existen pocos estudios publicados de BPCs en sedimentos cercanos a la zona de estudio (Hom, 1974; Pereira et al., 1994; Venkatesan et al., 1999; Eganhouse y Pontolillo, 2000) (Tabla IX). En la costa de California, EUA, los sedimentos de la Bahía de San Francisco, presentan intervalos de concentración de  $0.8\text{-}34 \text{ ng g}^{-1}$  (Venkatesan et al., 1999), en el estuario de San Francisco de  $<0.1\text{-}8.1 \text{ ng g}^{-1}$  (Pereira et al., 1994), en la zona agrícola de Palos Verdes de  $0.0\text{-}24 \text{ ng g}^{-1}$  (Eganhouse y Pontolillo, 2000) y de  $0.8\text{-}32 \text{ ng g}^{-1}$  en la cuenca de Santa Bárbara (Hom, 1974). En el Salton Sea, algunos kilómetros al norte de nuestra zona de estudio (Fig. 4), se reportaron concentraciones de BPCs en tejidos de peces por debajo del TEL ( $34.1 \text{ ng g}^{-1}$ ) (Riedel et al., 2002). El intervalo de concentración de BPCs reportado para RH y RC5 ( $0.07\text{-}4.54$ ) es similar al reportado para el estuario de San Francisco y coincide con las concentraciones mínimas reportadas para los sedimentos del resto de las zonas mencionadas (Tabla IX).

**Tabla IX.** Comparación de las concentraciones  $\Sigma$ BPCs y  $\Sigma$ COPs (DDTs) en suelos y sedimentos (RH y CR5) del DRC, con respecto a otros sitios.

Area de estudio	Sedimento ( $\text{ng g}^{-1}$ )		Referencia
	$\Sigma$ BPCs	$\Sigma$ POCs	
<b>Colorado River</b>			
<b>Rio Colorado, México</b>	<b>0.07-4.54</b>	<b>&lt;LD – 47</b> 4, 4'DDE	<b>Presente estudio</b>
Salton Sea, CA, EUA		<LD - 40	Sapozhnikova, et al., 2004.
Palos Verdes, CA, EUA	0.0-2400	1300-22000	Eganhouse, R. P., Pontolillo, J., 2000.
Estuario de San Francisco	<0.1- 8.1		Pereira et al., 1994.
Hong Kong (suelos)		1.9 - 1.6	Zhang, G., 1999.
Bahía Richardson y San Pablo San Francisco, E.U.A.	0.8-34		Venkatesan, et al., 2009.
Cuenca de Santa Barbara	0.8-32		Hom, 1974.
Rio Mandovi, Estuario, India		73	Iwata et al., 1994.

Las bajas concentraciones en sedimento de LMW-BPCs en RH, sugieren que estos congéneres probablemente fueron removidos por biodegradación y/o difusión a través del agua intersticial y de la superficie del sedimento. Ésto debido a que los congéneres LMW-BPCs son más volátiles y mas solubles en agua que los congéneres HMW-BPCs (Persson et al., 2000). De acuerdo a la cronología descrita en el presente estudio, la tasa de sedimentación en RH es menor a la del RC. Por lo tanto en RH existió un mayor tiempo de exposición de LMW-BPCs en la superficie del sedimento que en CR5, favoreciendo una mayor solubilización. Otra explicación para la baja concentración de LMW-BPCs en el RH, sería que estos compuesto fueron transportados a través del

RC y redepositados río abajo. Sin embargo, no se depositaron de manera significativa río arriba del RH.

Las relativamente altas concentraciones de congéneres HMW-BPCs en RH, se asocian a una fuente específica: los transformadores eléctricos de la estación de energía geotérmica de Cerro Prieto. El BPC-138 es el congéner más abundante de RH y es el principal congéner de la mezcla de aceites dieléctricos (Falandysz et al., 1994). Después de 1980, la Comisión Federal de Electricidad decomisó 1194 t de BPCs provenientes del equipo que instaló en zona de Cerro Prieto (Comisión Federal de Electricidad, 2008).

A diferencia del núcleo RH, en el RC5 los congéneres más abundantes fueron los ligeros LMW-BPCs, específicamente el BPC-28. Los congéneres LMW-BPCs son volátiles y pueden recorrer largas distancias a través del aire (Iwata et al., 1994) y durante su transporte pueden ser enriquecidos en relación a los HMW-BPCs (Malmquist et al., 2003). El BPC-28 fue el principal compuesto del Aroclor 1242, que fue extensivamente usado en el periodo 1950-1960 y fue reemplazado en 1971 por el Aroclor 1016 (CARSO, 2008). En el suroeste de EUA el aroclor 1242 fue usado ampliamente durante 1930-1977 (Hutzinger et al., 1974). Iwata et al. (1994) menciona que es común encontrar LMW-BPCs en sedimentos marinos y costeros de regiones no contaminadas alejadas de la fuente de contaminación. Es probable que los LMW-BPCs a lo largo del RC se deriven de las emisiones a partir de procesos de combustión (Granier et al., 1991; Kocar et al., 1991 en Sanders et al., 1992).

## **4.5 POCs**

Los POCs a diferencia de los BPCs, han sido estudiados con mayor detalle en zonas cercanas a nuestra área de estudio. Por ejemplo en Salton Sea, ~78

kilometros al norte de la frontera entre EUA y México (Fig. 4), se ha asociado a los POCs con aguas residuales domésticas y agrícolas. Ahí la alta concentración de POCs causó deformaciones en embriones de peces (Matsui et al., 1992) por lo que fue necesario tomar acciones para reducir la contaminación en la zona. En un estudio posterior Sapozhnikova et al. (2004) reportaron concentraciones de 4,4'-DDE en sedimentos de Salton Sea (0.0-46.9 ng g<sup>-1</sup>) similares a las reportadas para el delta del RC.

El uso extensivo de DDTs en el Valle Imperial (Kegley et al., 1999) en California y en el Valle de Mexicali, Baja California (Moreno-Mena and López-Limón, 2005) nos permite inferir que ambos, tanto fuentes locales así como internacionales pueden ser responsables de la entrada de POCs al DRC, debido a su removilización y lavado de suelos, asociados a los flujos de inundación (Zhang et al., 1999).

Las concentraciones POCs encontradas en el presente estudio son ligeramente mayores a las reportadas para la Bahía de San Francisco (4-21 ng g<sup>-1</sup>) por Venkatesan et al. (1999) donde el endosulfan sulfato fue el más abundante. Los grupos del endosulfan, HCHs, ciclodienos y clordanos están presentes en bajas concentraciones en RC5 y RH, a pesar de que fueron aplicados localmente después de 1981 y hasta 2004 (Moreno-Mena y López-Limón, 2005). El isómero  $\beta$ -HCH es el más abundante de los HCHs. Éste es menos volátil y más estable que los demás compuestos de este grupo (Li et al., 2006). Las bajas concentraciones y ocurrencia de los Ciclodienos, específicamente del endrin aldehído era de esperarse, debido a su corto tiempo de residencia en el ambiente (5 años). Además éstos compuestos no han sido usados desde finales de 1980's, por consiguiente no se espera encontrarlos en suelos del Valle de Mexicali en el presente (Moreno-Mena y López-Limón, 2005).

## 4.6 Razones DDT

En general, la abundancia de DDT en el ambiente disminuye con el tiempo debido a su degradación, dando origen a sus metabolitos de DDE y DDD. Por lo que la razón  $(4, 4' \text{-DDE} + 4, 4' \text{-DDD}) / 4, 4' \text{-DDT}$  se ha usado como un indicador del tiempo de residencia del 4, 4' DDT en el ambiente (Qiu et al., 2004). El valor  $> 1$  de esta razón es indicativo de una aplicación antigua de DDT (Doong et al., 2002). En el núcleo RH los valores obtenidos para ésta razón (31-244), sugieren que las aplicaciones de DDT en el área no son recientes.

El uso de la razón  $4, 4' \text{DDT} / (4, 4' \text{-DDE} + 4, 4' \text{-DDD})$ , nos sugiere que, a diferencia de otros lugares en América Central y América del sur (Kurt-Karakus et al., 2005), el DDT no ha sido aplicado recientemente. El uso de la razón en lugares de reciente aplicación presenta un promedio de 1.8. Sin embargo en el núcleo RH, el intervalo es de 0.03-1.0 (promedio 0.06), y es consistente con otros lugares, donde existe la dehidrocloración aeróbica del DDT a DDE (Zhang et al., 1999).

La razón  $(2, 4' \text{ DDT} / 4, 4' \text{ DDT})$  se usa también para identificar la posible presencia de dicofol técnico (un pesticida obtenido del DDT; Qiu et al., 2005). El intervalo de esta razón (1.3-9.3) se asocia a dicofol (Qiu et al., 2005). Los valores obtenidos en este estudio son de 1-9, por lo que se sugiere la presencia o uso de dicofol. El Dicofol fue uno de los plaguicidas más extensivamente usados en el periodo 1950-1965, en nuestra área de estudio y tiene un tiempo de residencia de 2-20 años (Moreno-Mena y López-Limón, 2000).

Finalmente la razón  $((2,4' \text{-DDD} + 4,4' \text{-DDD}) + (2,4' \text{-DDE} + 4,4' \text{-DDE})) / \Sigma \text{DDTs}$  ( $4,4' \text{DDD}$ ,  $4,4' \text{-DDE}$ ,  $2,4' \text{-DDT}$ ,  $4,4' \text{-DDT}$ ) expresada como  $(\text{DDD} + \text{DDE}) / \Sigma \text{DDTs}$  en la Fig. 17, se usa para evaluar la erosión de los suelos

agrícolas. Esta razón se ha aplicado en concentraciones de DDT y sus metabolitos asociados a agua, suelos y sedimento en regiones donde el DDT fue prohibido desde hace mucho tiempo (alrededor de cuatro décadas) y que aun contienen altas concentraciones de DDE comparadas con DDT y DDD. Se ha sugerido que dichas concentraciones se deben a procesos de erosión de suelos, lo cual favorece la formación y preservación de DDE. Debido a que bajo condiciones de mayor actividad eólica, los microorganismos aeróbicos remueven del DDT el hidrógeno y el cloro (dehidrocloran), dando lugar a los metabolitos del DDE (Ballschmitter y Wittlinger, 1991; Aigner et al., 1998; Harner et al., 1999 y Zhang et al., 2002). El intervalo de esta razón (0.6-1.4) en el núcleo RH, sugiere que los sedimentos a lo largo del RH fueron parcialmente removidos y/o erosionados de los suelos agrícolas desde su aparición (Doong et al., 2002). En resumen, la razón del DDT sugiere que los POCs, no han sido aplicados recientemente y son principalmente derivados de la erosión e intemperismo de suelos agrícolas. Los valores por debajo de 0.6 se localizan durante períodos de poco o nulo flujo.

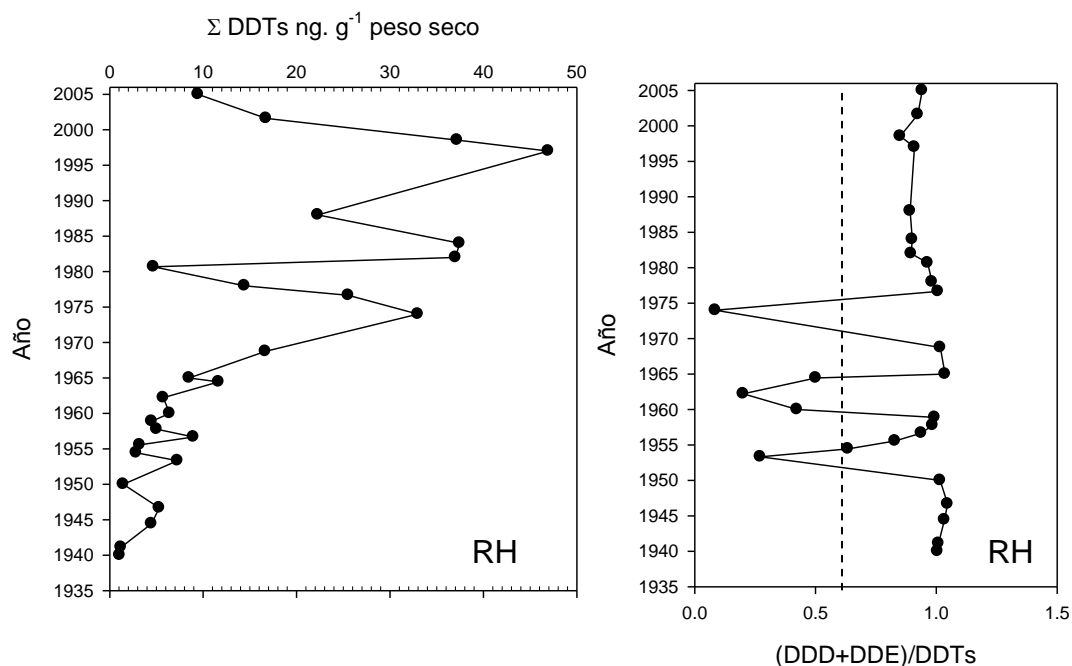


Figura 17. Variación vertical de los valores de razón  $(\text{DDD} + \text{DDE}) / \text{DDTs}$  sugerida por Doong et al. (2002) comparada con la concentración de DDTs para el núcleo RH.

## 4.7 COPs y procesos sedimentarios en el delta RC

Los principales flujos de inundación del RC que pasaron a través de la frontera de EUA-México, se registraron en los sedimentos del delta del RC. Las variaciones en la distribución del tamaño de sedimento son el resultado de los cambios en los flujos de agua y redepósito de sedimento, después de que el agua fue almacenada y liberada ocasionalmente por las presas localizadas en la cuenca media y baja del RC. En la figura 18, se muestra un modelo conceptual detallado de los procesos relacionados con los COPs en la zona de estudio.

El fechado de los sedimentos mediante  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  se vió limitado debido a las bajas concentraciones naturales de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  en el agua del RC (Rama et al., 1961) y la consecuente baja acumulación de este isótopo (al igual que  $^{137}\text{Cs}$ ) en los sedimentos fluviales. Sin embargo, la presencia de exceso  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  a los 51 cm del núcleo RH señala que estos sedimentos deben datar de los últimos ~100 años.

Con respecto a los COPs, es común encontrar las máximas concentraciones de POCs después del año de máxima aplicación en ambientes fluviales (Hermanson et al., 1991; Latimer et al., 1996). En 1979-1988 las mayores descargas que pasaron a través de la frontera debido al llenado de las presas durante lluvias extraordinarias asociadas a condiciones de “El Niño” (Glenn et al., 2001; NOAA, 2009), también causaron el desfogue de drenes agrícolas en el Valle de Mexicali en 1984 (Figs. 15 y 17). Después de este período en 1997, las condiciones de “El Niño” (NOAA, 2009) y un incremento en el deshielo en la cuenca alta del RC, ocasionaron la segunda liberación más importante de agua (flujos de inundación) hacia el delta del RC (Martyn y Serreze, 2002; Mote, 2003). En RH y RC los siguientes dos máximos de BPCs y POCs después de 1970, se asocian a este evento. Los eventos de flujos de inundación mas significantes (1984-1997; Fig. 15), nos indican que los POCs fueron

transportados tanto de fuentes locales como lejanas (tales como los efluentes geotermales y desfogues agrícolas) durante el periodo de inundación del delta. Posterior a 1970 el enriquecimiento de POCs en el núcleo RH ocurrió durante el periodo 1979-1988 en eventos “El Niño”, pero no después de 1997.

A diferencia del núcleo RH, los BPCs y POCs (principalmente el heptaclor) fueron relativamente enriquecidos en la superficie de RC5. Un enriquecimiento asociado al CO en la superficie sugiere que los compuestos orgánicos fueron depositados recientemente y no han sido completamente oxidados. En el caso de los BPCs, hasta el 2008 CFE aún tenía almacenadas 1194 toneladas de BPCs en espera para ser eliminados y 1066 en servicio en sus distintas plantas geotérmicas en México. Por lo cual es probable un aporte contemporáneo de BPCs al RC.

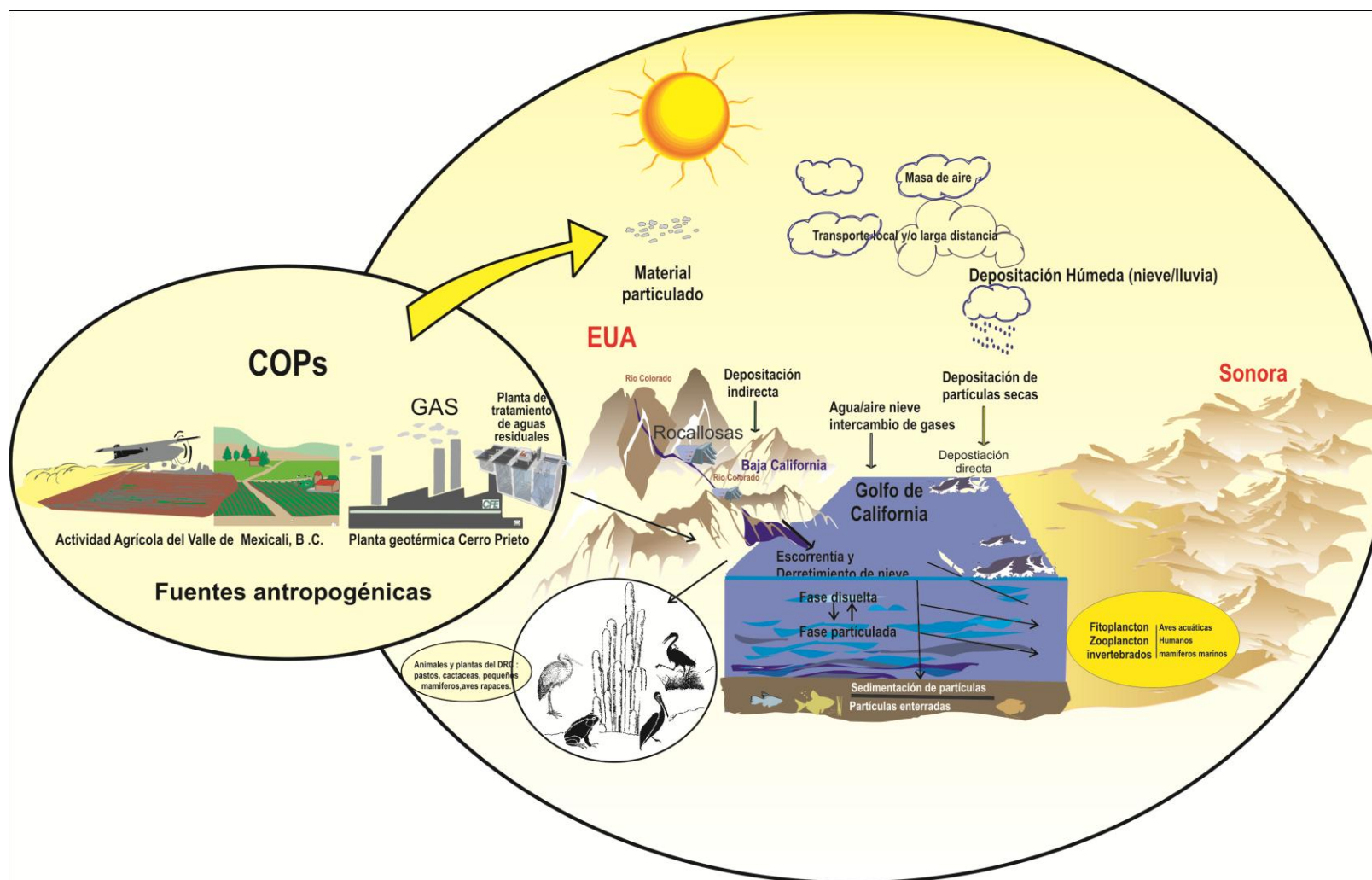


Figura 18. Modelo conceptual de las fuentes, transporte y depósito de COPs en el delta del RC.

## 5. CONCLUSIONES

La intervención del hombre en el RC ha causado cambios en la sedimentación en el delta del RC. Debido a las relativamente bajas tasas de sedimentación y la baja influencia de inundaciones por el RC y de flujos de marea hacia el RH, en este canal el registro sedimentario está mejor preservado.

Las bajas e irregulares actividades de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exce}}$  en los núcleos probablemente se deban a la baja concentración de éste isótopo en el agua del RC, al bajo depósito atmosférico vía lluvia y/o a la redepositación de sedimentos antiguos. La tasa de sedimentación calculada mediante  $^{210}\text{Pb}$  es de  $\sim 0.9 \text{ cm a}^{-1}$ , mediante el método de sedimentación constante.

Utilizando los BPCs y POCs como marcadores químicos cronoestratográficos, fue posible proponer una datación para los núcleos RH y RC5, y asociarlos con los eventos de inundación más significantes en la planicie deltaica del RC. La tasa de sedimentación mediante este método fue de  $1.5 \text{ cm a}^{-1}$  con  $\Sigma\text{BPCs}$  y de  $1.8 \text{ cm a}^{-1}$  con  $\Sigma\text{POCs}$  antes de 1970 en el RH. Después de 1970 fue de  $1.1 \text{ cm a}^{-1}$  con  $\Sigma\text{BPCs}$  y  $1.2 \text{ cm a}^{-1}$  con  $\Sigma\text{POCs}$  en RH. En RC5 fue de  $3.6 \text{ cm a}^{-1}$  con  $\Sigma\text{BPCs}$  y de  $3.1 \text{ cm a}^{-1}$  con  $\Sigma\text{POCs}$ . Los flujos más directos en el RC durante las inundaciones de la planicie, probablemente contribuyeron a tasas de sedimentación más altas en RC que en RH.

Las facies de arcilla (L-Arc y L-Arc) se interpretan como el registro de los períodos de los flujos de inundación que ocurrieron después de la construcción de las presas durante el siglo XX, similares a los estratos masivos de arcillas rojas reportadas para el Alto Golfo de California. Las facies L-Arc, L-Arc y ArcL tienen altas concentraciones de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Sin embargo los factores de enriquecimiento y la estadística multivariada indican que el As y probablemente el Pb y Cu tienen una fuente antropogénica adicional a la línea base de la

geoquímica de los sedimentos inorgánicos. Debido a su asociación geoquímica, la fuente probable de estos elementos son los pesticidas de arseniatos usados intensivamente en la región desde 1920 hasta inicios de 1970.

Las máximas concentraciones de As están por encima de sus concentraciones en los sedimentos suspendidos en el RC cerca de la frontera internacional del lago Powell y el Navajo Canyon, localizados al norte de la frontera. Las máximas concentraciones de As en RH están por encima del PEL y únicamente ligeramente, por debajo de los niveles tóxicos del PEC. El Pb, Cu y Cr están ligeramente por encima del TEC de los valores nocivos.

La distribución y concentración de los contaminantes orgánicos en RH y RC, es controlada por las diferentes composiciones de las fuentes de agua y el grado de exposición a los flujos de inundación. El enriquecimiento de los COPs, ocurre años después de los flujos de inundación. Los dos eventos de inundación más significantes (~1984 y 1997) se relacionan directamente con los picos de BPCs en ambos núcleos. Sin embargo, los picos de COPs ocurrieron después de 1984 en ambos núcleos y únicamente después de 1997, en la superficie de RC5.

El BPC-138 fue el más abundante en RH y posiblemente se relaciona a los aceites dieléctricos provenientes de los efluentes de la planta geotérmica de Cerro Prieto. El BPC-28 fue el más abundante en la superficie del núcleo RC5, lo que sugiere un depósito atmosférico contemporáneo y/o un redepósito de sedimentos provenientes por aporte a través del río. Las concentraciones de BPCs en ambos núcleos no exceden los valores de los índices propuestos por MacDonald et al. (2000), y Long y Morgan (1990).

El DDE fue el metabolito de los POCs más abundante en RH. En este núcleo la dehidroclorinación del DDT a DDE, más que a DDD, sugiere condiciones dominantes aeróbicas sobre las anaeróbicas. En el núcleo RC5, los clordanos son los compuestos que presentaron las mayores concentraciones. Las concentraciones de los POCs son generalmente bajas en ambos núcleos. Sin embargo, las concentraciones  $\Sigma$ DDTs y  $\Sigma$ DDE registradas en los sedimentos del RH excedieron los valores de los índices establecidos en las guías de calidad del sedimento para ecosistemas dulceacuícolas (TEL, TEL<sub>CCME</sub> y PEL) y los sedimentos marinos (ERL).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta y Asociados, 2001. Inventario de sitios en México con concentraciones elevadas de mercurio. Comisión para la Cooperación Ambiental, INE, México.
- Aigner, E. J., Leone, A. D., Falconer, R. L., 1998. Concentrations and enantiomeric ratios of organochlorine pesticides in soils from the US corn belt. *Environmental Science and Technology*. 32, 112–1168.
- Alles, D. A., 2007. Geology of the Salton Trough. Western Washington University. Disponible en:  
<http://fire.biol.wvu.edu/trent/alles/GeologySaltonTrough.pdf>
- Alloway, B.J., 1990. Heavy metals in soils. John Wiley and Sons, Inc. New York, ISBN0470215984.
- American Rivers Org, 2004. Threat: Looming Pollution Crisis. #1 Colorado River Report. Disponible en:  
[www.azdeq.gov/environ/water/download/riversreport.pdf](http://www.azdeq.gov/environ/water/download/riversreport.pdf)
- Appleby, P. G. y Oldfield, F., 1978. The calculation of  $^{210}\text{Pb}$  dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment. *Catena* 5, 1–8.
- Appleby, P.G. y Oldfield, F., 1983. The assessment of  $^{210}\text{Pb}$  dates from sites with varying sediment accumulation rates. *Hydrobiology* 103: 29-35.
- ATSDR, 2000. Toxicological profile for polychlorinated biphenyls (PCBs): Expert review of the toxicological profile for PCBs. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Public Health Atlanta, Georgia, United States.
- Avendaño-Ruíz, B. R., Schewentesius-Rindermann. 2005. Factores de competitividad en la producción y exportación de hortalizas: en caso del valle de Mexicali, BC, México. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*. 36: 165-192.

- Baba, J., Peterson C. D. y Schrader, H. J., 1991. Modern fine-grained sediments in the Gulf of California during the last century. en : Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T. (Eds.), *The Gulf and Peninsular Provinces of California*. AAPG Memo. 47: 569-587.
- Ballschmitter, K. y Wittlinger, R., 1991. Interhemisphere exchange of hexachlorocyclohexanes, hexachlorobenzene, polychlorobiphenyls and 1,1,1-trichloro-2,2-bis(p-chlorophenyl)ethane in the lower troposphere. *Environmental Science and Technology*. 25: 1103-1111.
- Bargagli R., Cateni D., Nelli L., Olmastroni S, y Zagarese B., 1997. Environmental impact of trace element emissions from geothermal power plants. *Archives Environmental Contamination Toxicology* 33: 172–181.
- Bernal, J. P., Beramendi, L., Orosco, E., Lugo-Ibarra, K. C., Daesslé, L. W., 2010. Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 62:3, pp. 305-323.
- Bhattacharya, J.P. y Walker, R. G., 1992. Deltas. en: *Facies Models: Response to Sea Level Change* (Eds Walker, R.G. y James, N. P.). Geological Association of Canada. St Johns. Newfoundland. pp. 157–178.
- Bloom, N. S., 1992. On the Chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue. *Can. J. Fish. Aquatic Science* 49:1010-1017.
- Blus, L. J. ,1996. DDT, DDD and DDE in birds. In: Beyer, W.N., Heinz, G.H. Redmon-Norwood, A.W. (Eds), *Environmental Contaminants in Wildlife, Interpreting Tissue Concentrations*, pp. 49–71. Boca Raton, FL: CRC Lewis Publishers 490 pp.
- Camacho-Ibar, V. F., Aveytua-Alcázar, L. y Carriquiry, J. D., 2003. Fatty acid reactivities in sediment cores from the northern Gulf of California. *Organic Geochemistry* 34:425-439.
- Carroll, J. y Lerche, I., 2003. *Sedimentary processes, quantification using radionuclides*. Elsevier, 272 pp.

- Carriquiry, J. D. y Sánchez, A., 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California alter nearly a century of discharge loss. *Marine Geology* 158: 125-145.
- Carriquiry, J. D., Sánchez A. y Camacho-Ibar, V. F., 2001. Sedimentation in the Northern Gulf of California after the cessation of Colorado River discharge. *Sedimentary Geology* 144:37-62.
- Castro, R., Lavín M. F. y Ripa P., 1994. Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 99(C2):3249-3261.
- Chang, F. Y., Kao S. J. y Liu, K. K., 1991. Analysis of Organic and Carbonate carbon in sediments. *Acta oceanography. Taiwanica* 27:140-150.
- Chen, W., Zhang, L., Xu, L., Wang, X., Hong, L. y Hong, H., 2002. Residue levels of HCHs, DDTs and PCBs in shellfish from coastal areas of east Xiamen Island and Minjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*. 45: 385-390.
- Chester, R., 1990. *Marine Geochemistry*. Chapman & Hall 698pp.
- Clean Colorado River., 2006. Alliance Recommendations to Address Colorado River Water Quality. 112pp. available at:  
<http://www.azdeq.gov/environ/water/download/ccra06.pdf>
- Cohen, M. J. Henges-Jeck, C. y Castillo-Moreno, G., 2001. A preliminary water balance of the Colorado River delta, 199-1998. *Journal Arid Environment* 49:35-48.
- Cohen, S. M., Lora, L. A., Eldan, M., Lewis, A. S. y Beck, B. D., 2006. Methylated Arsenicals: The implications of Metabolism and Carcinogenicity Studies in rodents to Human Risk Assessment. *Critical Reviews in Toxicology*. 36(2):99-133.
- Committee to Review the Glen Canyon Environmental Studies., 1991. Colorado River ecology and dam management: proceedings of a symposium, May 24-25,1990, Santa Fe, N. Mex. National Academic Press, Washington, D.C.

- Comisión Federal de Electricidad., 2008. Informe de sustentabilidad pdf.:  
Director General Ing. Alfredo Díaz Ayub pp 29 .
- CONAGUA., 2007. Estadísticas del Agua en México 2007. Comisión Nacional  
del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.  
México D.F. 259 p.
- Cortéz-Lara, A. A., Whiteford S. y Chávez-Márquez, M., 2005. Seguridad, agua  
y desarrollo. El futuro de la frontera México-Estados Unidos. Estado  
de Michigan - El Colegio de la Frontera Norte, México. 415 pp.
- Covelli S. y Fontolan G., 1997. Application of a normalization procedure in  
determining regional geochemical baselines. *Environmental Geology*,  
30: 34-45
- Daesslé, L. W., Ramos, S. E., Carriquiry, J. D. y Camacho-Ibar, V. F., 2002.  
Clay dispersal and the geochemistry of manganese in the Northern  
Gulf of California. *Continental Shelf Research* 22:1311-1323.
- Daesslé, L. W., Camacho-Ibar, V. F., Carriquiry, J. D. y Ortiz-Hernández, M. C.,  
2004. The geochemistry and sources of metals y phosphorus in the  
recent sediments from the Northern Gulf California. *Continental Shelf  
Research* 24: 2093-2106.
- Daesslé, L.W., Lugo-Ibarra, K.C., Tobschall, H. J., Melo, M., Gutiérrez-Galindo  
E., A., García-Hernández, J. y Álvarez, L.G., 2009. Accumulation of  
As, Pb, and Cu Associated with the Recent Sedimentary Processes in  
the Colorado Delta, South of the United States-Mexico Boundary.  
*Archives of Environmental Contamination Toxicology* 56:680–692.
- Dalrymple, R. W., Zaitlin, B. A. y Boyd, R., 1992. Estuarine facies models:  
conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of  
Sedimentary Petrology* 62, 1130–1146.
- DGE Dirección General de Ecología., 1993. Plan de ordenamiento  
Ecológico del Estado de Baja California. Dirección General de  
Ecología, Gobierno del Estado de Baja California (Reporte) 122 pp.

- Domagalsky, J. L. y Kuivila, K. M., 1993. Distributions of Pesticides and Organic Contaminants Between Water and Suspended Sediment, San Francisco Bay California. *Estuaries* 16 (3A): 416-426.
- Doong, R. A., Sun Y. C., Liao, P.L., Peng, C. K. y Wu, S.C., 2002. Distribution and fate of organochlorine pesticide residues in sediments from the selected rivers in Taiwan. *Chemosphere* 48:237–46.
- Eisma, D., Mook, W. G. y Laban, C., 1981. An early Holocene tidal flat in the Southern Bight. En: Nio, S.D., Shüttenhelm, R.T.E. y Weering, T.C.E. (Eds), *Holocene Marine Sedimentation in the North Sea Basin. Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, Vol. 5, pp. 229–237. Oxford, U.K.: Blackwell Scientific, 515 p.
- Elliott, T., 1986. Deltas. In: *Sedimentary Environments and Facies* (Ed. Reading, H.G.). Blackwell Scientific Publications, Oxford. pp.113–154.
- Fairbridge, R. W., 1980. The estuary: its definition and geochemical role. In: *Chemistry and geochemistry of estuaries*. En: Olausson, E. y Cato, I., (eds). John Wiley, New York. pp. 1–35.
- Fisher, W. L., McGowen, J. H., Brown, L. F., y Groat, C.G., 1972. *Environmental geologic atlas of the Texas Coastal Zone—Galveston–Houston area*: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, 91 p.
- Fitzgerald W. F., Gill, G. A. y Hewitt, A. D., 1981. Mercury a trace atmospheric gas. Presented at the symposium on the role of the ocean in atmospheric chemistry. IAMAP 3<sup>rd</sup> Scientific Assembly, Hamburg, Germany, August pp. 17-28.
- Foley, P. y Dorsey, J. G., 1984. Clarification of the Limit of Detection in Chromatography. *Chromatographia* 18(9):503-511.

- Fuller, C. C., Van Geen, A., Baskaran, M. y Anima, R., 1999. Sediment chronology in San Francisco Bay, California, defined by  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and  $^{239,240}\text{Pu}$ . *Marine Chemistry* 64:7-27.
- Galindo-Reyes J. G., Leyva, N. R., Millán, O. A. y Lascano, G. A., 2002. Effects of pesticides on DNA and protein of shrimp larvae *Litopenaeus stylirostris* of the California Gulf. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 52(2):191-195.
- Galloway, W. E., 1975. Process Framework for Describing the Morphologic and Stratigraphic Evolution of Deltaic Depositional Systems. In: Broussard, M.L. (Ed.), *Deltas Models for Exploration*. Houston Geological Society, Houston. 87-98.
- García-Hernández, J., King, K. A., Velasco, A. L., Shumilin, E., Mora, M. A. y Glenn, E. P., 2001. Selenium, selected inorganic elements and organochlorine pesticides in bottom material and biota. The Colorado River Delta. *Journal of Arid Environmental* 49:65-89.
- Glenn, E. P., Lee, C. y Felfger, R., 1996. Effects of water management on the wetlands of the Colorado River, Mexico. *Conservation Biology* 10:1175-1186.
- Glenn, E. P., Zamora-Arroyo, F., Nagler, P. L., Briggs, M., Shaw, W. y Flessa, K., 2001. Ecology and conservation of the Colorado River Delta, Mexico. *Journal Arid Environmental* 49:5-15.
- Goldberg, E. D. y Koide, M., 1962. Geochronological studies of deep sea sediments by the ionium/thorium method: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 26: 417-450.
- Gutiérrez-Galindo, E. A., Flores-Muñoz, G., Olguín-Espinoza, G. y Villaescusa-Celaya, J. A., 1990. Biodisponibilidad de metales traza en almejas y mejillón del valle agrícola de Mexicali y alto Golfo de California. *Ciencias Marinas* 10(4): 1-28.

- Gutiérrez-Galindo, E., Flores-Galindo, G., Ortega-García, M. L. y Villaescusa-Celaya, J. A., 1992. Pesticidas en las aguas costeras del Golfo de California: Programa de vigilancia con mejillón 1987-1988. *Ciencias Marinas* 18(2): 77-99.
- Gutiérrez H. y Helio, M., 2000. 28 Years of production at Cerro Prieto Geothermal field. *Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu - Tohoku, Japan. CFE, Residence General of Cerro Prieto, México* 855-859 p.
- Harner, T., Wideman, J. L., Jantunen, L. M. M., Bidleman, T. F., Parkhurst, W. J., 1999. Residues of organochlorine pesticides in Alabama soils. *Environmental Pollution* 106, 323–332.
- Hermanson, M. H., Christensen, E. R., Buser, D. J. y Chen, L., 1991. Polychlorinated biphenyls in dated sediment cores from Green Bay and Lake Michigan. *Journal Great Lakes Research* 17(1): 94-108.
- Herut, B y Sandler, A., 2006. Normalization methods for pollutants in marine sediments: review and recommendations for the Mediterranean. *Israel Oceanographic y Limnological Research Report H18/2006* Submitted to UNEP/MAP April, 23 p.
- Hong, H., Chen, W., Xu, L., Wang, X. y Zhang, L., 1999. Distributions and fate of organochlorine Pollutants in the Pearl River estuary. *Marine Pollution Bulletin* Volume 39 (1-12): 376-382.
- Hom, W., Risebrough, R. W., Soutar, A. y Young, D. R., 1974. Deposition of DDE and Polychlorinated Byphenyls in dated sediments of the Santa Barbara Basic Science 184 (4142): 1197-1199.
- Hunter, K. A., 1993. On the estuarine mixing of dissolved substances in relation to colloid stability and surface properties. *Geochim Cosmochim Acta* 47: 467-473.
- Jayashree, R, Vasudevan, N., 2006. Persistence and Distribution of Endosulfan under Field Condition. *Environmental Monitoring and Assessment*. 131: 475-487

- Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J.M. y Meybeck, M., 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 11: 407-414.
- Krishnaswamy, S., y Lal, D., 1978. Radionuclide limnology. En: Lerman, A. (ed.), *Lakes; Chemistry, Geology, Physics.*, Springer-Verlag, New York, pp. 153-177.
- Koide, M., Soutar, A. y Goldberg, E. D., 1972. Marine Geochronology with  $^{210}\text{Pb}$ . *Earth and Planetary Science Letters* 14:442-446.
- Latimer, J. S. y Quinn, J. G., 1996. Historical Trends and Current Inputs of Hydrophobic Organic Compounds in an Urban Estuary: The Sedimentary Record. *Environmental Science and Technology* 30:623-633.
- Lavín, M. F., Godínez, V. M. y Álvarez, L. G., 1988. Inverse- estuarine features of the upper Gulf of California. *Estuarine Coastal Shelf Science* 47:769-795.
- Lavín, M. F. y Organista, S., 1998. Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal Geophysical Research* 93(C11): 14 033-14,038.
- Lee, R. G., Hung, M., Mackay, H. y Jones, K. C., 1998. Measurement and Modeling of the Diurnal Cycling of Atmospheric PCBs and PAHs. *Environmental Science and Technology* 32: 2172-2179.
- Lemly, A. D., 1993. Guidelines for evaluating selenium data from aquatic monitoring and assessment studies. *Environmental Monitoring and Assessment* 28: 83-100.
- Liu M, Yang, Y., Hou, L., Xu, S., Ou, D., Zhang, B., Liu, Q., 2003. Chlorinated organic contaminants in surface sediments from the Yangtze Estuary and nearby coastal areas, China. *Marine Pollution Bulletin. Baseline* 46: 659-676.
- López-Hoffman, L, Jun, K., Hinojosa-Huerta, O., Calvo, A., Flessa, K. y Zamora, F., 2008. Just add Water? Agricultural return flow and estuarine restoration in the Colorado Delta. *CAERS 2008 Annual*

- Meeting, Arid & Seasonally Arid Estuaries. California Estuarine Research Society.
- Luecke, D., Pitt, J., Congdon, C., Glenn, E., Valdes, C y Briggs, M., 1999. A delta once more: restoring riparian and wetland habitat in the Colorado River Delta. Environmental Defense Fund Publications, Boulder, CO, 51p.
- Matsui, M., Hose, J. E., Garrahan, P. y Jordan, G. A., 1992. Developmental defects in fish embryos from Salton Sea, California. Bulletin Environmental Contamination and Toxicology 48: 914-920.
- Mini Estuary Experiment Workshop summary, 2007. Research Coordination Network for the Colorado River Delta. Mexicali, Baja California, México. Available at: <http://geo.arizona.edu/rcncrd/>
- Miranda-Reyes, F., Reyes-coca, S. y García-López, J., 1990. Climatología de la región noroeste de México. Parte I. Precipitación rep. Tec. EBA México. No. 3, CICESE, Ensenada, Baja California México, 160 pp.
- McDougal, D. T., 1904. Delta and delta vegetation. Botanical Gazette. 38:44-63.
- Mora M. A. y Anderson, D. W., 1991. Seasonal and geographical variation of organochlorine residues in birds from northwest Mexico. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 21:541–548.
- Morrison, J. I., Postel, S. L., Gleick, P. H., 1996. The Sustainable Use of Water in the Lower Colorado River Basin. The Pacific Institute for Studies in Development, Environment, y Security, Oakland, California.
- Nagler, P. L., Glenn, E. P., Hinojosa-Huerta, O., Zamora, F. y Howard, K., 2007. Riparian vegetation dynamics and evapotranspiration in the riparian corridor in the delta of the Colorado River, Mexico. Journal of Environmental Management 88:864-874.
- Nichols, G., 2009. Sedimentology and Stratigraphy. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons, 432 p.

- Núñez-Esquer, O., 1975. Concentración de DDT y sus metabolitos en *Chione californiensis* de la parte norte del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 2(1):6-13.
- Oldfield, F. y Appleby, P.G., 1984. Empirical testing of  $^{210}\text{Pb}$  dating models for lake sediments. En: *Lake sediments and environmental history*, E.Y. Hayworth y J.W.G. Lund, (Eds). University of Minnesota Minneapolis Press, pp. 93-124.
- ONU/CEE., 1999. Comisión Económica Europea de la Organización de las Naciones Unidas, 1999. Disponible en: [www.unece.org](http://www.unece.org).
- Ozkoc, H. B., Bakan, G., Ariman, S., 2007. Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides along the Black Sea coast *Environmental Geochemistry and Health*. 29: 59-68.
- Palacios-Hernández, E., Beier, E., Lavín, M. F. y Ripa, P., 2002. The effect of winter mixing on the circulation of the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* 32:705-728.
- Pennington, W., Tutin, T.G., Cambray, R.S. y Fisher, E.M., 1973. Observations on lake sediments using fallout  $^{137}\text{Cs}$  as a tracer: *Nature* 242: 324-326.
- PISDES (Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security), 1999. *Memorias Del Taller Aspectos del agua en la región fronteriza de la cuenca del Río Colorado*. Mexicali el 18 y 19 de noviembre de 1999 (Memorias).
- Pritchard, D. W., 1955. Estuarine circulation patterns. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 81:717, 1 – 11.
- Plan de Ordenamiento Ecológico del Municipio de Mexicali (POMEMM)., 2007. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx>.
- Pourchet, M., Pinglot, J.F. y Gascard, J.C., 1986. The northly extent of Chernobyl contamination: *Nature*, 323: 676-677.

- Pourchet, M., Pinglot, J.F., Reynaud, L. y Holdsworth, G., 1988. Identification of Chernobyl fall-out as a new reference level in Northern Hemisphere glaciers: *Journal of Glaciology*, 34, 183-187.
- Presser, T. S., Silvestre, M. A. y Low, W. H., 1994. Bioaccumulation of selenium from natural geologic sources in western states and its potential consequences. *Environmental Management* 18:423-436.
- Project WET International Foundation, 2005 in Clean Colorado River. 2006. Alliance Recommendations to Address Colorado River Water Quality. 112 p.
- Qiu, X., Zhu, T., Li, J., Pan, H., Li, Q., Miao, G. y Gong, J. 2004. Organochlorine pesticides in the air around the Taihu Lake, China. *Environmental Science and Technology* 38. 1368-1374.
- Radtke, D. B., Kepner, W. G. y Effertz, R. J. 1988. Reconnaissance investigation of water quality, bottom sediment, and biota associated with irrigation drainage in the lower Colorado River Valley, Arizona, California, and Nevada, 1986-87. USGS 88-4002. Final Technical Report. U. S. Geological Survey, Tucson. Arizona, pp. 127-132.
- Rhodes, S. L., Ely, D. y Dracup, J. A., 1984. Climate and the Colorado River: The limits of management, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 65, 682–691, 1984.
- Robbins, J.A. y Edgington, D.N., 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 39: 285-304.
- Robbins, R.A., 1978. Geochemical and geophysical application of radioactive lead. En Nriagu, J.O. (Ed.), *The biogeochemistry of lead in the environment*: Amsterdam, Elsevier Publishing, pp.286-383.
- Rodriguez, C. A., Flessa, K. W., Téllez-Duarte, M. A., Dettman, D. L. y Ávila-Serrano, G. A., 2001. Macrofaunal and isotopic estimates of the former extent of the Colorado River Estuary, upper Gulf of California, México. *Journal Arid Environmental* 49:183-193.

- SCCWRP, 1997. Characteristics of Effluents from Large Municipal Wastewater Treatment Facilities in 1995 (Raco-Rands, V.). 3-16 En: S. B. Weisberg, C. Francisco, D. Hallock, L. (Eds.) Southern California Coastal Water Research Project Annual Report 1996. Westminster, CA, pp.3-16
- SEMARNAT, 2007. Inventario y caracterización de las descargas que afectan la salud de los ecosistemas del delta del Rio Colorado, Mexico. Informe técnico final. Proyecto CONACYT/SEMARNAT 2002-C01-0033 20 p.
- Shumilin, E. N., Carriquiry, J. D., Camacho-Ibar, V. F., Sapozhnikov, D. Kalmykov, S., Sanchez, A., Aguiñaga-Garcia, S. y Sapozhnikov, Y. A., 2002. Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River Delta and Upper Gulf of California. *Marine Chemistry* 79:113-131.
- Singh, K. P., Malik, A., Sinha, S., 2007. Persistent Organochlorine Pesticide Residues in Soil and Surface Water of Northern Indo-Gangetic Alluvial Plains. *Environmental Monitoring and Assessment*. 125: 147-55.
- Smith J. D. y Hamilton T. F., 1992. Modelling of  $^{210}\text{Pb}$  behaviour in the catchment and sediment of Lake Tali Karng, Victoria, and estimation of recent sedimentation rates. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 36(1): 15 – 22.
- Skorupa, J. P., Morman, S. P. y Sefchick-Edwards, J. S., 1996. Guidelines for interpreting selenium exposures of biota associated with nonmarine aquatic habitats. U.S. Fish and Wildlife Service, prepared for: The National Irrigation Water Quality Program. Sacramento, C.A. 74 pp.
- StatSoft. Inc. 2008. Statistica 8.0 program (Data analysis software system), Version 8,0 StatSoft. [on-line] <<http://www.statsoft.com>>
- Staunton, S., 2002, Direct and indirect effects of organic matter on metal immobilisation in soil, en Violante, A. (ed.), *Soil Mineral-Organic*

- Matter-Microorganism interactions and ecosystem health Volume 28B. Ecological significance of the interactions among clay minerals, organic matter and soil biota: Amsterdam, Elsevier, pp.79-97.
- Sykes, G., 1937. Delta, estuary, and lower portion of the channel of the Colorado River 1933–1935. Carnegie Institution of Washington, Washington, DC, 70 p.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C. y Bisson, M., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* 51 (7): 844-851.
- Tanabe, S., Madhusree, B., Öztürk, A. A., Tatsukawa, R., Miyazaki, N., Özdamar, E., Aral, O., Samsun, O. y Öztürk, B., 1997. Persistent organochlorine residues in harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) from the Black Sea. *Marine Pollution Bulletin* 34: 338-347.
- Thompson, R. W., 1968. Tidal flat sedimentation on the Colorado River delta, northwestern Gulf of California. Geological Society American, Boulder Colorado. Memoir 107.
- USDI, 1998. U.S. Department of Interior. Guidelines for interpretation of the biological effects of selected constituents in biota, water and bottom material. Denver, CO: National Irrigation Water Quality Program Information Report No. 3. Bureau of Reclamation 198 p.
- Valdés-Casillas, C., Hinojosa-Huerta, O, Muñoz-Viveros, M., Zamora-Arroyo, F., Carrillo-Guerrero, Y., Delgado-Garcia, S., López-Camacho, M., Glenn, E. P., Garcia, J., Riley, J., Baumgartner, D., Briggs, M., Lee, C.T., Chavarria-Correa, E., Congdon, C. y Luecke, D., 1998. Information database and local outreach program for the restoration of the Hardy River wetlands, lower Colorado River delta, Baja California and Sonora, México. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Campus Guaymas, 102 p.

- Valette-Silver, N., Bricker, S. B. y Salomons, W., 1993. Historical Trends in Contamination of Estuarine and Coastal Sediments: An Introduction to the Dedicated Issue. *Estuaries* 16 (3B): 575-576.
- Vandivere, W. B. y Vorster, P., 1984. Hydrology analysis of the Colorado River floods of 1983. *Geojournal* 9(4):343-350.
- Venkatesan, M. I., De Leon, R. P., Van Geen, A. y Luoma, S. N., 1999. Chlorinated hydrocarbon pesticides and polychlorinated biphenyls in sediment cores from San Francisco Bay. *Marine Chemistry* 64:85-97.
- Vial, J. y Hardy, A., 1999. Experimental Comparison of the different approaches to estimate LOD and LOQ of and HPLC method. *Analytical Chemistry* 71(14): 2672-2677.
- Walsh, D. F., Berger, B. L. y Bean, J. R., 1977. Residues in fish, wildlife and estuaries. *Pesticides Monitoring Journal*, 11: 5-32.
- Walsh, J. N., 1997. Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, Longman, London.
- Wania, F. y McKay, D., 1996. Tracking the distribution of Persistent Organic Pollutants. *Environmental Science and Technology*. 30 (9): 390-396.
- Xue, N., Zhang, D., Xu, X., 2006. Organochlorinated pesticide multiresidues in surface sediments from Beijing Guanting reservoir. *Water Research*. 40: 183-194.
- Zamora-Arroyo, F., Pitt, J., Glenn, E., Nagler, P., Moreno, M., Garcia, J., Hinojosa-Huerta, O., de la Garza, M. y Parra, I., 2005. Conservation Priorities in the Colorado River Delta Mexico and the United States. Sonoran Institute, Tucson, Arizona.
- Zhang, G., Min, Y. S., Mai, B. X., Sheng, G. Y., Fu, J. M., Wang, Z. S., 1999. Time trend of BHCs and DDTs in a sedimentary core in Macao estuary, southern China. *Marine Pollution Bulletin* 39 (1-12): 326-330.

Zengel, S., Mertetsky, V., Glenn, E., Felger, R., Ortiz, D., 1995. Ciénega de Santa Clara, a Remnant Wetland in the Río Colorado Delta (México): Vegetation Distribution and the Effects of Water Flow Reduction.. Ecological Engineering 4: 19.36.

## 7. ANEXOS

**Tabla X.** Concentraciones de Óxidos mayores de los núcleos del delta del RC.

No.	Núcleo	Horizonte	Arcillas	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO*50	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *50	(SO <sub>3</sub> )	(Cl)	LOI	SUMA
1	CSC	0	1.90	41.60	0.28	5.17	1.40	4.60	1.81	21.08	1.04	1.45	0.09	4.70	<0.04	<0.05	22.76	97
2	CSC	4	1.80	55.70	0.31	6.38	1.64	2.40	1.82	14.14	1.12	1.85	0.10	4.80	0.19	0.08	15.50	99
3	CSC	9	3.40	65.60	0.42	9.08	2.64	3.15	2.30	6.14	1.32	2.41	0.12	5.75	0.62	0.03	8.17	99
4	CSC	14	25.00	70.50	0.35	8.97	2.44	2.65	2.01	4.33	1.35	2.42	0.10	4.85	0.23	0.03	6.25	99
5	CSC	19	28.20	65.00	0.46	10.52	3.16	2.85	2.42	5.15	1.47	2.42	0.13	6.50	0.05	0.06	8.38	99
6	CSC	24	41.60	51.40	0.61	16.15	5.03	3.30	3.49	5.50	1.63	2.93	0.18	8.85	0.12	0.10	12.23	100
7	CSC	28	25.20	50.50	0.62	15.36	4.73	3.15	3.40	6.79	1.70	2.83	0.17	8.40	0.15	0.11	13.06	100
8	RC1	0	16.20	46.90	0.62	11.91	3.77	7.10	3.08	10.39	1.03	2.39	0.20	9.90	0.07	0.07	18.25	99
9	RC1	3	16.50	46.20	0.60	12.20	4.26	4.00	3.06	10.78	1.00	2.62	0.24	11.90	0.16	0.06	19.11	100
10	RC1	10	22.20	47.00	0.56	11.84	3.95	3.70	3.09	10.15	0.99	2.45	0.19	9.65	<0.01	0.03	19.01	99
11	RC1	13	25.60	46.40	0.57	11.90	3.97	4.10	3.13	10.85	1.04	2.41	0.19	9.40	0.46	0.06	18.26	99
12	RC1	19	34.60	46.70	0.57	12.65	4.24	4.40	3.22	10.14	1.03	2.50	0.19	9.40	0.62	0.05	17.86	100
13	RC1	26	37.80	50.00	0.61	13.57	4.56	4.10	3.41	7.62	1.06	2.64	0.19	9.70	0.26	0.04	14.64	99
14	RC1	31	43.10	49.50	0.62	14.00	4.78	4.85	3.19	7.47	0.97	2.62	0.19	9.60	0.11	0.03	15.44	99
15	RC1	36	43.80	49.30	0.62	14.20	4.87	5.25	3.21	7.46	0.96	2.63	0.19	9.70	0.14	0.03	15.77	100
16	RC1	39	47.00	47.90	0.61	14.39	4.87	4.85	3.17	7.56	0.83	2.62	0.19	9.45	0.04	0.02	17.07	99
17	RC1	45	33.80	46.50	0.54	11.79	4.06	6.10	2.88	11.82	0.90	2.37	0.17	8.60	0.02	0.03	18.42	100
18	RC1	49	54.70	41.50	0.51	12.47	4.40	5.70	2.93	13.41	0.79	2.35	0.17	8.50	0.31	0.07	20.89	100
19	RC1	54	53.20	48.50	0.62	15.38	5.15	4.20	3.43	6.02	0.85	2.76	0.20	9.80	0.18	0.03	16.36	100
20	RC3	0	19.80	47.20	0.58	12.41	4.06	3.45	3.19	9.01	1.11	2.48	0.21	10.25	0.14	0.07	18.99	100
21	RC3	6	17.40	47.20	0.60	12.32	4.02	3.40	3.17	9.39	1.06	2.50	0.20	10.00	0.45	0.06	18.79	100
22	RC3	12	24.60	47.30	0.58	12.65	4.19	3.40	3.22	9.07	1.07	2.53	0.20	9.80	0.45	0.07	18.44	100
23	RC3	18	28.60	47.60	0.57	12.26	4.02	3.65	3.20	9.60	1.19	2.48	0.19	9.55	0.43	0.08	18.33	100
24	RC3	24	34.80	49.30	0.58	12.79	4.18	4.15	3.26	8.60	1.21	2.55	0.19	9.35	0.94	0.07	17.09	101
25	RC3	30	45.10	47.40	0.58	13.66	4.59	4.30	3.42	8.22	1.04	2.60	0.19	9.60	0.39	0.06	17.96	100
26	RC3	33	47.70	49.00	0.61	14.22	4.75	4.25	3.56	6.97	1.01	2.69	0.19	9.60	0.30	0.05	16.83	100

27	RC3	36	51.50	48.70	0.61	14.67	4.95	4.55	3.57	6.23	0.98	2.72	0.19	9.60	0.50	0.04	16.78	100
28	RC3	39	53.70	48.70	0.62	14.88	4.93	4.30	3.61	6.08	1.03	2.73	0.19	9.70	0.14	0.05	16.81	100
29	RC3	42	50.10	49.40	0.61	14.35	4.77	4.35	3.53	6.54	1.08	2.71	0.19	9.60	0.15	0.04	16.45	100
30	RC3	48	43.20	49.40	0.62	14.50	4.81	4.30	3.55	6.40	0.99	2.70	0.20	9.75	0.22	0.04	16.53	100
31	RC3	54	34.20	51.00	0.62	13.40	4.42	4.20	3.46	7.14	1.08	2.64	0.19	9.60	0.18	0.04	15.48	100
32	RC3	60	28.70	50.10	0.61	14.35	4.69	4.25	3.52	6.37	1.00	2.69	0.19	9.50	0.19	0.04	16.08	100
33	RC3	66	52.10	48.60	0.61	14.88	4.98	4.40	3.58	6.15	0.95	2.71	0.19	9.60	0.30	0.04	16.77	100
34	RC3	72	41.20	49.90	0.60	13.39	4.44	4.45	3.41	7.88	1.10	2.61	0.19	9.60	0.28	0.04	16.13	100
35	RC3	78	25.60	52.90	0.58	11.94	3.83	4.05	3.21	8.18	1.25	2.55	0.19	9.25	0.19	0.04	14.54	100
36	RC3	84	15.00	55.20	0.60	11.34	3.61	3.85	3.12	8.14	1.25	2.53	0.18	9.10	0.12	0.03	13.53	100
37	RC3	90	15.80	56.90	0.56	11.25	3.46	3.75	3.02	7.64	1.27	2.55	0.17	8.65	0.10	0.03	12.28	99
38	RC3	96	24.00	57.70	0.67	11.10	3.56	3.75	3.05	7.46	1.25	2.45	0.20	10.05	0.10	0.03	12.70	100
39	RC3	102	11.30	58.60	0.57	10.44	3.20	3.65	2.89	7.69	1.36	2.47	0.18	8.75	0.13	0.03	11.81	100
40	RC3	107	52.60	49.00	0.62	14.76	4.93	4.20	3.57	6.18	0.94	2.72	0.19	9.70	0.17	0.04	16.61	100
41	RC3	113	32.60	52.40	0.60	13.10	4.29	4.00	3.37	6.99	1.08	2.64	0.19	9.40	0.12	0.03	14.83	100
42	RC3	119	20.20	56.10	0.58	11.33	3.57	3.80	3.11	7.70	1.25	2.54	0.18	9.10	0.09	0.03	12.97	100
43	RC3	125	18.90	54.60	0.59	10.89	3.50	4.10	3.10	8.87	1.22	2.47	0.18	9.15	0.26	0.03	13.93	100
44	RC3	130	12.90	55.70	0.56	11.06	3.50	3.85	2.98	8.06	1.43	2.50	0.18	8.80	0.18	0.04	13.26	100
45	RC4	1	20.20	47.50	0.53	11.32	3.88	3.75	2.74	10.40	0.92	2.26	0.19	9.40	0.04	0.06	19.59	100
46	RC4	6	25.00	45.90	0.64	11.43	3.60	3.60	2.74	10.31	0.95	2.18	0.18	9.20	0.08	0.07	20.20	98
47	RC4	12	29.50	47.80	0.55	11.77	4.01	3.75	2.84	10.43	0.91	2.34	0.18	8.95	0.43	0.05	18.90	100
48	RC4	15	32.90	50.50	0.55	11.56	3.91	3.80	2.78	9.97	0.94	2.33	0.17	8.60	0.34	0.05	16.55	100
49	RC4	20	29.90	51.80	0.59	12.05	4.06	3.95	2.77	8.12	0.93	2.43	0.18	9.00	0.54	0.03	15.91	100
50	RC4	25	34.90	47.90	0.62	13.75	4.82	4.75	3.11	7.81	0.88	2.55	0.21	10.25	0.35	0.04	17.38	100
51	RC4	30	43.50	48.00	0.66	14.17	4.63	4.30	3.16	7.32	0.90	2.60	0.21	10.35	0.08	0.04	17.07	99
52	RC4	35	32.80	51.20	0.62	12.71	4.19	3.95	2.88	7.54	0.96	2.49	0.20	9.75	0.07	0.04	16.27	99
53	RC4	36	27.20	52.50	0.56	11.68	3.95	4.10	2.70	8.55	1.07	2.43	0.21	10.45	0.32	0.05	15.66	100
54	RC4	40	18.00	60.50	0.50	9.94	3.67	3.65	2.16	6.57	1.21	2.36	0.14	7.20	0.27	0.03	11.77	99
55	RC4	45	14.40	64.10	0.47	9.09	2.57	2.85	2.15	6.93	1.12	2.37	0.14	6.85	0.05	0.02	10.18	99
56	RC4	51	22.20	60.30	0.50	9.74	2.91	3.15	2.31	8.20	1.01	2.32	0.15	7.45	0.21	0.03	12.36	100

57	RC5	0	26.30	46.50	0.58	12.49	4.16	3.65	3.21	9.85	1.13	2.45	0.21	10.30	0.18	0.08	19.57	101
58	RC5	6	26.90	46.40	0.58	12.41	4.17	3.75	3.19	9.94	1.12	2.46	0.21	10.30	0.27	0.09	19.06	100
59	RC5	12	25.90	46.90	0.57	12.38	4.03	3.60	3.20	10.39	1.18	2.45	0.20	10.20	0.06	0.08	19.62	101
60	RC5	18	27.30	47.60	0.58	12.59	4.25	3.65	3.25	9.84	1.12	2.52	0.21	10.55	0.47	0.07	18.59	101
61	RC5	24	27.80	48.40	0.57	12.41	4.07	3.85	3.23	10.04	1.22	2.51	0.19	9.50	0.52	0.06	17.87	101
62	RC5	30	33.70	47.80	0.58	13.14	4.26	4.30	3.34	9.55	1.07	2.56	0.19	9.40	0.40	0.06	17.45	101
63	RC5	36	42.90	54.20	0.62	12.95	4.17	4.05	3.41	7.86	1.23	2.68	0.19	9.45	0.17	0.04	13.09	101
64	RC5	42	16.70	57.30	0.59	11.25	3.46	3.75	3.09	8.22	1.30	2.55	0.18	9.10	0.10	0.03	11.88	100
65	RC5	48	29.70	54.40	0.61	13.00	4.26	4.15	3.37	8.04	1.22	2.66	0.19	9.40	0.11	0.04	12.64	101
66	RC5	54	16.10	56.40	0.58	11.53	3.69	3.95	3.16	8.10	1.31	2.60	0.18	8.80	0.14	0.03	11.78	100
67	RC5	60	25.30	55.00	0.61	13.08	4.18	4.15	3.35	7.54	1.18	2.69	0.19	9.45	0.13	0.04	12.14	100
68	RC5	63	43.50	52.40	0.63	14.51	4.74	4.25	3.60	6.87	1.04	2.78	0.20	9.80	0.21	0.04	12.77	100
69	RC5	69	21.70	56.30	0.61	12.35	3.94	3.95	3.28	7.67	1.22	2.66	0.19	9.35	0.17	0.03	11.96	101
70	RC5	75	40.60	51.00	0.65	16.03	5.32	4.65	3.69	6.38	0.93	2.88	0.20	10.15	0.23	0.04	13.63	101
71	RC5	81	55.10	50.30	0.64	15.76	5.27	4.55	3.63	6.54	0.91	2.85	0.20	10.05	0.28	0.04	13.32	100
72	RC5	87	44.90	52.10	0.64	15.04	4.93	4.35	3.57	6.67	0.99	2.82	0.20	9.95	0.27	0.04	12.92	100
73	RC5	93	39.30	53.70	0.65	14.05	4.64	4.35	3.41	7.15	1.07	2.75	0.20	9.90	0.26	0.03	13.75	102
74	RC5	99	51.80	51.40	0.64	15.61	5.11	4.35	3.63	6.46	1.10	2.89	0.20	10.10	0.22	0.04	13.11	101
75	RC5	105	54.60	50.70	0.64	16.06	5.34	4.40	3.67	6.25	0.91	2.90	0.21	10.25	0.19	0.03	13.41	100
76	RC5	110	49.30	52.20	0.64	15.10	4.94	4.35	3.59	6.70	0.98	2.85	0.20	10.00	0.14	0.03	12.67	100
77	RC5	116	52.30	50.60	0.64	15.81	5.32	4.40	3.62	6.38	0.88	2.89	0.20	10.10	0.21	0.03	13.60	100
78	RC5	122	23.50	54.70	0.63	12.98	4.20	4.15	3.29	7.51	1.11	2.71	0.20	9.75	0.09	0.03	12.39	100
79	RC5	127	46.60	54.30	0.61	13.53	4.38	4.20	3.33	7.46	1.08	2.74	0.19	9.60	0.21	0.03	12.65	101
80	RC5	133	31.90	53.40	0.63	13.53	4.53	4.25	3.33	7.38	1.26	2.73	0.20	9.75	0.20	0.03	12.71	100
81	RC5	138	17.70	57.80	0.60	11.89	3.67	3.90	3.09	7.74	1.24	2.66	0.19	9.25	0.11	0.02	11.32	100
82	RC5	143	26.10	56.80	0.62	12.16	3.90	3.85	3.09	7.33	1.16	2.64	0.19	9.35	0.11	0.02	11.56	100
83	RH	0	12.70	52.00	0.56	10.35	3.42	4.30	2.51	10.74	1.34	2.18	0.18	9.00	0.32	0.08	15.10	99
84	RH	3	18.60	51.50	0.55	10.90	3.50	4.75	2.56	10.34	1.22	2.27	0.18	9.10	<0.01	0.03	15.53	99
85	RH	7	43.00	48.00	0.62	14.23	4.88	6.10	3.18	7.84	0.86	2.66	0.19	9.65	0.22	0.04	16.23	99
86	RH	15	47.20	48.74	0.67	15.00	5.18	5.49	3.17	7.48	0.91	3.00	0.24	11.84	<0.01	0.03	16.13	101
87	RH	19	38.20	48.60	0.62	13.74	4.80	5.20	3.09	8.54	1.00	2.72	0.20	9.75	0.34	0.04	16.56	100
88	RH	22	43.00	48.20	0.61	14.18	4.85	5.35	3.09	8.54	0.92	2.76	0.20	9.90	0.25	0.05	16.87	101
89	RH	27	49.40	47.39	0.66	15.22	5.36	5.20	3.10	7.64	0.84	3.08	0.25	12.40	<0.01	0.04	16.92	101

90	RH	33	14.30	52.50	0.63	11.05	3.89	6.20	2.81	10.22	1.34	2.52	0.21	10.50	<0.01	0.02	13.34	99
91	RH	39	32.20	46.60	0.61	13.19	4.68	8.10	3.04	10.99	1.05	2.68	0.21	10.70	0.61	0.06	18.28	102
92	RH	45	18.90	50.50	0.61	11.43	3.94	8.25	2.97	10.40	1.29	2.55	0.23	11.45	0.34	0.04	14.56	99
93	RH	51	14.20	46.50	0.54	9.34	3.32	17.65	2.48	14.82	1.36	2.23	0.18	9.05	0.68	0.07	16.05	98
94	RH	55	15.90	40.70	0.49	8.98	3.37	15.50	2.44	18.30	1.06	2.10	0.17	8.70	<0.01	0.04	21.15	99
95	RH	61	27.80	40.40	0.51	10.03	3.63	15.95	2.60	16.74	0.97	2.18	0.17	8.45	1.53	0.08	20.99	100
96	RH	63	49.30	44.80	0.57	12.59	4.42	10.90	2.91	11.53	0.89	2.51	0.18	8.80	1.07	0.05	18.71	101
97	RH	69	41.90	49.60	0.61	13.40	4.57	6.70	3.02	9.19	0.97	2.67	0.18	9.05	0.37	0.04	15.51	100
98	RH	75	36.70	51.90	0.63	13.46	4.48	4.95	3.10	7.92	1.02	2.71	0.19	9.30	0.16	0.04	14.33	100
99	RH	81	40.60	51.70	0.62	13.57	4.35	4.90	3.05	8.11	0.98	2.70	0.19	9.35	0.12	0.04	14.28	100
100	RH	85	58.90	49.20	0.62	15.03	4.84	4.25	3.13	6.68	0.85	2.80	0.19	9.55	<0.01	0.01	15.87	99
101	RH	89	55.60	50.10	0.63	15.92	5.18	3.70	3.23	6.29	0.85	2.86	0.20	9.90	0.13	0.04	14.85	100
102	RH	93	31.30	52.10	0.62	12.76	4.34	4.30	2.74	8.33	1.21	2.57	0.19	9.25	0.42	0.04	14.57	100
103	LS	0	17.80	52.40	0.41	10.77	2.12	2.15	2.26	7.67	4.71	1.67	0.17	8.35	1.02	0.93	19.33	104
104	LS	5	10.60	53.10	0.39	10.11	1.85	2.10	1.70	8.68	4.54	1.53	0.17	8.55	1.05	0.76	14.09	98
105	LS	10.5	5.20	51.30	0.37	9.88	1.47	1.90	1.35	8.75	5.37	1.26	0.12	6.15	2.27	1.16	14.83	98
106	LS	15	4.50	59.80	0.47	11.42	1.85	2.30	1.40	6.65	4.49	1.40	0.15	7.35	1.24	0.54	10.17	100
107	LS	19.5	8.10	53.70	0.57	11.46	3.42	3.65	2.85	5.78	5.23	2.18	0.19	9.40	0.41	1.05	13.84	101
108	LS	24.5	8.40	57.20	0.56	11.67	3.21	3.20	2.74	5.48	4.69	2.13	0.18	9.05	0.19	0.71	11.80	101
109	LS	30	7.30	57.20	0.61	11.09	2.62	3.15	2.05	6.32	4.79	1.66	0.18	9.00	1.04	0.76	12.25	101
110	LS	35	9.60	61.90	0.45	12.20	2.31	2.60	2.12	5.05	4.66	1.63	0.15	7.30	0.41	0.57	9.47	101
111	LS	40.5	7.90	53.90	0.65	11.60	3.93	3.55	3.33	5.62	4.33	2.39	0.20	10.10	0.42	0.77	12.82	100
112	LS	45	8.30	56.50	0.56	11.73	3.48	4.30	3.07	5.63	4.11	2.14	0.18	9.20	0.69	0.62	11.56	100
113	LS	48	8.50	53.90	0.64	11.14	4.00	4.10	3.27	6.01	3.98	2.49	0.19	9.60	0.77	0.74	13.16	100

**Tabla XI.** Concentraciones de metales analizados por FDRX en  $\mu\text{g.g}^{-1}$  en núcleos del delta del RC.

No.	Núcleo	Horizonte	As	Ba	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	Hf	Hg	La	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	U	V	Y	Zn	Zr
1	CSC	0	1	324	30	<2	28	11	8	3		12	<2	<3	9	41	1132	6	<3	34	16	36	170
2	CSC	4	2	411	54	5	35	11	9	3		11	6	3	12	55	734	4	<1	39	17	34	197
3	CSC	9	4	546	45	9	42	17	11	4		18	8	12	19	80	273	7	7	58	23	56	182
4	CSC	14	4	524	60	6	40	18	10	3		16	7	10	17	77	200	5	4	54	22	51	136
5	CSC	19	5	496	45	10	53	20	14	5		23	9	17	21	86	206	10	6	65	24	62	180
6	CSC	24	13	428	64	18	73	25	22	8		37	14	26	23	122	211	10	7	114	31	94	129
7	CSC	28	11	436	42	17	64	22	19	7		40	13	23	18	116	232	5	6	112	29	91	131
8	RC1	0	4	412	65	10	54	24	16	7		27	9	10	5	105	433	11	8	79	25	75	148
9	RC1	3	20	470	86	16	66	24	20	30	32	116	16	8	28	124	504	20	8	104	20	84	118
10	RC1	5									30												
11	RC1	10	4	418	69	12	63	25	16	7	29	32	11	11	16	109	429	8	3	87	26	87	144
12	RC1	13	7	417	45	12	56	24	16	7		39	11	12	18	107	459	9	5	86	28	86	148
13	RC1	19	8	379	75	12	56	24	16	6		29	11	19	20	115	427	7	9	95	26	89	141
14	RC1	26	9	397	68	13	64	22	19	6		36	13	19	19	113	298	10	6	97	30	90	146
15	RC1	31	9	489	70	16	63	31	19	6		46	14	24	29	114	286	11	5	114	32	109	145
16	RC1	36	9	507	80	14	63	31	18	6		38	14	21	28	116	286	11	6	113	32	108	143
17	RC1	39	9	509	62	12	71	31	19	5	36	49	13	21	29	117	302	8	8	111	30	113	139
18	RC1	45	6	472	55	17	62	25	16	4	33	27	10	13	28	103	431	9	4	92	26	91	155
19	RC1	49	11	405	56	11	53	20	17	5		29	9	15	23	109	561	7	8	92	25	88	140
20	RC1	54	8	434	69	14	67	25	19	7		43	14	20	28	124	252	7	7	115	31	100	132
21	RC3	0	4	419	56	13	56	26	16	8		39	12	11	18	112	410	9	6	83	27	79	144
22	RC3	6	5	405	52	9	56	24	17	8		36	12	12	15	113	427	8	6	76	26	74	146
23	RC3	12	8	381	59	15	57	22	16	6		33	13	16	18	114	406	10	6	95	27	87	146
24	RC3	18	8	414	59	13	58	20	15	5		41	12	16	18	111	433	9	5	80	28	85	149
25	RC3	24	8	394	47	13	59	24	16	4		30	13	16	18	113	369	8	7	92	28	86	148
26	RC3	30	8	367	61	12	58	23	18	6		33	12	16	24	118	346	9	7	108	28	92	136
27	RC3	33	8	378	75	12	68	23	18	4		39	13	22	24	118	280	6	6	95	30	94	135
28	RC3	36	10	346	78	13	61	23	19	6		43	13	20	23	120	263	7	7	104	30	94	133

29	RC3	39	8	339	72	13	66	21	19	7	34	16	19	22	121	253	8	8	114	29	96	132
30	RC3	42	10	364	74	14	64	22	17	6	32	14	18	19	116	259	9	6	108	30	95	134
31	RC3	48	10	356	68	14	66	20	19	7	38	14	19	21	119	256	8	6	110	30	95	135
32	RC3	54	8	405	61	13	61	24	18	4	35	14	16	24	112	267	9	6	100	30	89	149
33	RC3	60	8	352	68	12	63	33	18	7	40	13	18	23	117	254	8	5	115	30	93	135
34	RC3	66	12	342	73	15	68	21	18	3	36	13	21	21	122	261	10	8	111	31	97	132
35	RC3	72	7	367	85	13	59	20	18	6	46	14	15	23	112	300	10	8	99	28	88	138
36	RC3	78	7	435	66	12	59	19	16	5	37	12	16	18	102	289	10	5	81	28	77	145
37	RC3	84	5	459	66	10	57	18	14	4	29	13	15	17	98	279	8	6	79	28	73	167
38	RC3	90	5	463	52	12	56	15	15	5	27	12	13	18	96	265	7	5	77	27	71	147
39	RC3	96	5	438	67	11	60	7	14	5	36	15	15	17	94	254	7	5	83	31	69	213
40	RC3	102	3	474	61	6	53	17	13	6	30	12	11	17	92	261	7	6	68	27	65	181
41	RC3	107	8	339	66	16	65	23	19	7	52	11	19	24	120	251	11	7	111	30	97	132
42	RC3	113	7	417	63	13	62	24	17	4	36	11	18	21	112	263	8	5	95	29	87	144
43	RC3	119	4	454	59	13	61	18	16	6	26	13	15	17	97	265	9	8	78	29	69	164
44	RC3	125	7	443	45	12	57	17	14	3	25	13	12	16	96	299	7	5	74	27	71	169
45	RC3	130	5	462	75	12	55	18	14	6	26	11	15	18	98	286	10	8	80	27	70	160
46	RC4	1	3	458	57	13	51	31	16	7	30	10	13	10	105	489	10	7	77	24	81	176
47	RC4	6	1	458	43	12	48	32	14	7	29	6	8	5	94	457	10	5	66	23	75	156
48	RC4	12	8	441	60	16	55	31	16	6	33	11	16	18	110	475	7	5	84	24	89	176
49	RC4	15	6	456	60	13	52	30	15	6	27	10	17	13	103	440	10	10	78	27	83	191
50	RC4	20	14	535	65	14	55	33	15	6	41	10	19	26	107	346	7	7	79	29	89	180
51	RC4	25	12	527	54	13	62	40	17	4	31	13	16	18	124	334	8	8	109	30	108	149
52	RC4	30	4	556	66	13	63	42	17	5	33	13	14	13	118	316	9	8	99	30	102	143
53	RC4	35	6	542	66	12	53	50	16	4	30	10	14	13	108	331	10	6	87	29	92	183
54	RC4	36	9	498	63	10	55	33	16	5	40	12	17	14	108	380	11	8	93	27	89	202
55	RC4	40	10	508	59	10	51	21	12	6	24	9	14	19	97	293	7	6	70	26	70	260
56	RC4	45	3	539	69	9	48	17	12	4	22	10	11	18	86	274	8	7	61	25	62	244
57	RC4	51	4	504	55	9	50	21	12	4	22	12	13	20	92	332	7	5	67	27	71	245
58	RC5	0	4	408	69	11	55	20	17	6	31	12	14	15	113	445	5	5	93	28	85	145
59	RC5	6	6	426	71	13	57	22	17	6	23	12	12	6	114	448	7	5	84	26	80	144
60	RC5	12	4	427	66	15	55	22	16	5	36	13	14	9	113	478	10	9	91	27	82	149
61	RC5	18	6	414	56	10	57	25	17	5	39	13	14	21	116	429	8	8	90	27	88	145

62	RC5	24	6	402	47	10	58	26	16	5	31	11	14	18	113	435	5	8	84	28	85	147
63	RC5	30	6	372	70	18	59	26	17	5	30	13	16	19	117	412	9	5	90	27	92	144
64	RC5	36	5	432	71	14	62	23	18	5	26	12	19	22	110	286	4	5	100	30	85	149
65	RC5	42	3	465	53	14	61	16	13	5	25	11	13	22	95	283	7	5	78	28	75	172
66	RC5	48	9	425	68	15	62	23	17	5	33	12	21	19	109	293	11	6	87	30	92	161
67	RC5	54	6	473	39	12	55	18	16	3	24	13	15	20	102	283	6	7	76	29	74	157
68	RC5	60	7	429	82	15	64	21	16	3	28	12	17	23	107	278	8	5	87	30	85	153
69	RC5	63	7	373	77	13	74	21	20	5	36	14	26	25	120	264	7	6	105	31	94	145
70	RC5	69	5	484	65	9	61	23	15	5	38	13	17	21	106	273	6	5	88	29	83	161
71	RC5	75	10	346	56	15	71	28	21	6	42	13	22	30	132	262	8	6	118	33	109	141
72	RC5	81	11	360	68	17	72	28	20	5	42	14	24	26	130	265	7	5	118	33	107	139
73	RC5	87	9	367	66	12	68	27	20	6	43	14	22	25	123	257	7	5	111	33	102	147
74	RC5	93	9	369	61	15	68	25	18	5	37	14	19	24	117	267	9	5	99	31	94	170
75	RC5	99	9	358	63	14	71	25	22	8	39	14	22	24	128	255	7	7	112	34	101	141
76	RC5	105	12	353	63	18	71	25	22	6	47	14	23	24	133	261	10	6	122	33	109	140
77	RC5	110	7	378	82	14	67	27	19	6	32	14	20	28	125	258	7	6	113	31	99	147
78	RC5	116	10	360	71	15	72	24	20	4	41	14	21	26	129	258	6	7	125	32	102	139
79	RC5	122	6	431	66	11	62	21	16	6	38	14	18	23	112	264	10	6	96	31	83	168
80	RC5	127	8	413	64	13	60	25	18	5	31	14	20	23	117	275	8	6	93	30	91	157
81	RC5	133	10	414	85	15	66	21	19	6	30	12	17	22	117	266	6	7	97	31	89	185
82	RC5	138	4	468	60	11	64	18	15	5	29	13	15	19	103	263	11	7	72	30	77	169
83	RC5	143	6	442	70	13	61	23	14	5	37	13	16	20	106	259	8	5	85	32	80	215
84	RH	0	8	567	53	12	54	22	13	4	27	9	14	19	92	474	8	7	73	24	74	202
85	RH	3	2	586	60	11	65	24	14	6	24	10	7	22	102	449	7	7	83	25	79	195
86	RH	4									31											
87	RH	7	16	555	68	17	63	33	19	6	40	13	21	35	139	310	5	7	107	31	115	137
88	RH	11									40											
89	RH	14									37											
90	RH	15	17	611	113	15	77	33	22	15	62	19	12	33	177	331	12	15	129	22	106	122
91	RH	16									35											
92	RH	19	20	532	68	16	60	33	17	5	37	11	20	31	148	333	8	4	112	30	109	142
93	RH	22	19	527	78	16	65	38	19	5	49	13	21	31	153	341	6	5	101	29	113	137
94	RH	27	30	680	52	22	84	35	22	26	92	20	20	40	196	368	8	16	124	22	108	116

95	RH	28									46												
96	RH	33	6	662	70	16	73	37	16	5		32	12	11	24	124	442	6	8	94	28	91	221
97	RH	34									26												
98	RH	39	20	575	70	14	60	38	16	4		31	12	19	32	154	466	5	5	90	30	114	153
99	RH	45	15	637	66	14	61	30	16	4		27	12	17	22	128	462	7	4	93	28	93	200
100	RH	51	12	604	39	10	50	20	13	2		13	8	11	18	103	642	8	6	79	25	74	184
101	RH	55	3	550	54	14	53	20	15	2		15	12	7	20	101	804	5	5	85	22	76	169
102	RH	56									23												
103	RH	61	7	517	69	13	47	25	13	2		12	8	11	16	109	670	5	3	87	25	87	151
104	RH	63	8	508	58	13	54	28	17	5		38	10	15	26	125	461	7	6	91	28	103	142
105	RH	69	10	520	89	14	60	28	17	4		28	12	19	29	128	360	8	6	103	32	105	155
106	RH	75	9	518	55	13	62	30	18	3		34	13	22	28	123	294	6	6	94	30	101	167
107	RH	81	5	508	66	12	63	26	18	5		32	13	20	27	125	308	10	6	97	30	94	170
108	RH	85	6	525	80	15	76	34	21	6		44	14	15	26	138	285	8	7	114	30	115	143
109	RH	86									34												
110	RH	89	8	498	63	16	68	36	21	8		54	14	22	31	145	291	5	6	123	33	122	149
111	RH	93	7	614	64	14	63	26	18	6		35	11	15	22	122	377	5	7	94	27	94	198
112	LS	0	1	535	55	6	39		14	12		23	8	4	15	53	953	4	<1	42	18	43	242
113	LS	5	2	542	40	8	36		14	10		18	8	<1	14	46	676	4	5	40	18	37	230
114	LS	11	0	584	53	4	31		13	12		20	9	<1	11	34	738	7	<1	36	14	30	189
115	LS	15	0	727	42	6	35		15	11		20	9	3	11	39	698	5	2	33	20	38	246
116	LS	20	3	635	38	9	49		17	14		26	11	6	12	84	556	7	<1	65	18	75	187
117	LS	25	2	559	47	10	48		16	10		24	11	7	12	80	481	<1	2	54	20	70	189
118	LS	30	2	568	66	7	43		15	12		23	11	2	12	57	579	12	5	49	21	53	314
119	LS	35	0	543	47	6	36		15	9		17	8	2	13	53	568	2	4	46	19	49	193
120	LS	41	3	741	44	11	54		17	12		28	11	11	12	94	618	4	5	71	21	88	204
121	LS	45	4	633	25	11	48		16	7		19	9	6	11	82	557	5	4	62	20	77	172
122	LS	48	2	1214	57	9	51		15	6		23	9	9	17	96	998	4	2	75	22	93	224

