

**XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
CIUDAD GUAYANA, VENEZUELA, OCTUBRE 2006**

**MODELO DE BALANCE HÍDRICO Y DE SEDIMENTOS EN EL  
COMPLEJO LAGUNAR DEL BAJO SINÚ**

*Correa P.L., Vélez J.I., y Smith R.A.*

*Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Colombia  
plcorrea@unal.edu.co, jivelezu@unal.edu.co, rasmith@unal.edu.co*

**RESUMEN:**

A pesar de la importancia ecológica, científica y paisajística de los humedales, estos han sido afectados o destruidos por factores como la planificación y técnicas de manejo inadecuadas, y las políticas de desarrollo sectorial inconsistentes y desarticuladas. En el caso del complejo lagunar del bajo Sinú, su problemática principal, es la alteración de la dinámica hídrica debido, esencialmente a la ganadería, la agricultura, el urbanismo, la construcción de vías en su interior y la operación de la central hidroeléctrica de Urrá I. A continuación se presenta una metodología de balance hídrico y una primera aproximación de un modelo de balance de sedimentos para este sistema, los cuales permiten diagnosticar e identificar tendencias de su dinámica hídrica y acercarse a la representación de su dinámica sedimentológica como herramienta de apoyo para la gestión integral del mismo. Todo esto se realiza mediante la calibración del un modelo de balance y la posterior simulación de escenarios, planteados para evaluar la evolución del complejo ante diferentes condiciones. Con la aplicación del modelo se caracterizó el régimen de caudales, niveles y sedimentos en cauces y ciénagas pertenecientes al sistema y se cuantificaron las tasas de depositación y pérdida de volumen de los principales cuerpos de agua.

**ABSTRACT:**

The Wetlands represents an environmental resource with ecological, scientific and landscaping incidences, these ecosystems have been affected and in some cases destroyed by different factors such as inadequate planning and management techniques, and incoherent development policies. One of greater problems than faces the Bajo Sinú wetland system, is the alteration of hydraulic dynamics due to different human activities, mainly cattle ranch, agriculture, urbanism, construction of routes and the operation of Urrá I hydropower project. This work defines a methodology balance and it implements a first approach of sediment balance model for the wetland system, which allows to diagnose and identify tendencies of the hydraulic and sediment dynamics. These results could be used as a tool to support and environmental management of the wetland system, using a set of scenarios under different conditions to evaluate the system behavior. With the application of the model the regime of volumes, levels and of sediments in channels and wetlands of the system was characterized; in addition loss of volume of the main water bodies were quantified through characterizing their evolution in natural and present conditions of intervention.

**PALABRAS CLAVES:** Balance Hídrico, Balance de Sedimentos, Complejo Lagunar del Bajo Sinú, Niveles, Caudales, Sedimentos, tasas de sedimentación, Evolución de cuerpos de agua, Manejo Integral de Humedales

**Key words:** Hydraulic balance, Sediment Balance, Bajo Sinú wetland system, Levels, Volumes, Sediments, Sedimentation rates, Evolution of water bodies, Integral Wetland Management.

## INTRODUCCIÓN

En el artículo que se presenta a continuación se consignan la metodología y los resultados obtenidos en la evaluación de la dinámica hídrica, y sedimentológica del complejo lagunar del Bajo Sinú. Esta investigación reunió algunos elementos importantes para estudiar la respuesta de este sistema lagunar frente a diferentes condiciones hidrológicas y/o antrópicas, teniendo en cuenta la importancia que tiene el conocimiento de esta dinámica para definir un plan de manejo integral adecuado en pro del desarrollo sostenible y sustentable de estos ecosistemas.

El complejo lagunar del Bajo Sinú se encuentra localizado en la parte norte del departamento de Córdoba, en la margen derecha del río Sinú. Es un sistema constituido por una red compleja de caños y leves depresiones o ciénagas, el cual se alimenta de la escorrentía superficial producida por su propia cuenca y por los caudales que le entrega el río Sinú, principalmente a través del caño Bugre. Todos los aportes recogidos por el complejo, desembocan al río Sinú a través del caño Aguas Prietas, a la altura del municipio de Lórica. En la planicie del complejo se identifican cuatro ejes principales de drenaje: el caño Aguas Prietas, el cual drena la zona oriental del complejo; un eje central asociado al caño Espino y al dren Principal o Berástegui; el caño Bugre, que funciona como conexión principal del complejo lagunar con el río Sinú; y finalmente, un eje de menor envergadura en la parte occidental del sistema, cuyos elementos principales de drenaje son los caños María y Chimancito, este sistema es el más pequeño, pero al mismo tiempo el que más intervenciones antrópicas ha sufrido (ver Figura 1). En la actualidad el complejo lagunar está sometido una serie de intervenciones antrópicas asociadas al proceso de adecuación de tierras y a la operación del embalse Urrá I. El proceso de adecuación de tierras se hace mediante la construcción de diques, canales de drenaje y sistemas de bombeo. (UNAL-CVS, 2005).

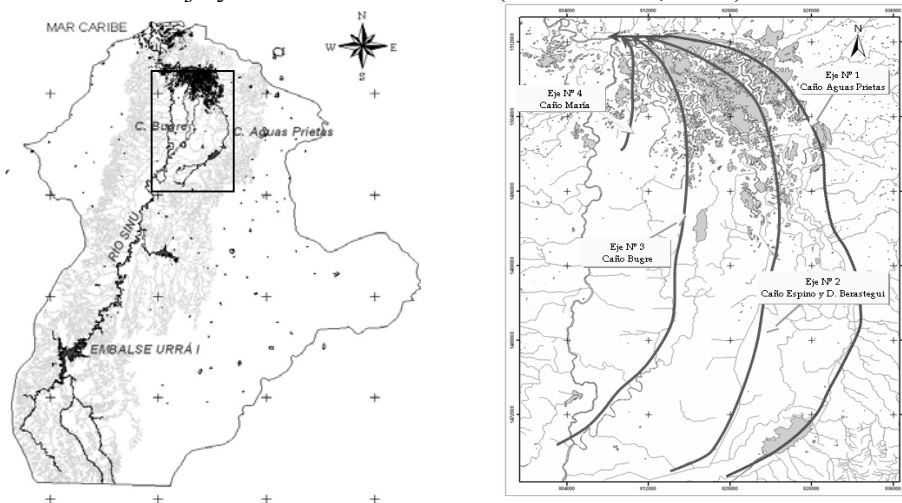
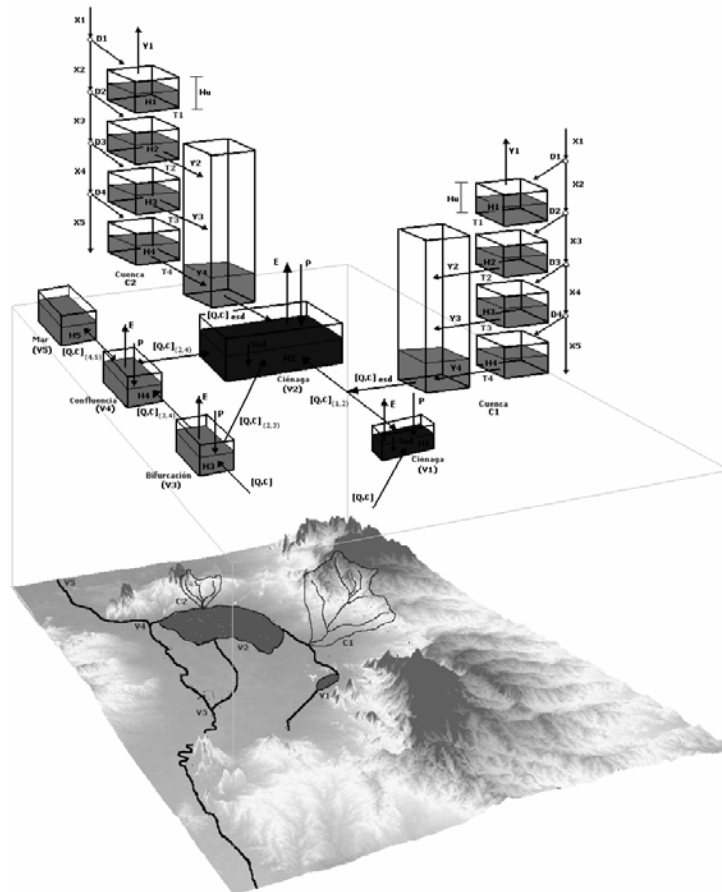


Figura 1.- Localización del complejo lagunar del Bajo Sinú y ejes de drenaje identificados en él.

## PROPUESTA METODOLÓGICA

El modelo propuesto se basa en el principio de conservación de la masa usando la ecuación de continuidad. El sistema que representa el complejo lagunar del Bajo Sinú está compuesto por el río, las ciénagas, los caños y el mar, elementos que interactúan entre sí, además de las cuencas que drenan a cada uno de estos elementos. Con el modelo de balance hídrico se busca representar a nivel diario, los procesos de producción de escorrentía e intercambios de agua y sedimentos a través de los canales de conexión mediante tres submodelos: (1) submodelo de producción hidrológica en las cuencas que entregan agua al sistema; (2) submodelo de transferencia y balance de agua, que representa los intercambios de agua realizados entre los elementos y actualiza los almacenamientos en cada volumen de control; (3) submodelo de transferencia y balance de sedimentos, que estima los intercambios de sedimentos entre los cuerpos de agua, los volúmenes de sedimentos depositados en la ciénaga y actualiza las curvas de capacidad. En la Figura 2 se muestra un esquema general del modelo conceptual.



**Figura 2.-** Esquema conceptual del modelo de balance hídrico y de sedimentos.

### **Modelo de Producción Hidrológica**

para la producción de escorrentía se utiliza un modelo conceptual de base física desarrollado inicialmente por Vélez (2001) como modelo distribuido, aplicado con excelentes resultados en cuencas de diferente tamaño en Francia y España (Vélez et al., 2002), y adaptado como modelo agregado por Correa y Vélez (2002), el cual ha sido aplicado para distintos fines y en varias cuencas en Colombia, siempre con excelentes resultados. En el modelo de producción hidrológica, la cuenca esta representada por una serie de cuatro tanques o niveles de almacenamiento que interactúan entre sí. En cada intervalo de tiempo, la precipitación,  $X_i$ , se distribuye a los diferentes almacenamientos, donde, en función del volumen almacenado en cada uno de ellos,  $H_i$ , se determina su contribución a la escorrentía,  $Y_i$ . El modelo realiza el balance de agua y actualiza los volúmenes almacenados en cada tanque.

### **Modelo de transferencia y balance de agua**

El modelo de transferencia de agua del sistema, considera cada cuerpo de agua como un tanque único de almacenamiento que interactúa con la atmósfera y con las otras unidades de almacenamiento a través de los caños o canales de conexión. Cada tanque en el sistema es un volumen de control, en el cual las entradas están representadas por la escorrentía superficial directa que proviene de su cuenca, los aportes de los otros elementos o tanques que componen el sistema y la precipitación sobre su superficie de agua; mientras que las salidas están asociadas con los flujos hacia otros elementos y la evapotranspiración sobre su superficie. En la mayoría de los casos los volúmenes de control están asociados a las ciénagas, pero en otros representan elementos de apoyo para el balance, como por ejemplo: bifurcaciones y confluencias de ríos o canales.

Las conexiones son canales que pueden transportar agua en ambos sentidos dependiendo de los niveles relativos de la superficie del agua en los dos cuerpos. Así mismo, el volumen de intercambio entre ellos es función de la diferencia de niveles y está formulada mediante la ecuación

de flujo uniforme. El intercambio subterráneo es función del gradiente hidráulico y las características hidráulicas del suelo que componen los acuíferos de la zona. En muchos casos se puede asumir que el flujo subterráneo es una variable de segundo orden dentro del balance y podría desprejarse. En el caso específico del complejo lagunar, es válida esta hipótesis porque la región está conformada por suelos de textura arcillo- limosa, agrupados en diques y basines producto de los procesos de sedimentación asociados a los eventos de inundación, lo que infiere que la permeabilidad es baja; además, los gradientes entre las ciénagas también son relativamente bajos.

Matemáticamente, bajo las consideraciones anteriores y aplicando la ecuación de balance en la ciénaga  $i$  se tiene:

$$\left( \frac{S_{(t)}^i - S_{(t-\Delta t)}^i}{\Delta t} \right) = \left( Q_{atm(t)}^i + Q_{esd(t)}^i \pm \sum_{j=i}^{Nc} Q_{intercambio}^{ij} \right) \quad [1]$$

En esta expresión, el superíndice  $i$  se refiere a la ciénaga donde se está haciendo el balance, el superíndice  $j$  se refiere a las demás ciénagas que están conectadas con la ciénaga  $i$ ;  $Q_{atm(t)}^i$  es el flujo neto de intercambio con la atmósfera dado por la diferencia entre la precipitación y la evaporación en la superficie de la ciénaga;  $Q_{esd(t)}^i$  es la escorrentía directa del área tributaria de la ciénaga; y  $Q_{intercambio}^{ij}$  es el caudal que se transfiere entre las ciénagas a través de los caños. La velocidad de transferencia de flujo entre las ciénagas está formulada con la ecuación de flujo uniforme propuesta por Chezy, así el caudal de intercambio está dado como:

$$Q_{intercambio}^{ij} = Ac_{(t)}^{ij} \cdot C^{ij} \cdot \sqrt{Rh_{(t)}^{ij} \cdot \left( \frac{h_{(t)}^i - h_{(t)}^j}{L^{ij}} \right)} \quad [2]$$

Donde,  $Ac$  es el área mojada,  $Rh$  es el radio hidráulico,  $C$  es el coeficiente de Chezy y  $L$  es la longitud de canal de conexión entre las dos ciénagas. En el modelo, la influencia del mar está considerada como una condición de frontera definida por el nivel de la marea en el sitio donde se interactúa con el, en este caso de aplicación, en la desembocadura del río Sinú. Este nivel establece el volumen que aporta el río Sinú al mar.

Aplicando la ecuación [1] para todo el sistema de ciénagas interconectadas se obtiene un sistema de ecuaciones simultáneas no lineales, el que se resuelve mediante el proceso iterativo de Gauss-Newton (Press et al., 1986).

### Modelo de transferencia y balance de sedimentos

El balance de sedimentos permite conocer la cantidad de sedimentos que intercambian los volúmenes de control y actualiza las cantidades que permanecen almacenadas. Sin embargo, este método es bastante complejo, responde a la ecuación de conservación de masa, advección y difusión en el medio, las cuales deben estar parametrizadas y calibradas convenientemente para lograr una aproximación realista a este problema (Munera, 2003). Por la escala espacial a la que se plantea el modelo de balances en el complejo lagunar, no es posible dar cuenta de estos procesos, por lo tanto, se aplica una representación muy simplificada de este método. Conceptualmente, el modelo de transferencia de sedimentos es igual al modelo de transferencia y balance de agua. Aplicando la ecuación de balance en la ciénaga  $i$  se tiene:

$$\left( \frac{S_{(t)}^i C_{(t)}^i - S_{(t-\Delta t)}^i C_{(t-\Delta t)}^i}{\Delta t} \right) = Q_{esd(t)}^i C_{esd(t)}^i + \sum_{j=1}^{Nc+} Q_{intercambio}^{ij} C_{(t)}^j - \sum_{k=1}^{Nc-} Q_{intercambio}^{ik} C_{(t)}^i - Q_{s_{entrada}} E \quad [3]$$

En esta expresión, el superíndice  $i$  se refiere a la ciénaga donde se está haciendo el balance, el superíndice  $j$  se refiere a las ciénagas que entregan agua y sedimentos a la ciénaga  $i$ ; el superíndice  $k$  se refiere a las ciénagas que reciben agua y sedimentos de la ciénaga  $i$ . El último término en la ecuación se refiere a la masa que se sedimenta en cada volumen de control, en cada  $t$ , como una función de la eficiencia de atrapamiento  $E$ , y de la carga de sedimentos suspendidos que llegan a él,  $Q_s$ . En la ecuación [3], la eficiencia de atrapamiento hace referencia a la relación

porcentual del total de sedimento que entra y el retenido por cada ciénaga (Asselman, 2002). Para la aplicación se utilizó la metodología propuesta por Chen, formulada como:

$$E = 1 - \exp\left(-V_s \frac{A}{Q}\right) \quad [4]$$

Donde,  $V_s$  es la velocidad de caída de las partículas de sedimento suspendido en ( $m^3/s$ ),  $A$  es el área superficial de volumen de control en ( $m^2$ ), y  $Q$  es el caudal que entra al sistema en ( $m^3/s$ ). La velocidad de caída de cada partícula de sedimento se estimó a partir de la ecuación de Rubey (Julien, 1995)

Al aplicar la ecuación [3] en cada ciénaga, se obtiene un sistema de ecuaciones simultáneas lineales, donde la variable desconocida es la concentración de sedimentos al final del periodo. Este sistema de ecuaciones se resuelve utilizando el método de Gauss (Press et al., 1986) en cada t.

### Actualización de las curvas de capacidad

Adicionalmente, el modelo planteado estima a nivel diario la cantidad de sedimentos que se quedan atrapados en las ciénagas. A esta escala temporal los cambios físicos en estos sistemas, son insignificantes, es así que se acumula el sedimento y cada 5 años se evalúan los cambios sufridos en la capacidad de la ciénaga y se construyen sus nuevas relaciones de capacidad, las cuales se actualizan automáticamente en el modelo. Para esto, la masa acumulada en las ciénagas se convierte de unidades de masa a unidades de volumen, así se conoce el espacio ocupado por el sedimento y posteriormente, éste se distribuye dentro del elemento de almacenamiento.

Para obtener el peso específico del material depositado se utilizó la metodología resumida por Strand (1974), donde se tiene que después de  $T$  años el peso específico de la mezcla  $\gamma_{mT}$ , incrementa su peso específico inicial  $\gamma_{m1}$  en función del tiempo de acuerdo con:

$$\gamma_{mT} = \gamma_{m1} + 6.9566 K \left( \frac{T}{T-1} \ln T - 1 \right) \quad [5]$$

$\gamma_{mT}$  y  $\gamma_{m1}$  ecuación [5] están dados en  $kg/m^3$  y  $K$  es una constante de consolidación que depende del tamaño del sedimento analizado (Julien, 1995).

$$\gamma_{m1} = +16.01794 (\gamma_{m(arena)} P_{arena} + \gamma_{m(arcilla)} P_{arcilla} + \gamma_{m(limo)} P_{limo}) \quad [6]$$

En esta ecuación  $P$  representa el porcentaje de arena, arcilla y limo que se depositan en la ciénaga. Para  $P$  y la constante de consolidación  $K$ , se utilizan los coeficientes obtenidos por Lane y Koelzer (1943), citados por Julien (1995) dados en función del tipo de operación de cada embalse.

En cuanto a la distribución de los sedimentos al interior de la ciénaga, se propone un método muy sencillo, porque en el complejo lagunar no hay información asociada a este proceso. Teniendo en cuenta el patrón típico de depositación en un embalse, el sedimento se distribuye en cada cuerpo de agua de la siguiente forma: el porcentaje del sedimento que corresponde a arenas y limos se deposita uniformemente en los taludes de la ciénaga, generando de esta forma una disminución del área superficial, y a su vez de su capacidad. El porcentaje correspondiente a la fracción de arcillas continúa su recorrido y se distribuye uniformemente en el fondo de la ciénaga, conformando los depósitos del fondo. En la Figura 3 se esquematiza este procedimiento.

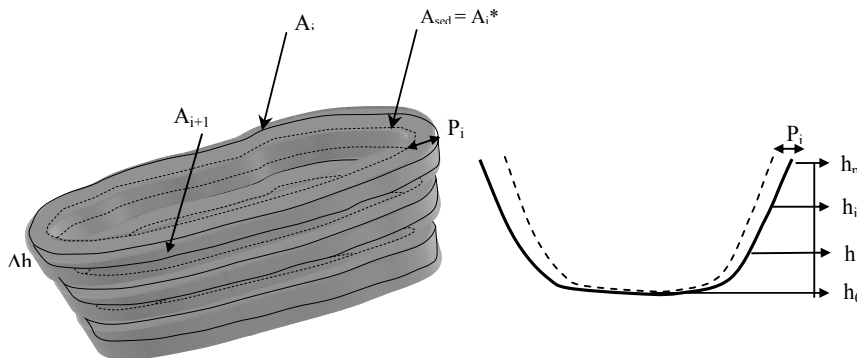


Figura 3.- Patrón de distribución de sedimentos al interior de los cuerpos de agua.

Éste es un método iterativo, muy simple que permite establecer las nuevas relaciones de capacidad de los cuerpos de agua, haciendo un balance entre el volumen de sedimento calculado y el que se espera que se sedimente. El procedimiento se realiza cada 5 años, y las curvas de capacidad obtenidas pasan ser las curvas actuales en la modelación. El balance se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$V_{sed} = \sum_{i=1}^{(H-h_0)/\Delta h - 1} \left( \frac{A_i + A_{i-1}}{2} \right) * \Delta h * P_i \quad [7]$$

Donde,  $V_{sed}$ , es el volumen de sedimentos que se va a distribuir en el sistema en m<sup>3</sup>;  $\Delta h$  es el incremento de altura para el paso de calculo;  $H$ , es la profundidad máxima en m.s.n.m;  $h_0$  es la altura inicial del sedimento acumulado en m.s.n.m;  $A$  es el área superficial de la ciénaga a la altura  $hi$  en m<sup>2</sup>; y  $P$  es la fracción de área que se sedimenta, en cada paso.

### Limitaciones del modelo propuesto

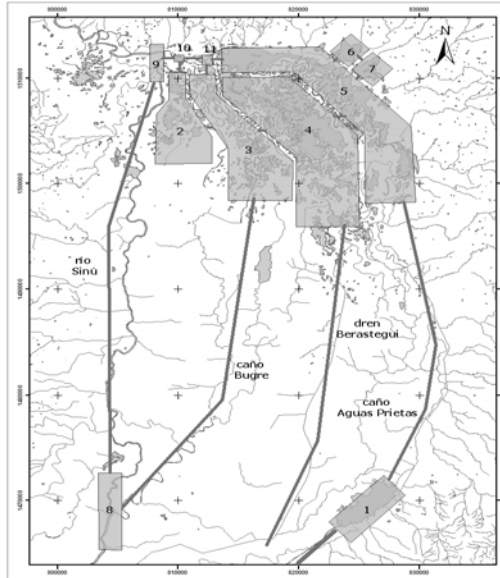
El modelo de balance de agua y sedimentos tiene básicamente dos limitaciones importantes que se resumen en: En el modelo de balance de agua, las bifurcaciones de los caños se hacen de manera ficticia asumiendo que estas corresponden a la ciénaga más próxima. No se tiene en cuenta la componente de flujo subterráneo por las razones ya expuestas, ni se consideran las demandas de agua y sus respectivos retornos; en esta primera valoración se considera que no son importante frente a los caudales y volúmenes que se manejan en el sistema. El modelo de balance de sedimentos no considera los procesos de erosión y de sedimentación en los caños, es decir en la ecuación de balance de sedimentos solo se da cuenta de la masa en el medio, y no se consideran las transformaciones que estas puedan sufrir en su recorrido. Además no se representan otros fenómenos como la difusión-dispersión, que son muy importantes si se quiere obtener una aproximación más fina de su distribución en el dominio espacial.

### INFORMACIÓN UTILIZADA

La configuración de los submodelos permite la utilización de información a diferentes escalas espacio – temporales. El modelo de producción hidrológica, utiliza información climática y de las características topográficas y del tipo de suelo de las cuencas que drenan el sistema. El modelo de transferencia y balance de agua, requiere información asociada a las características de los cuerpos de almacenamiento y a los canales de conexión. El modelo de transferencia y balance de sedimentos, necesita las características de los sedimentos y las cargas que llegan a las ciénagas. A continuación se enumera la información utilizada: 71 estaciones de precipitación, 20 estaciones de caudal y 32 estaciones de niveles, 2 estaciones de caudales sólidos, todas a resolución temporal diaria, que varían desde 1970 hasta el año 2003. Esta información fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM-. Serie de mareas, simulada en el sitio de desembocadura del río Sinú en el mar utilizando el software gnotide (<http://gnotide.unalmed.edu.co/>). Cartografía a escala 1:25000 levantada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y a escala 1:100000 resultado del proyecto “Diagnóstico Ambiental de la Cuenca del Río Sinú” ambas suministrada por la Corporación Autónoma Regional de los Valles de Sinú y San Jorge –CVS-. Fotografías aéreas del año 1966 e imágenes de satélite LANDSAT de las fechas: enero 24 de 1985 (Landsat TM), enero 30 de 1987 (Landsat TM), agosto 21 de 2000 (Landsat ETM+), enero 12 de 2001 (Landsat ETM+), julio 7 de 2001 (Landsat ETM+) y julio 26 de 2002 (Landsat ETM+). Campaña de aforos sólidos, líquidos y granulometrías realizadas a lo largo de l río Sinú y en algunos caños de conexión al complejo lagunar por la empresa URRÁ S.A. E.S.P. Relaciones morfométricas del complejo lagunar elaboradas a finales de los años 70’s por SCET-CVS-DNP (1981), citado por Ambiotec, (1997) en el marco del proyecto “Plan Maestro de la cuenca Hidrográfica del Río Sinú”. Las curvas obtenidas para el complejo lagunar del Bajo Sinú, se trasladaron a cada cuerpo de agua, afectándolas por un factor que relaciona el área del subcuerpo de agua con el área del Complejo Lagunar. Curva de calibración del sedimento, construida para estimar la producción de sedimentos en los sistemas con base en las estaciones y los aforos suministrados por las entidades.

## APLICACIÓN

El complejo lagunar del Bajo Sinú, está constituido por una red compleja de caños y leves depresiones o ciénaga, pero con unos ejes de drenaje claramente diferenciables, y es a partir de estas diferencias que se realizó una esquematización conceptual. En la Figura 4 se muestra la conceptualización adoptada para la modelación en el complejo lagunar del Bajo Sinú.



1. Ciénaga de Oro.
  2. Ciénaga Mosquitos y otras.
  3. Ciénaga Varadero y otras.
  4. Ciénaga Castañuela y otras.
  5. Ciénaga Guatínaja y otras.
  6. Ciénaga Playón de Momil.
  7. Ciénaga Sapal.
  8. Bifurcación caño Bugre\*.
  9. Confluencia caño Aguas Prietas en Sinú\*.
  10. Confluencia caño María en Aguas Prietas\*.
  11. Confluencia ejes de drenaje 1, 2 y 3\*.
- \* Representan elementos de apoyo en la modelación

Figura 4.-Esquema conceptual del complejo lagunar del Bajo Sinú

## Calibración

Inicialmente se calibró el modelo de producción hidrológica que entrega como resultado el caudal que cada subcuenca drena ya sea a los canales, ciénagas o volúmenes de control. Posteriormente y utilizando como información de entrada las series de caudal obtenidas en el paso anterior se calibró el modelo de balance hídrico y de sedimentos entre los años 1980-1987.

En el modelo de producción hidrológica, los parámetros de la cuenca y los pesos asignados a las estaciones se van modificando hasta obtener el modelo que mejor represente la producción de escorrentía natural en la cuenca, que es lo que se busca con este submodelo. Considerando la existencia del proyecto hidroeléctrico Urrá I, la calidad y la localización de la información disponible, se calibraron dos estaciones: una localizada en el proyecto hidroeléctrico (Angostura de Urrá) y la otra localizada aguas abajo del mismo (Montería). Lo anterior con el objetivo de reconstruir los efectos que tiene el proyecto hidroeléctrico en el sistema, así, los caudales de la cuenca complementaria entre ambas estaciones siempre representará una condición natural de producción de escorrentía; mientras que la primera estación (Angostura de Urrá I), mostrara los efectos de la intervención antrópica. En las Figuras 5 se muestran los resultados de la calibración del modelo de producción hidrológica.

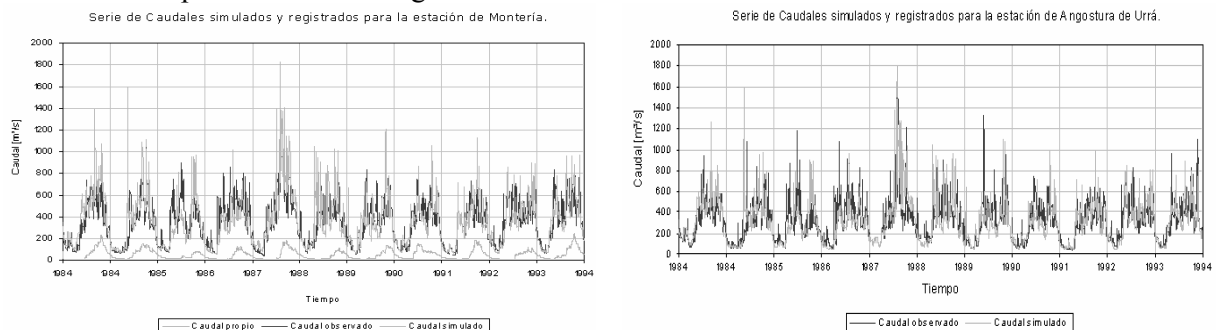
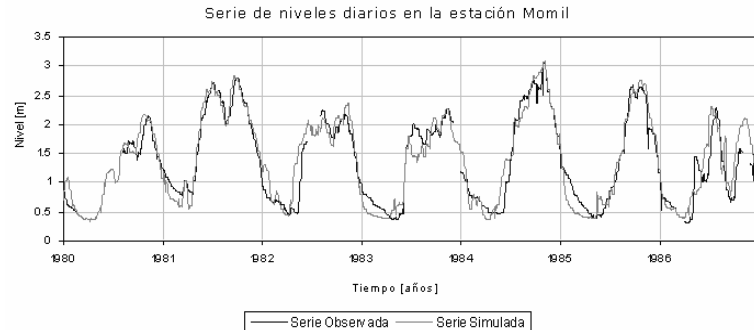


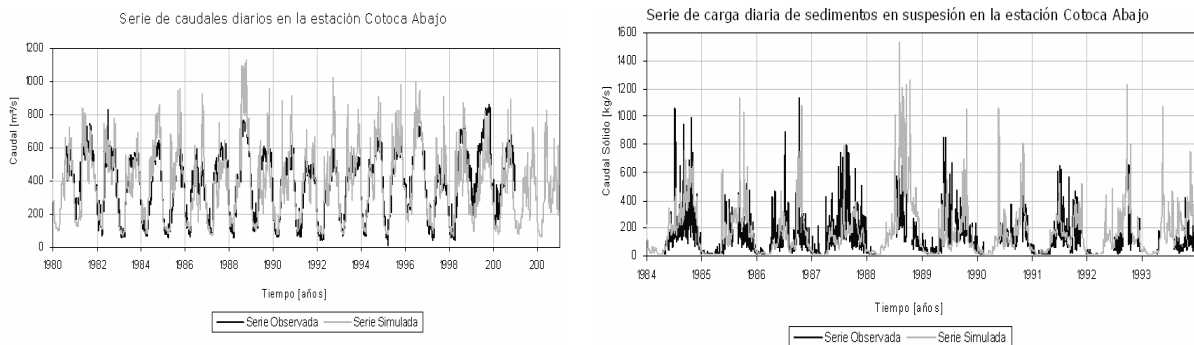
Figura 5. -Series de caudales simulados y registrados en las estaciones utilizadas para la calibración. A la izquierda la estación Angostura de Urrá y a la derecha la estación Montería.

En el caso del modelo de balance hídrico y de sedimentos, se utilizó la serie de niveles de la estación Momil, localizada en uno de los elementos de almacenamiento del complejo lagunar. Durante el proceso de calibración, para cada uno de los canales, se realizó un análisis de sensibilidad de las velocidades y caudales obtenidos, ajustando y modificando los factores de rugosidad del flujo. Estas variaciones se realizaron en función de la conveniencia de estas modificaciones en la respuesta de los caños. En la Figura 6 se muestran los resultados de la calibración en esta estación.



**Figura 6.-**Resultados de la calibración del modelo de balance hídrico y de sedimentos en el Complejo lagunar del Bajo Sinú. Estación Momil. Periodo (1980-1987)

Las series generadas en ambos modelos, representan adecuadamente los ciclos estacionales de las series, hay coincidencia en los periodos de agua altas y bajas. Sin embargo, con el objetivo de verificar la validez del modelo e identificar la robustez del mismo frente a la evaluación de diferentes escenarios, se utilizaron los datos de caudales en la estación Sabana Nueva, y Cotoca Abajo. La primera localizada aguas abajo de la derivación del río Sinú por el caño Bugre y la segunda localizada después de la confluencia del río Sinú con el caño Aguas Prietas, justo a la salida del sistema. Los registros de estas estaciones se compararon con los que entrega el modelo en los volúmenes de control N°8 y N°9 respectivamente. De igual forma, se utilizó la serie de carga de sedimentos en suspensión de la estación Cotoca Abajo. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos para la estación Cotoca Abajo. Con estas series se confirma la validez del modelo, en ambos casos se representa adecuadamente los caudales, las cargas de sedimentos y sus ciclos



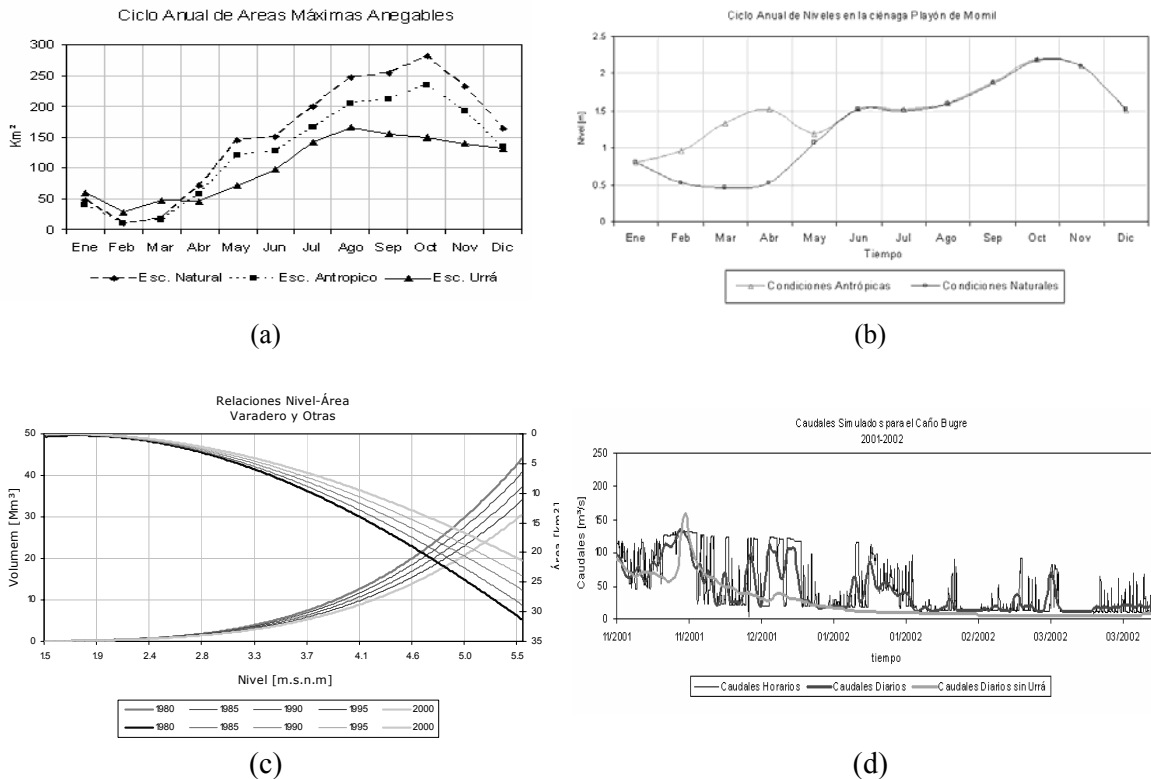
**Figura 7. -** Resultados de la validación del modelo en el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Estación Cotoca Abajo. Periodo (1980-2000)

### Evaluación de escenarios

Una vez calibrado el modelo se plantearon varios escenarios para evaluar los cambios del sistema, debido a las variaciones en algunas condiciones; tales como, la pérdida de área inundable del complejo ocasionada por el proceso de adecuación de tierras y la puesta en operación del Proyecto Hidroeléctrico de Urrá I. A continuación se muestran algunos resultados obtenidos con la simulación de los escenarios. En la Figura 8 se presentan varias graficas que corresponden a: el ciclo anual del área máxima indudable de complejo lagunar, obtenida como la suma de las áreas de cada subsistema; el ciclo anual de niveles en uno de los subsistemas en los que se dividió en



complejo lagunar del Bajo Sinú; la variación en las curvas de capacidad de la ciénaga varadero, que es la más afectada por el procesos de sedimentación; los caudales simulados durante un verano a nivel horario y a nivel diario en el caño Bugre antes y después de la puesta en marcha del Proyecto Hidroeléctrico de Urrá I. Cada una de ellas corresponde a un ejemplo de algunos resultados que se pueden obtener con la aplicación del modelo propuesto



**Figura 8.** – Resultados obtenidos en la simulación de escenarios. (a) ciclo anual de áreas máximas del complejo lagunar; (b) comparación de niveles en la ciénaga el Playón de Momil; (c) variación en las curvas de capacidad de la ciénaga varadero; (d) caudales simulados en el caño Bugre para el verano del 2001

En términos de áreas, los efectos de las intervenciones en el complejo lagunar del bajo Sinú, se traducen en una disminución general del área anegada. Por el Proyecto Hidroeléctrico de Urrá I, en invierno el área disminuye del orden de 40% con relación a las condiciones naturales, pero en verano, específicamente en los meses de enero, febrero y marzo, pasa todo lo contrario y aumentan las áreas máximas anegadas, pasando de 10 km² en el periodo más seco a 28 km² en las condiciones actuales de intervención. En general, el sistema ha perdido área potencialmente anegable pasando de tener 281 km² a 165 km². En el caso del Playón de Momil, este tiene una clara variación en los niveles en los meses de verano, inducidos por un dique que construyeron los pescadores en la boca que comunica la ciénaga y que sirve precisamente aumentar sus niveles, cada año se construye en verano el dique y se destruye en invierno. La gráfica mostrada para el subsistema Varadero, corresponde al resultado obtenido en la simulación de la dinámica hídrica del Complejo Lagunar frente a la ampliación de la frontera agrícola y ganadera. Según lo obtenido, las intervenciones a la que está sometido el complejo, aceleran considerablemente el proceso de sedimentación induciendo que este subsistema en particular tienda a desaparecer 65 años aprox.; siempre y cuando se mantenga la tasa de sedimentación obtenida, que corresponde al 1.5 % anual, es decir, la pérdida del 30% de su capacidad en 20 años. En el caño Bugre, se observa los efectos de la operación de Urrá I en los caudales del río Sinú. En verano se altera el patrón natural de la recesión, en condiciones naturales, durante este periodo se presentan caudales cada vez menores; mientras que, la operación de embalse induce caudales de altas magnitudes, característicos de la época de invierno. Por otro lado, en invierno se hace evidente el efecto atenuador de picos asociados a los eventos máximos.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló e implementó un modelo de balance Hídrico y de Sedimentos que busca representar los procesos relacionados con la dinámica hídrica y sedimentológica del complejo lagunar del bajo Sinú. Teniendo en cuenta la escala espacio temporal a la que se está trabajando se considera, según los resultados obtenidos durante la calibración y validación del mismo, que el modelo implementado es adecuado para representar esta dinámica.

Este estudio constituye una contribución al estudio de humedales en el país, esta vez desde la perspectiva de la dinámica hídrica y una primera aproximación a la sedimentológica. Para el complejo Lagunar del Bajo Sinú es una contribución al entendimiento de las complejas relaciones que ocurren en este sistema, buscando evaluar los impactos que sobre la dinámica hídrica han tenido las diferentes obras que han afectado este complejo y dando luces sobre cómo se podría restituir en alguna medida las condiciones naturales de este sistema.

Con la aplicación del modelo se caracterizó el régimen de caudales, niveles y sedimentos en cauces y ciénagas pertenecientes al sistema y se cuantificaron las tasas de depositación y pérdida de volumen de los principales cuerpos de agua. Las series (caudales, niveles y carga de sedimentos) obtenidas por el modelo representan adecuadamente los ciclos estacionales de las series registradas en las estaciones, hay una fuerte coincidencia en los periodos de aguas altas y bajas.

Uno de los elementos más importantes en la aplicación de un modelo como el propuesto es la información batimétrica y topográfica. Bien es conocido que los resultados obtenidos y la veracidad de los mismos son función directa de la calidad de la información disponible. En este sentido, la información batimétrica del complejo lagunar del bajo Sinú es bastante deficiente, solo se disponía de los valores que representaban las relaciones morfométricas, pero no de curvas de nivel que permitieran representar espacialmente estas relaciones. Desafortunadamente esto limitó la aplicación del modelo, restringiendo un poco su potencial aplicabilidad, por ejemplo no se pudo determinar espacialmente la variación de las áreas inundadas del complejo para cada escenario, lo cual es fundamental para la implementación de medidas restrictivas en el complejo.

## REFERENCIAS

- Asselman N. y Van W. M.** (2002). Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the River Rhine in The Netherlands. *Journal of Hydrology* 268. 127–142.
- AMBIOTEC LTDA - Empresa Multipropósito URRRA S.A.** (1997). Diagnóstico ambiental de las ciénagas de Lorica y Betancí. *Informe Final*. Bogotá.
- Correa P. L y Velez J.I.** (2002). Sistema de Información Geográfica para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en la Cuenca de la Quebrada Chachafruto. *Trabajo Dirigido de Grado*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.
- Munera J. C.** (2003). Dinámica Hidrológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta Mediante Técnicas de Sensores Remotos. *Tesis de Maestría en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.
- Julien P.** (1995). Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press. New York, 280p.
- Press W. and Flannery B. , Teukolsky S. y Vetterling W. (1986). *Numerical Recipes. The art of scientific computing*. Cambridge University Press. New York.
- UNALMED-CVS (2005)** Diagnóstico de la Dinámica Hídrica Tenencia y Ocupación del Complejo Lagunar del Bajo Sinú. *Universidad Nacional de Colombia*. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.
- Vélez J.** (2001). Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. *Tesis Doctoral*. *Universidad Politécnica de Valencia*. Escuela Técnica superior de ingenieros de Caminos y puertos. Departamento de Ingeniería. Hidráulica y medio Ambiente. Valencia.