

ESTUDIO DE LOS PROCESOS RELACIONADOS CON LA PRESENCIA DE PLAGUICIDAS ORGANOCOLORADOS EN LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA

Julián Mauricio Betancourt y Gustavo Ramírez-Triana

RESUMEN

El presente artículo pretende abordar los fenómenos que tienen lugar en el complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) con relación al comportamiento de los residuos de plaguicidas organoclorados. Además de discutir los procesos de depuración, precipitación/ sedimentación, y amortiguamiento que se presentan en esta laguna costera desde un enfoque de ingeniería ambiental. El análisis se realizó con base en los resultados obtenidos en el proyecto “Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la CGSM”. En el sistema acuático de la CGSM la principal forma de remoción de compuestos organoclorados de la columna de agua se realiza por medio de procesos de precipitación-sedimentación, como se observa en los sectores de Pajalal y Caño Clarín, donde se presenta una reducción de hasta el 50% de estos tóxicos con relación a los niveles descargados.

PALABRAS CLAVE: Lagunas costeras, Plaguicidas organoclorados, Sedimentación, Degradación.

ABSTRACT

Study of the processes related to the presence of organochlorides pesticides in the Ciénaga Grande de Santa Marta. The aim of this paper is to have an approach to the phenomena that take place in the lagoon complex of the Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), which are related to the behavior of the remaining organochloride pesticides. Besides discussing the depuration processes, precipitation/sedimentation and the damping that are present in this coastal lagoon; with an environmental managing scope. The results analyzed were those obtained from the project called “Monitoring of the environmental conditions and the structural and functional changes of the vegetal communities and fishing resources during the rehabilitation of the CGSM”. The main removal type in the CGSM water system for

organochloride compounds in the water column, occurs by precipitation/sedimentation processes, as it is observed in Pajara and Caño Clarín areas, where a decreasing up to 50% of this toxic compounds is happening, related to the unloaded levels.

KEY WORDS: Coastal lagoons, Organochlorides pesticides, Sedimentation, Degradation.

INTRODUCCIÓN

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es uno de los ecosistemas acuáticos costeros más estudiados de Colombia. Con referencia a su problemática ambiental y la introducción de residuos tóxicos orgánicos, existen estudios desde la década del 80 (Ramírez, 1988), sobre niveles de residuos de plaguicidas organoclorados; los cuales se catalogan entre las sustancias orgánicas más agresivas para el medio ambiente debido a su gran persistencia y magnificación en las cadenas alimenticias (Moriarty, 1978). La acumulación de estos compuestos sintéticos en los organismos y sedimentos de los cuerpos de agua, con efectos carcinogénicos y teratogénicos, están ampliamente documentados y son objeto de una continua investigación a nivel global.

Los plaguicidas organoclorados (OC) hacen parte de la lista de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) identificados por el Programa para el Ambiente de Naciones Unidas (UNEP) por sus efectos sobre la biota acuática y terrestre, así como sobre la salubridad pública (Walker y Livingstone, 1992). El uso de los COP se ha restringido, pero en los países en vía de desarrollo se presentan todavía vacíos importantes en la legislación ambiental, que asociados a inadecuadas condiciones sociales y económicas no garantizan un manejo racional de estos tóxicos.

La ecorregión CGSM, que incluye la Isla de Salamanca y un complejo sistema de ciénagas y caños adyacentes, hace parte del plano deltáico inundable del río Magdalena, comunicándose por medio de los canales Clarín, Aguas Negras y Renegado. En las últimas décadas esta laguna costera ha soportado diversos tensores ambientales, causados por actividades humanas en su propio entorno acuático, en las zonas circunvecinas y en las rondas hidráulicas de los afluentes de la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), donde la actividad agroindustrial desempeña un papel importante en la economía de la región (aproximadamente 62000 ha dedicadas al cultivo del banano y palma africana). A esta problemática ambiental se suma la construcción a mediados del siglo pasado de las vías carretables Barranquilla-Ciénaga a lo largo de la Isla de Salamanca, y Palermo-Sitio

Nuevo paralela a la margen izquierda del río Magdalena, que alteraron el intercambio natural de las aguas de la CGSM con el mar y esta arteria fluvial (Botero, 1990).

Como mecanismo para la mitigación y control de los impactos sobre el ecosistema costero, en 1995 se dio inicio al dragado y reapertura de los caños Clarín y Aguas Negras con el objetivo de derivar agua del río Magdalena al sistema hídrico de la CGSM; estos caños fueron diseñados en un comienzo para aportar un caudal de $143 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La afluencia de aguas del Río Magdalena trae consigo el inherente riesgo de la entrada de sustancias orgánicas tóxicas, como los OC, por tener esta arteria fluvial una cuenca hidrográfica que representa más del 20% de la superficie del país, atravesando sus principales zonas agrícolas, industriales y urbanas, donde las descargas residuales son vertidas generalmente sin control ambiental.

Aún en concentraciones tan bajas como partes por trillón ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$), la presencia de OC genera en los organismos receptores procesos de bioacumulación; diversos estudios han puesto en evidencia los efectos de biomagnificación que tienen estas sustancias una vez llegan a los ecosistemas acuáticos. Plata *et al.*, (1993) determinaron valores de magnificación hasta de 22000 veces en especies carnívoras (*Ariopsis bonillai*), detritívoras y plactófagas.

En el presente estudio se intenta describir los fenómenos que tienen lugar en el complejo de lagunas de la CGSM con relación al comportamiento de los residuos de plaguicidas organoclorados. Se describen los procesos de depuración, sedimentación y amortiguamiento que ocurren en estas lagunas costeras; así como los efectos de la afluencia de aguas del Río Magdalena a través de los caños y las provenientes de la SNSM, a través de los cauces Aracataca, Fundación y Sevilla.

Para comprender los procesos que ocurren en la Ciénaga, se emplearon algunos conceptos aplicados en ingeniería ambiental y el desarrollo de modelos matemáticos de ecosistemas; es así como ciertos sistemas naturales pueden ser considerados pseudorreactores, basándose en los principios básicos de conservación de la energía, masa y momento. De esta manera cualquier laguna del sistema de la CGSM puede ser considerada un reactor, donde tienen lugar diversos y complejos proceso físicos, químicos y biológicos, con entradas y salidas de sustancias (por ejemplo, caños, ríos y conexiones con el mar). Un esquema sencillo que representa estos sistemas naturales se muestra en la figura 1 (Kiely, 1999).

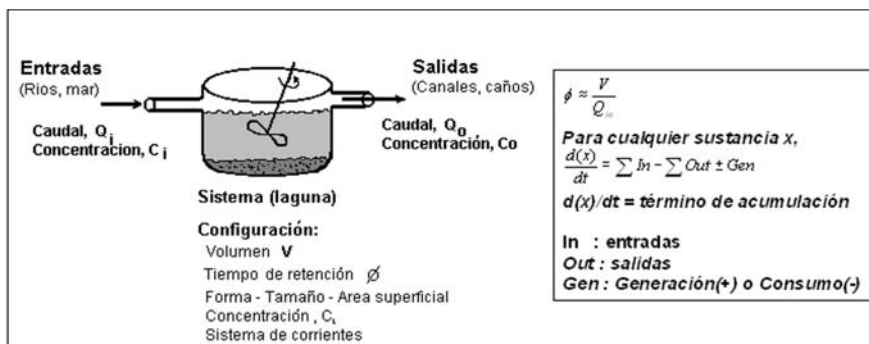


Figura 1. Representación esquemática de un sistema lagunar desde el punto de vista de la ingeniería ambiental.

METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se recurrió a la recopilación de la información existente sobre residuos de plaguicidas organoclorados en aguas y sedimentos (Ramírez, 1988; Espinosa y Ramírez, 1995); y la información generada por el Proyecto “Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: un enfoque de manejo adaptativo” (INVEMAR, 2002). Para el análisis se consideraron cuatro grupos de plaguicidas clorados: a) los hexaclorociclohexanos totales (α -HCH+ β -HCH+lindano + δ -HCH); b) heptacloro total (heptacloro+heptacloroepoxido); c) aldrin (ALD) y d) DDT total (DDTs+DDD+DDEs), así como la concentración de residuos de organoclorados totales(OCT), que es equivalente a la suma de las concentraciones de los cuatro grupos anteriores (OCT = HCHs+HEPTs+ALD+DDT-t).

Se siguió la zonificación de la CGSM (Mancera y Botero, 1993) basándose en datos de salinidad y de correlación estadística (Figura 2). La *zona cero* comprende las estaciones que poseen características típicas marinas (la Barra y las del mar Caribe); la *zona uno*, asocia las estaciones cercanas a los ríos de la SNSM, que desembocan en el complejo lagunar; la *zona dos* abarca las estaciones del cuerpo de la CGSM (espejo lagunar); la *zona tres* es el sistema de caños y ciénagas de Pajara; y por último, la *zona cinco*, de influencia plena del río Magdalena, con características típicas de descargas continentales.

RESULTADOS

Las figuras 3A y 3B se construyeron con la información de OC recopilada en la CGSM y Complejo Pajara (CP) desde 1995 al 2002, los datos

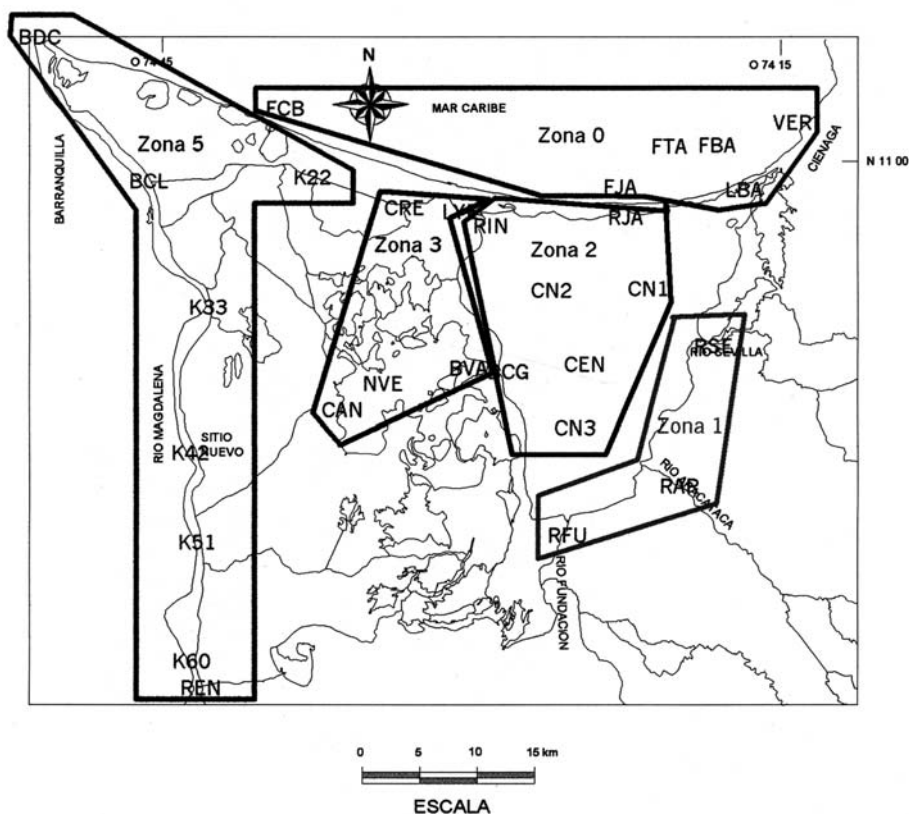


Figura 2. Zonificación de la Ciénaga Grande de Santa Marta realizada por Mancera y Botero 1993.

se agruparon por zonas y se promediaron las concentraciones de las estaciones que conforman cada zona, para los dos semestres del año; lo anterior, con el objetivo de observar el comportamiento de estas sustancias a través del periodo de estudio. Las series en líneas punteadas representan las dos fuentes principales de compuestos organoclorados que se han identificado para el complejo lagunar, el río Magdalena por la parte occidental y los ríos provenientes de la SNSM (Fundación, Sevilla y Aracataca), hacia el sector oriental. La figura 3B muestra la relación entre las concentraciones reportadas para las zonas 5 y 3 (río Magdalena y CP). Es conocido que el río Magdalena es la principal fuente de entrada de agua dulce a la CGSM, a través de los caños que alimentan el CP. Estas descargas sugieren en consecuencia la entrada de sustancias exógenas al complejo lagunar.

Esta correlación se mantiene muy bien durante el tiempo de estudio, sin embargo en la transición entre 1999 y 2000 se observa un desfase, que se podría explicar por la existencia de otras vías de entrada de residuos

plaguicidas. El análisis de la figura 3A indica que a finales de 1999 hay aumento en la concentración de OCT proveniente de los ríos de la SNSM (zona 1), que provoca un incremento en los valores observados en el espejo de la ciénaga (zona 2), afectando a su vez la zona 3 (CP), con la que mantiene comunicación por varios caños. La zona 2 (espejo lagunar) muestra concentraciones en estrecha concordancia con las registradas en la zona de los ríos provenientes de la SNSM.

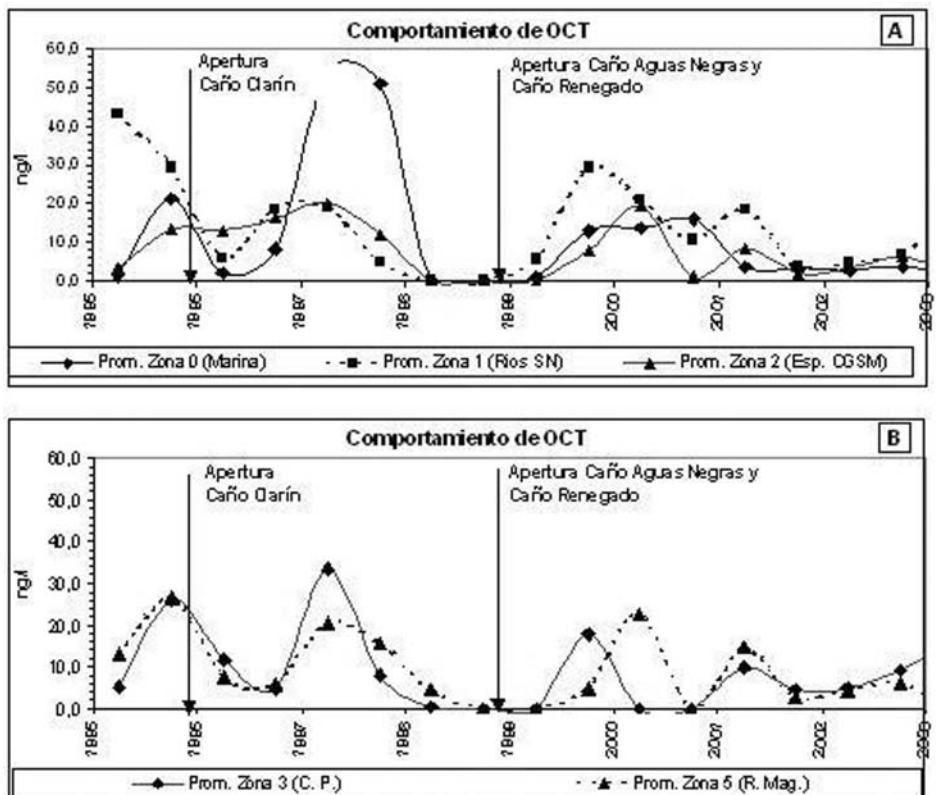


Figura 3. Variaciones por semestre de la concentración de organoclorados en aguas para las zonas de estudio del sistema lagunar de la CGSM. A) zonas: 0 (marina) , 1 (Ríos de la SNSM) y 2 (Espejo CGSM); B) zonas: 3 (Complejo Pajalar) y 5 (Zona del Río Magdalena).

DISCUSIÓN

Los plaguicidas organoclorados son sustancias asociadas a actividades humanas. Para explicar la variación de las concentraciones de OCT en aguas de la CGSM se compararon los resultados obtenidos en la zona 5 (influencia del río Magdalena) con la producción agrícola nacional.

La figura 4 ilustra los niveles de OCT registrados en el tramo final del río Magdalena (Zona 5), comparados con el crecimiento de la producción agrícola del país en el periodo 1991-2000. Las cifras suministradas por el DANE permiten concluir que las variaciones presentadas en esta zona responden a una producción agrícola oscilante. Dado que la cuenca del Magdalena irriga más del 20% del territorio nacional y recorre los principales centros agrícolas del país, un aumento en la producción puede significar el incremento en la utilización de productos plaguicidas (incluso los que se encuentran prohibidos), que se vería reflejado en las concentraciones de residuos OC en el tramo final del río, antes de su descarga de aguas a la CGSM y Mar Caribe.

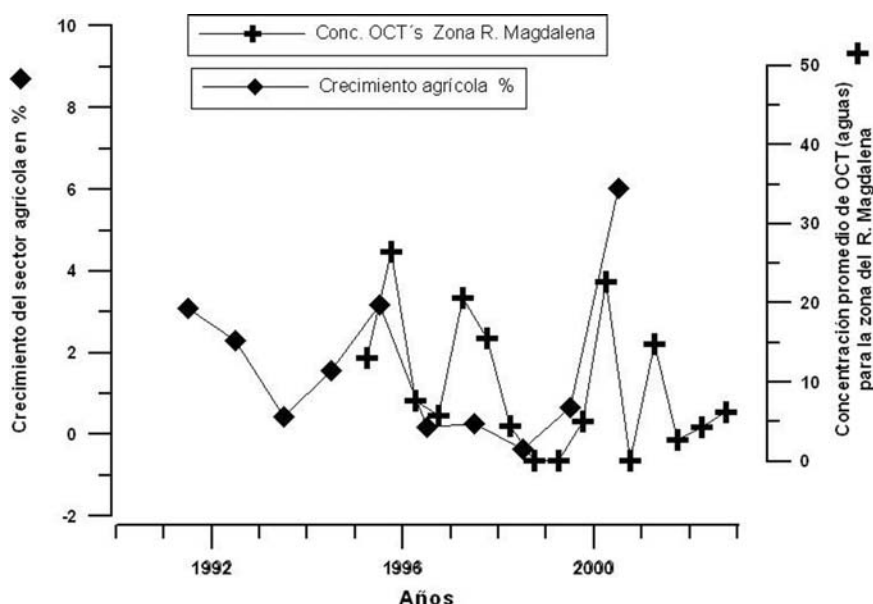


Figura 4. Confrontación de las concentraciones promedio de OCT en aguas para la Zonas 5 (Río Magdalena) con el comportamiento de la producción agrícola nacional (%). Fuente: DANE (2002).

El comportamiento de las concentraciones de OCT en 1997 aparentemente se aleja de la anterior premisa, aunque analizando la misma información desde el concepto de carga transportada (caudal por concentración), la diferencia se hace menor y en general la correlación aumenta. El año 1997 fue uno de los más secos para el río Magdalena, con efecto generalizado en todo el país a causa del fenómeno El Niño; en la figura 5 se observa que en gran parte del año se presentaron anomalías negativas (déficit de agua). De esta forma, aunque las concentraciones hayan aumentado, la carga transportada por el río es menor comparada con otros ciclos anuales.

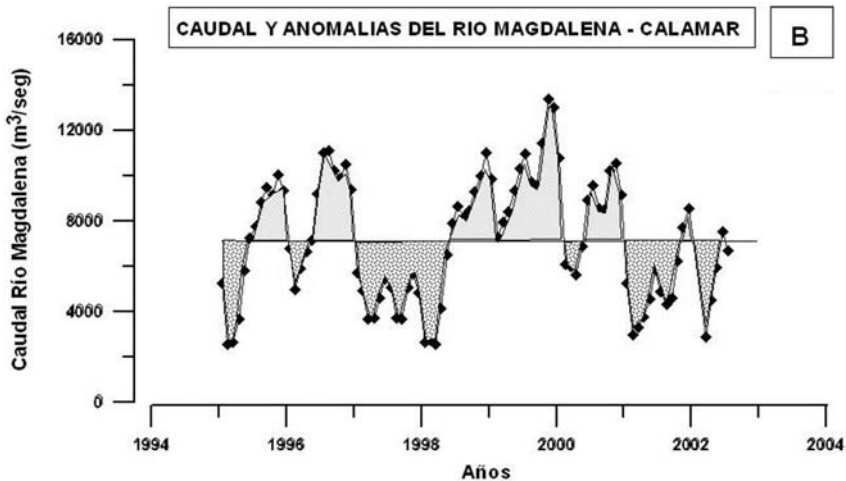
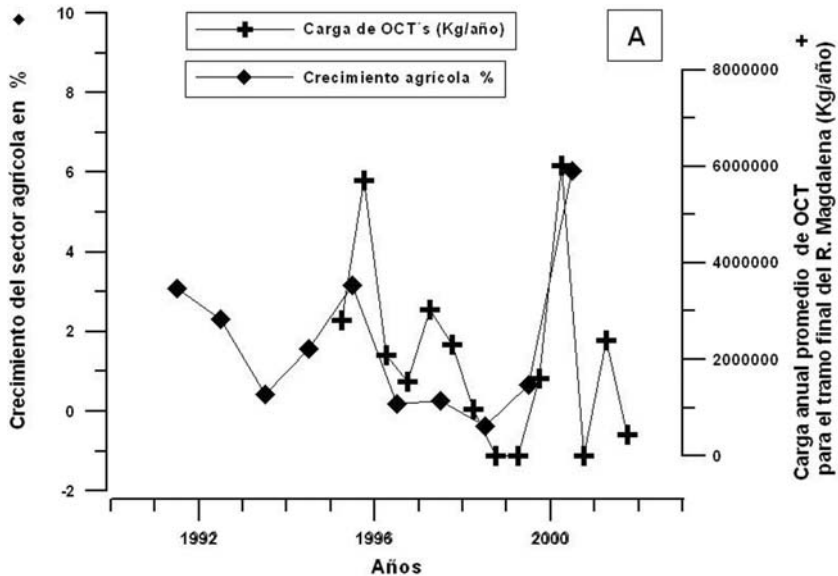


Figura 5. A) Confrontación de la carga promedio de OCT en aguas para la Zona 5 (Río Magdalena) con el comportamiento de la producción agrícola nacional (%) y B) Caudales y anomalías del río Magdalena estación Calamar.

Dispersión y dilución

La mayoría de los procesos a los cuales se ven sometidos los OC una vez llegan al ecosistema de la CGSM involucran el comportamiento hidrodinámico, es decir, intervienen factores como el tamaño del complejo lagunar, su topografía, batimetría, la velocidad y dirección de las corrientes y los flujos de entrada y salida de agua al sistema lagunar.

La distribución espacial de los residuos OC en la Ciénaga permite explicar dicho fenómeno, en la figura 6 se muestra la representación espacial para los monitoreos de 1999 y 2001. Se seleccionaron las épocas húmedas, por ser los periodos en los cuales ocurren los mayores aportes como consecuencia de las escorrentías de las tierras de cultivo.

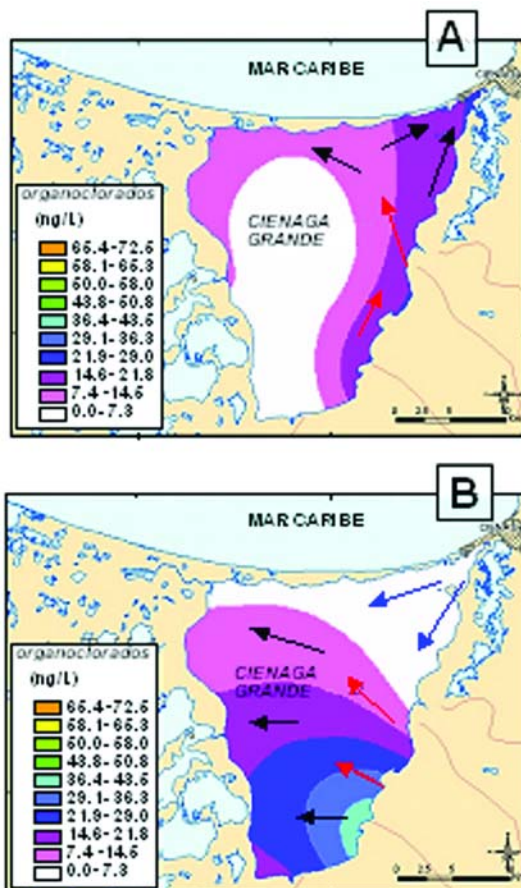


Figura 6. Influencia del ingreso de aguas oceánicas a la CGSM sobre las concentraciones de OCT en el espejo lagunar: A) Promedio año 1999; B) Promedio año 2001.

Uno de los factores que influyen en la variabilidad de estos contaminantes son las corrientes y el fenómeno de dilución asociado; el funcionamiento hidráulico del sistema juega un papel importante en la dispersión de dichas sustancias, como se evidencia especialmente en la estación de la Barra (LBA), donde se presentan unas características muy especiales debido a su posición y a la morfología de la zona. LBA es el punto de contacto principal de la CGSM con el Caribe en el vértice superior derecho del triángulo lagunar.

Por la zona de La Barra se intercambian grandes volúmenes de agua con el mar en una estrecha franja. Si consideramos una amplitud promedio de marea de 30 cm, durante un periodo con el prisma mareal pueden ingresar 135 millones de metros cúbicos de agua marina (aproximadamente el 20% del volumen de la CGSM). El agua que entra posee menor concentración de OCT (flechas azules, figura 6), lo que provoca un efecto de dilución en el sector de la Barra y el represamiento de aguas hacia el lado occidental del triángulo lagunar, donde se esperaría encontrar las mayores concentraciones.

Durante la salida de las aguas de la ciénaga la situación se invierte y las concentraciones aumentan en el sector de la Barra; en este caso las aguas provenientes de los ríos Sevilla y Aracataca, que poseen concentraciones más altas de OCT, se desplazan paralelamente a la costa desviándose por el efecto ciclónico de la circulación propia de la ciénaga (flechas rojas, figura 6). Estas circunstancias hacen que se presenten variaciones en las concentraciones de OCT dependiendo del momento de muestreo y de los factores hidrodinámicos existentes en la laguna.

Tiempo de retención

Dentro de los factores hidrodinámicos que modulan el comportamiento de parámetros químicos y físicos, uno de los más relevantes es el *tiempo de retención* de las aguas en la CGSM. Tiempos de retención altos hacen que la ciénaga se convierta en un gran *reactor-sedimentador* y sea considerado por algunos investigadores como una *trampa* de sustancias químicas (organoclorados, hidrocarburos y metales pesados, entre otras), que ingresan por diferentes afluentes continentales (río Magdalena y ríos de la SNSM) y que previamente han recorrido zonas agrícolas donde se aplican plaguicidas de diversos tipos (Plata *et al.*, 1993).

La laguna de Pajalal y la misma CGSM son sistemas en los cuales se evidencian estos procesos. Los resultados del estudio permitieron identificar este comportamiento de *reactor* en la Ciénaga Pajalal. Las aguas que ingresan a la Ciénaga por la boca del Caño Aguas Negras (CAN) presenta niveles superiores de OCT (concentración en el afluente) que al momento de salir a través de la boca del Caño Grande (BCG) (concentración en el efluente); las diferencias se observan cercanas al 50% de remoción (Figura 7).

En algunos monitoreos las concentraciones reportadas se alejan de este concepto debido a factores tales como la existencia de focos de contaminación en la misma ciénaga de Pajalal, los asentamientos humanos palafíticos en Nueva Venecia (NVE) y Buena Vista y el aporte de otras ciénagas con las cuales se conecta por caños, tal como ocurrió en febrero 2001.

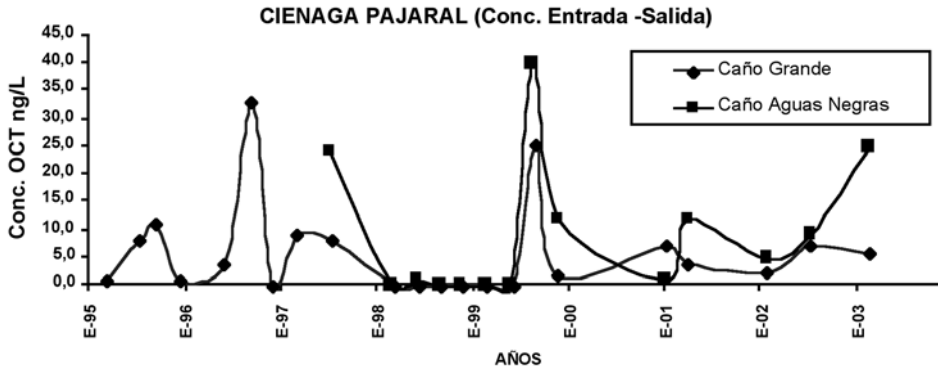


Figura 7. Concentraciones de OCT en aguas para el afluente (Caño Aguas Negras) y el efluente (Caño Grande), de la Ciénaga Pajalar.

La disminución de la carga de organoclorados en la columna de agua es atribuible entonces, a tres procesos: a) adsorción a partículas orgánicas e inorgánicas para posterior precipitación y acumulación en el sedimento; b) degradación y c) absorción por los seres vivos como plancton, peces y vegetación (mangle). De los anteriores procesos, el primero es el que ocurre en mayor magnitud en el sistema lagunar; a través de los caños alimentadores se observan altas tasas de sedimentación, constituyendo la principal forma de remoción de OC en la columna de agua. Los flujos lentos por los caños y la mezcla de las aguas dulces de los ríos con las aguas saladas hacen que los equilibrios iónicos cambien, facilitando la sedimentación (Barbanti, 1992), y por ende la disminución de los compuestos asociados a las partículas suspendidas.

El tiempo de retención también influye en el fenómeno de *amortiguamiento* de las sustancias exógenas que ingresan al sistema; este proceso de carácter hidrodinámico se presenta en las ciénagas y ayuda a explicar situaciones observadas durante las campañas de monitoreo como la ocurrencia de menores niveles de OCT en la parte del río (estación aproximadamente 500 m dentro del río, con características propias de agua dulce), que las concentraciones encontradas en el espejo lagunar frente a la desembocadura del mismo.

Cuando los aportes de una sustancia a través de un afluente (en este caso OC introducidos por los ríos), no son continuos y tienen un gran componente aleatorio en términos de concentraciones muy variables, el cuerpo de agua receptor se comporta como un sistema de amortiguación para dicha sustancia; y la magnitud del fenómeno depende en gran medida de la configuración del sistema receptor (forma, volumen, etc.), y de sus propiedades hidrodinámicas.

La amortiguación del sistema depende del tiempo de retención y es responsable de la manera como el sistema, en nuestro caso la CGSM, responde a los cambios de concentración introducidos por el afluente. Es decir, al llegar una carga de contaminante al sistema lagunar las concentraciones comienzan a disminuir por dilución o sedimentación del contaminante, durante un lapso de tiempo que depende del volumen y otras propiedades hidrodinámicas, mientras que en el río es factible que haya cesado su transporte.

Sedimentación

Muchos de los procesos de sedimentación o bio-sedimentación son los responsables de la depuración de las aguas, por lo que los caños cumplen un papel autodepurador de las mismas. Los resultados demuestran concentraciones altas en las intersecciones con el río Magdalena que disminuyen gradualmente al acercarse al espejo lagunar de la Ciénaga. Haciendo uso de la “Escala indicativa para el grado de contaminación” (Marín, 2001), la figura 8 muestra como las aguas al entrar al Caño Clarín presentaron un nivel de riesgo medio (conc. 10-30 ng.L⁻¹), y al aproximarse a la CGSM el nivel de riesgo es bajo (conc. <10 ng.L⁻¹).

Aunque la figura 8 muestra variabilidad en las concentraciones de OCT a lo largo del Caño, los promedios mostraron disminución al aproximarse el agua a la Ciénaga. Las concentraciones promedio de 24.1 y 10.9 ng.L⁻¹ para las estaciones Boca Caño Clarín (BCC) y Caño Clarín Km13 (CC-Km13), respectivamente, determinaron un porcentaje de remoción de OCT en la columna de agua de 54.8 %. En Rinconada (RIN) el valor promedio vuelve a aumentar, obedeciendo a la variabilidad que presentan todas las estaciones del espejo lagunar, así como al transporte inducido por las corrientes (Figura 6). Este último factor hace que el sector RIN reciba la influencia de los ríos provenientes de la SNSM.

Lo anterior demuestra claramente que la normalización del flujo de agua dulce en este canal es fundamental para la rehabilitación ecológica del sistema lagunar, tal y como lo han expresado otros autores (Esminger, 1996). Esto sin comprometer la calidad del ecosistema con el arribo de tóxicos orgánicos clorados a la CGSM, ya que los canales se comportan como filtros que retienen contaminantes.

De acuerdo con los conceptos de conservación de la materia, los OC removidos de la columna de agua que no sufren ningún tipo de degradación debido a su persistencia, o que no son absorbidos por los seres vivos, tienen como destino final la acumulación en el fondo lacustre de las ciénagas. Lo anterior significa una ventaja para los organismos acuáticos, pero está asociado a un impacto para los bentónicos.

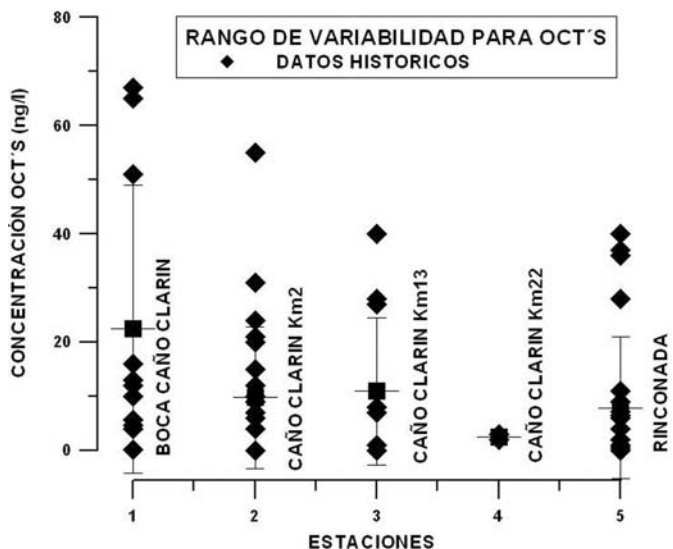
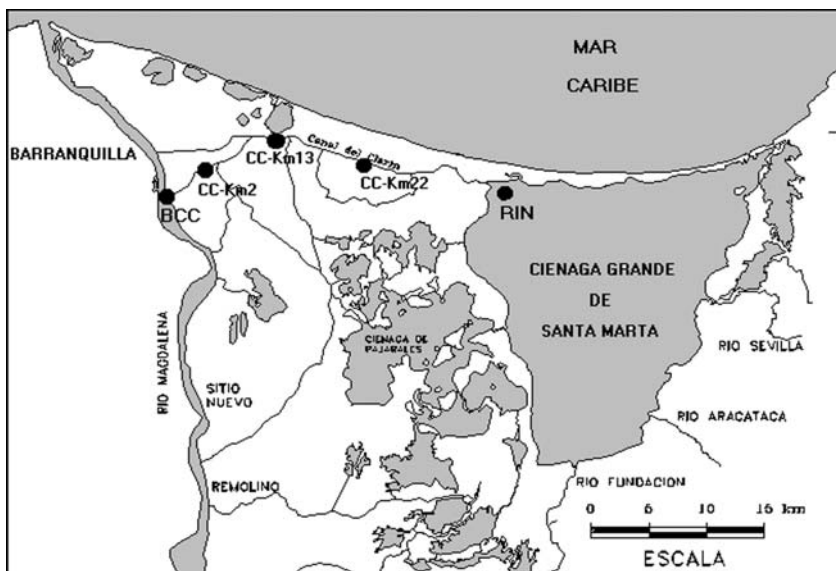


Figura 8. Estaciones sobre el Caño Clarín, y rango de variabilidad para la concentración de OCT en aguas 1995-2002 (ng.L⁻¹).

Los análisis realizados en 1995 en sedimentos de las áreas de manglar de la CGSM, antes de la apertura de los caños de comunicación con el Río Magdalena, indicaron las mayores concentraciones para DDT total (13.1 ng.g⁻¹) y valores menores para heptacloro (1.4 ng.g⁻¹), lindano (0.54) y aldrin (0.46). El mayor contenido de DDT se observó en el extremo occidental de la Isla de

Salamanca, como reflejo de la influencia directa y permanente del Río Magdalena. Los resultados obtenidos tipificaban ambientes sedimentarios con un bajo grado de acumulación de estos contaminantes agroquímicos, sin mayores riesgos de toxicidad sobre los sistemas de manglar (Espinosa *et al.*, 1998). En principio, la acumulación de dichos compuestos en los sedimentos de la CGSM parece mantenerse constante en los últimos años debido probablemente a que ha disminuido su uso y descarga (línea continua, figura 9).

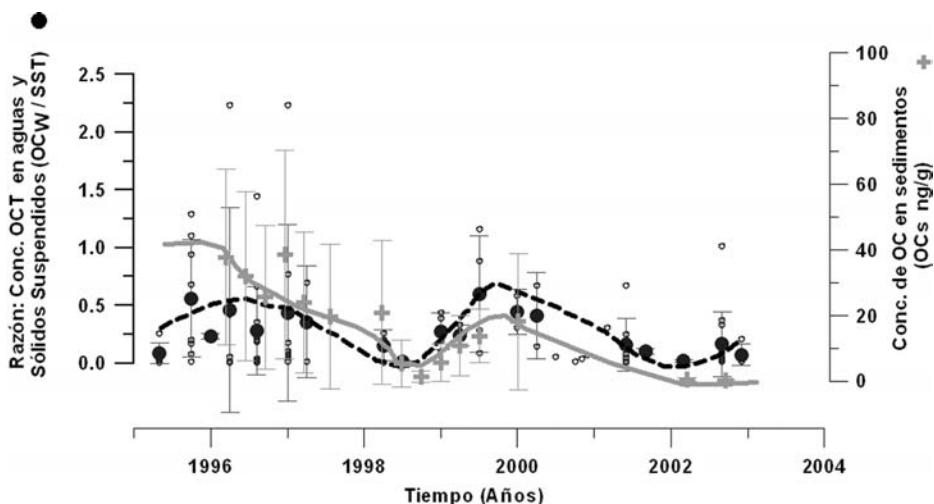


Figura 9. Relación de la concentración de organoclorados en aguas (OC_w, ng.L⁻¹) y el contenido de sólidos suspendidos (SST, mg.L⁻¹), línea punteada; con la concentración de OC en sedimentos (OC_s, ng.g⁻¹), línea continua.

Para establecer la magnitud de la deposición de OC en el sedimento lagunar, conociendo la dependencia y afinidad de estos compuestos por la materia orgánica ($K_{ow} > 6$) (Walker y Livingston, 1992), se relacionó la concentración en aguas (OC_w, ng.L⁻¹), con la de sólidos suspendidos (SST, mg.L⁻¹), y la razón de estos dos parámetros (OC_w/SST), se cruzó con los valores de OC en sedimentos (OC_s, ng.g⁻¹). Por su alta hidrofobicidad estos plaguicidas tienden a asociarse a las partículas de sedimento, por lo que el término OC_w/SST representa la concentración que tendría el sedimento suspendido si todos los OC determinados en agua estuvieran adheridos al mismo (línea punteada, figura 9).

Se encontró que las concentraciones en sedimentos siguen muy bien el valor de esta razón en el tiempo; es decir, que dependen de la concentración de plaguicidas en agua y de los sólidos suspendidos (SST), debido a que el transporte de material particulado inerte también causa disminución (dilución)

de la concentración en los sedimentos, pero no de la carga. Si la OC_w aumenta, y también lo hacen los SST, aunque en mayor proporción (fenómeno que puede ocurrir en periodos de lluvias, crecientes y arrastre de material sedimentario), la razón OC_w/SST disminuirá y por ende la concentración en los sedimentos lacustres OC_s .

Estas variaciones temporales generan una deposición de sedimentos que se irán acumulando por capas de distinta concentración (OC_s), dependiendo de los valores de organoclorados y sólidos suspendidos en la columna de agua. Como las mediciones en los sedimentos superficiales tienden a indicar una disminución en las concentraciones, esto supone que las capas con concentraciones más altas han quedado sepultadas bajo las capas recientes.

Degradación

Los procesos anteriores corresponden a fenómenos físicos relacionados con los OC (dilución, exportación a otros sitios, sedimentación, etc.), pero la verdadera desaparición de estos compuestos del medio ambiente se logra sólo con la mineralización de ellos, ya sea por medios químicos o biológicos, es aquí donde juega un papel importante la biodegradación y la metabolización por seres vivos.

Una medida de la degradabilidad de los plaguicidas es el tiempo de vida media, que a diferencia de otras propiedades (como la solubilidad), no tienen un valor constante, sino que están afectados por la temperatura, la humedad y la actividad bacteriana del suelo (Levin y Gealt, 1999). Es conocido que en lugares con alta humedad y temperatura se ve favorecida la degradación biológica de estas sustancias. En los ecosistemas estuarinos tropicales, además de tener lugar las dos características anteriores, el fenómeno de autodepuración se favorece gracias a la entrada de sustancias nutritivas que alimentan las bacterias y las estimula para realizar su función degradadora. En estudios realizados por Gómez (2003) se lograron identificar cuatro especies de bacterias nativas (*Bacillus licheniformis*, *Bacillus cereus*, *Bacillus pumilus*, *Enterobacter cloacae*) de la CGSM con capacidad de tolerar y de degradar el organoclorado aldrin en concentraciones relativamente altas en aguas (60 ng.L^{-1}), determinando *in vitro* porcentajes de degradación cercanas al 20.0% en 30 días.

La biodegradación en campo aún no se ha evaluado, pero los resultados obtenidos a nivel de laboratorio permiten afirmar que existen los microorganismos necesarios para efectuar tal labor y que la magnitud del fenómeno estaría por el orden del 20%, si las bacterias tuvieran las condiciones nutritivas ideales que se aplicaron en los ensayos.

Bioacumulación

Para comprender los efectos de los OC en organismos superiores, en la tabla 1 se muestran las concentraciones para algunos de estos compuestos en organismos acuáticos. Es importante resaltar que las concentraciones letales son mil veces más altas que las determinadas en aguas de la CGSM y CP (del orden de ng.L^{-1}). Esto permite afirmar que los niveles de concentración encontrados no representan toxicidad letal inmediata. Es así como los eventos de mortandades de peces registradas en la Ciénaga están lejos de ser producidas por estos compuestos, a excepción de la ocurrencia de derrames accidentales de estos tóxicos en las aguas de caños, ciénagas o terrenos aledaños, que provoquen concentraciones inmediatas superiores a los valores de CL_{50} reportados. Sustancias como el dieldrin, uno de los organoclorados más tóxicos, exhibe concentraciones letales para peces como la trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) o la perca azul (*Micropterus salmoides*) de 10 y 8 $\mu\text{g L}^{-1}$ respectivamente; mientras que el DDT tiene un efecto tóxico menor requiriendo concentraciones entre 8 - 100 mg L^{-1} para provocar la muerte de peces en 96 horas (FAO, 2000).

Tabla 1. Rangos máximos detectados para niveles de organoclorados totales en varios eslabones de la red trófica de la CGSM.

Aguas ¹ ng.L^{-1}	Sedimentos ² ng.L^{-1}	Manglar ³ ng.g^{-1}	Seston ⁴ ng.L^{-1}	Peces detritívoros (<i>Mugil incilis</i>) ⁴ ng.g^{-1}	Peces carnívoros (<i>Ariopsis bonilla</i>) ⁴ ng.g^{-1}
0.0-87.0	0.8-47.1	0.0-15.5	14.74-455.71	7.98-223.05	10.33-1490.3
Río Sevilla	Río Aracataca				

1. INVEMAR (2002), 2. Espinosa y Ramírez (1995), 3. Espinosa *et al.*, (1998), 4. Plata *et al.*, (1993).

En la CGSM las mortalidades de peces parecen ser producto de las variaciones abruptas de oxígeno disuelto (OD) y pH en el ciclo diario y de fenómenos de anoxia en las ciénagas, pero no debidas a un impacto tóxico de tipo químico. Por medio de mediciones *in situ* se ha comprobado que en algunos sectores de este complejo costero se presentan descensos drásticos de la concentración de OD en la columna de agua, hasta concentraciones mínimas en las horas nocturnas y durante las primeras horas del día; generando, entre otros desajustes, el denominado “stress amoniacal” y la proliferación de algas tóxicas (Boyd, 1990).

Si bien las concentraciones de OC en la CGSM no son “altas” como para provocar la muerte de organismos, siguen siendo un factor negativo en este ecosistema que necesita ser vigilado, dado que la presencia y recurrencia de estos compuestos, aún a niveles bajos, puede conducir simultáneamente a otros problemas ecológicos a largo plazo, como son los asociados a procesos

de bioacumulación y biomagnificación a través de la cadena trófica tal como se ha observado en esta laguna costera (Tabla 1). En la figura 10 se presenta un esquema que sintetiza los procesos que ocurren en el sistema lagunar de la CGSM con relación a los residuos de plaguicidas organoclorados.

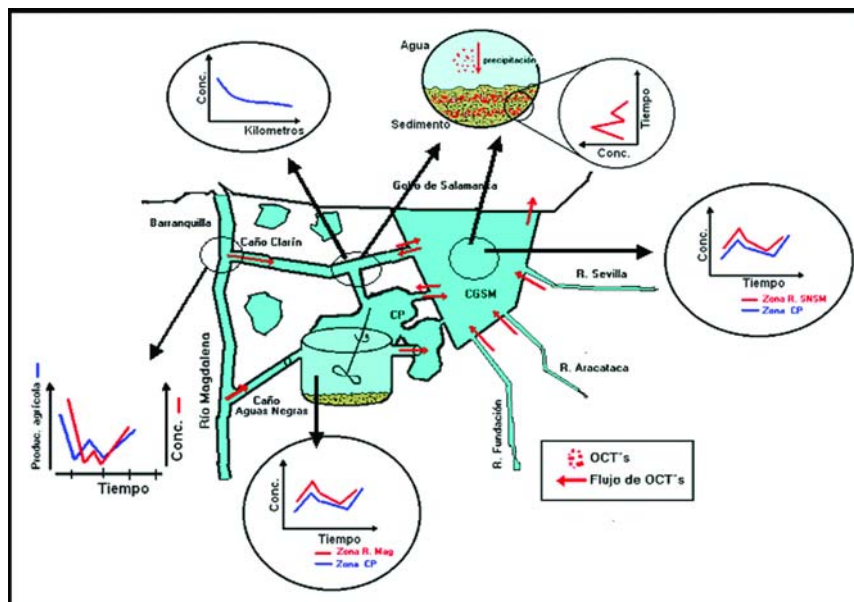


Figura 10. Representación esquemática de los procesos que tienen relación con los residuos de plaguicidas organoclorados en la Ciénega Grande de Santa Marta.

CONCLUSIONES

La entrada de compuestos OC a la CGSM ha estado asociada a la actividad agrícola y a la demanda de productos agroindustriales usados en esta actividad, tal como se muestra al comparar la información obtenida de los análisis y la producción agrícola nacional. Una vez estos residuos llegan al sistema lagunar, experimentan una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. De estos, la sedimentación y dilución son los de mayor ocurrencia o magnitud, siendo responsables de más del 50% de la disminución en concentración de OC en aguas, como se registró en la ciénega Pajalar y el Caño Clarín.

Las obras hidráulicas realizadas en los 90's han incidido en la evolución de los indicadores físicos, químicos, biológicos y sanitarios, produciendo cambios favorables en algunos de ellos, con beneficio para el proceso de rehabilitación de la CGSM con respecto al funcionamiento y estructura de los

recursos vegetales. En lo que respecta a contaminantes organoclorados, no se observa una variación atribuible a las obras. Estas sustancias se han encontrado antes y después de la apertura de los caños con las mismas características de variabilidad. Los mismos canales de comunicación de la CGSM con el río Magdalena parecen estar cumpliendo una función depuradora; las aguas dulces al entrar en contacto con las aguas saladas inducen un proceso de rápida sedimentación favoreciendo la disminución de las sustancias asociadas a los sólidos suspendidos en la columna de agua.

Las lagunas del complejo Pajara y la misma CGSM se comportan como biorreactores, donde las concentraciones de OCT en aguas disminuyen gracias a procesos de autodepuración (adsorción a partículas, sedimentación, degradación), que se lleva a cabo por fenómenos físicos, químicos y biológicos en los caños y lagunas. Los conceptos de trampa, autodepuración y amortiguamiento que se evidencian, muestran una ventaja para los organismos acuáticos, mas no para los bentónicos, debido a la potencial acumulación de sustancias tóxicas en el sedimento. Para poder hablar de una depuración de todo el sistema (agua y sedimento), es necesario establecer si está ocurriendo la biodegradación de estos compuestos clorados, o si es sólo el enterramiento de los mismos en el fondo.

Es muy importante seguir abordando el conocimiento hidrodinámico de la CGSM para lograr un mejor conocimiento de las variaciones dinámicas que se presentan en cuanto a la contaminación por plaguicidas organoclorados y su relación con otros parámetros de calidad del agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Barbanti, A. 1992. Transport of Nutrients in Rivers: Investigations on the River Po. In: Coastal Eutrophication. Elsevier Science Publishers B. V. Netherlands. 337 p.
- Botero, L. 1990. Massive mangrove mortality on the Caribbean coast of Colombia. *Vida Silvestre Neotropical*, 2 (2): 77-78.
- Boyd, C. 1990. Water Quality in Ponds for Aquaculture. Department of Fisheries and Allied Aquacultures. Alabama Agriculture Experiment Station. Auburn University. Alabama. Cap. IV.
- DANE, 2002. Dirección de Síntesis y Cuentas Nacionales. documento en línea: www.dane.gov.co.
- Esminger, I. 1996. Cambios hidrológicos en el Caño Clarín y sus implicaciones en la regeneración de manglares afectados por alta salinidad. Tesis de Diploma en Biología. Giessen. 120 p.
- Espinosa, L. F. y G. Ramírez. 1995. Análisis de residuos organoclorados en los sedimentos de zonas de manglar en la Ciénaga Grande de Santa Marta y la Bahía de Chengue, Caribe colombiano. *An. Ins. Inv. Mar. de Punta Betín* , 24:79-94.

- Espinosa, L. F., G. Ramírez, y N. H. Campos. 1998. Residuos de Plaguicidas Organoclorados en *Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans* en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Caldasia*, 20(1):45-57.
- FAO. 2000. Evaluación de la contaminación del suelo: Manual de referencia. Roma. 220 p.
Documento en línea: http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/005/X2570S16.htm
- Gómez, M. L. 2003. Selección de un consorcio bacteriano de la Ciénaga Grande de Santa Marta con capacidad degradadora del plaguicida organoclorado Aldrin. Tesis para optar al título de Maestría en Microbiología . Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 104p.
- INVEMAR. 2002. Informe segundo semestre de 2002. Proyecto: Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: un enfoque de manejo adaptativo. Santa Marta. 264 p.
- Kiely, G. 1999. Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos , tecnologías y sistemas de gestión. Primera edición. Mc. Graw Hill. España. 1331p.
- Levin, M. y M. Gealt. 1999. Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos. Primera edición. Mc. Graw Hill. España.354p.
- Mancera, J. E. y L. Botero. 1993. Estudio ecológico de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Delta Exterior del Río Magdalena, 3a. etapa. Informe de avance. Proyecto COLCIENCIAS-INVEMAR, 128 p.
- Marín. B. 2001. Informe Técnico Final Proyecto: "Establecimiento de valores indicativos del grado de contaminación de tóxicos químicos y microorganismos de origen fecal, como base para la expedición de normativas de la calidad de las aguas marinas de Colombia". INVEMAR/COLCIENCIAS. Santa Marta. 285 p.
- Moriarty, F. 1978. Organochlorine insecticides: persistent organic pollutants. Academic Press. Londres. 278p.
- Plata, J., N. Campos y G. Ramírez. 1993. Flujo de compuestos organoclorados en las cadenas tróficas de la Ciénaga de Santa Marta. *Caldasia*, 17 (2): 199-204.
- Ramírez, G. 1988. Residuos de plaguicidas organoclorados en sedimentos de la Ciénaga Grande de Santa Marta: Caribe Colombiano *An. Ins. Inv. Mar. de Punta Betín* , 18:127-136.
- Walker, C. H. y D. R. Livingstone. 1992. Persistent pollutants in marine ecosystems. A Special Publication of SETAC, Pergamon Press. New York. 270p.

FECHA DE RECEPCIÓN: 12/12/03

FECHA DE ACEPTACIÓN: 08/09/05

DIRECCIÓN DE LOS AUTORES

Instituto de investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR): A.A. 6713 casillero 36, Santiago de Cali, Colombia. E-mail: jbetancourt@invemar.org.co (J.M.B.P). A.A. 1016 Santa Marta, Colombia. E-mail: gramirez@invemar.org.co (G.R.T)

