

DINÁMICA HIDROLÓGICA DE LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA

*Juan C. Múnera, Jaime I. Vélez, Germán Poveda,
Javier E. Posada, Juan D. Montoya y Yuley M. Cardona*
*Posgrado en Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente,
Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*
jivelezu@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 10 de Julio de 2003 / Aceptación: 25 de Septiembre de 2003 / Recibida versión final: 30 de Septiembre de 2003

RESUMEN

Se implementa un modelo de balance hidrológico orientado a estudiar la Dinámica del Complejo Lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM). El modelo simula la evolución temporal (con resolución de media hora) de niveles de agua y salinidades en 23 cuerpos de agua, para un horizonte de simulación de 30 años. Las relaciones topológicas de ciénagas y canales de conexión, necesarias para la estimación de los flujos de transferencia entre cuerpos de agua, fueron construidas con información de campañas de aforos, batimetrías e imágenes de satélite. Para estudiar la interacción entre el mar Caribe y la CGSM, se determinan los armónicos constitutivos de la onda de marea y se describe el comportamiento morfológico de la conexión entre ambos sistemas en "La Boca de La Barra". La variabilidad hidrológica interanual del sistema se explora mediante correlaciones entre los caudales de los ríos de la zona y los índices SOI y TSM representativos del fenómeno macroclimático El Niño / Oscilación del Sur (ENSO). Como resultado del modelo hidrológico se presentan series de niveles y salinidades para el período 1971-2000 y se evalúa la respuesta del complejo ante diferentes escenarios de operación del sistema de control de compuertas hidráulicas instaladas en los caños Aguas Negras y Renegado en el período 1998-2000. Los resultados del modelo ilustran su utilidad como herramienta de planificación del complejo lagunar CGSM.

PALABRAS CLAVES: Ciénaga Grande de Santa Marta, Hidrología, Lagunas Costeras, Modelos Hidrológicos, Fenómeno ENSO, Onda de Marea.

ABSTRACT

A hydrologic water balance model is implemented to study the dynamics of the complex "Ciénaga Grande de Santa Marta" (CGSM) Lagoon. The model simulates the time evolution (half-hourly) of water levels and salinities in 23 water bodies, during several years. The topological relations between the channels and lagoons were constructed with data obtained through field campaigns regarding channel flows, bathymetries and satellite images. To study the interaction between the Caribbean Sea and the CGSM Lagoon, constituent harmonics of the tidal wave were established, and a description of the morphologic behavior of the connection between systems in "La Boca de la Barra" was made. Interannual hydrologic variability is studied with correlations between river discharges in the region and macro-climatic phenomena such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO), represented by the Southern Oscillation Index (SOI), and the Sea Surface Temperature on the Pacific Ocean. The results of the water balance model are presented as time series of water levels and salinities for period 1971 - 2000, and for different operational scenarios of the floodgates hydraulic system installed in the Aguas Negras and Renegado channels, for period 1998 - 2000. The model results supports its usage as a decision support system for planning and management of the CGSM lagoon.

KEYWORDS: Big Marsh of Santa Marta, Hydrology, Coastal Lagoons, Hydrological Models, Fenómeno ENSO, Wave of Tide.

1. INTRODUCCIÓN

El complejo lagunar de la CGSM hace parte del Delta exterior derecho del Río Magdalena en su desembocadura en el mar Caribe, compuesto por numerosas ciénagas interconectadas entre sí. Su estructura geomorfológica y el contacto con aguas continentales y marinas le confieren características propias de una laguna costera. El conjunto de ciénagas está separado del mar Caribe por un cordón litoral, conocido como la Isla de Salamanca, y mantiene un intercambio halohídrico que se limita al flujo por una única boca conocida como La Boca de la Barra. La CGSM es el principal cuerpo de agua del conjunto y la ciénaga más extensa de la cuenca Caribe colombiana con una superficie inundada cercana a los 430 km². El complejo lagunar tiene gran importancia socio económica como fuente de ingresos de las comunidades asentadas en la región y, ecológica, debido a sus extensas áreas inundadas circundadas por bosques de manglar que constituyen un hábitat propicio para numerosas especies de peces, invertebrados, crustáceos, moluscos y aves endémicas y migratorias.

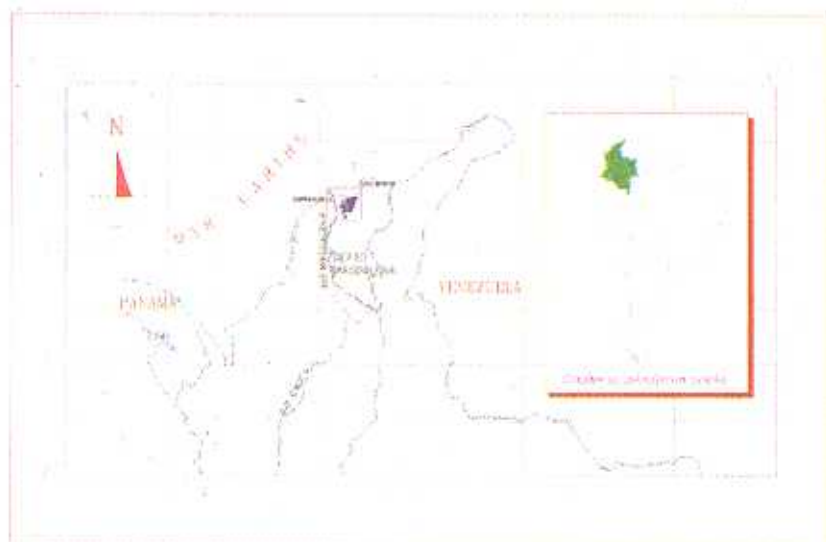
El complejo de ciénagas presenta variabilidad estacional importante en las condiciones de salinidad, y puede alcanzar valores muy bajos en épocas de intensa actividad hidrológica sobre su cuenca de drenaje natural, de unos 7730 km², sumado a los aportes del Río Magdalena a través de algunos caños y por desbordamiento directo sobre su llanura de inundación, cuando sus niveles superan los diques naturales. En estos casos, el sistema se dulcifica adquiriendo condiciones similares a las de un entorno fluvial. En el caso opuesto, épocas prolongadas de sequías severas y niveles bajos en el Río Magdalena, los aportes de agua de mar y las altas tasas de evaporación pueden producir concentraciones salinas en algunos cuerpos de agua que exceden por mucho el valor medio del mar Caribe. Estas condiciones hipersalinas se transfieren a los suelos que circundan las ciénagas afectando los bosques de mangle no adaptables a estas condiciones. A finales de los años ochenta, la presión antrópica ejercida sobre el complejo lagunar durante las décadas precedentes, marcada por actuaciones de diversa índole (Ver Múnera et al, 2003, en imprenta), sumada a procesos climáticos y sedimentológicos naturales, generaron un desequilibrio y deterioro de las condiciones ambientales del complejo lagunar, principalmente por hipersalinización de suelos y ciénagas. Esta situación causó la muerte de miles de hectáreas de

bosques de manglar, con la consecuente pérdida de hábitat y la disminución de poblaciones de muchas especies acuáticas y terrestres. El diagnóstico de esta problemática (Corpamag, 1993; Prociénaga 1994; Piñeiro, 2002) enfocó las soluciones en la restitución de los flujos de agua dulce provenientes del Río Magdalena, mediante dragado de los principales caños de comunicación, y la construcción de un sistema de regulación mediante la instalación de compuertas hidráulicas en los caños Aguas Negras y Renegado, al suroeste.

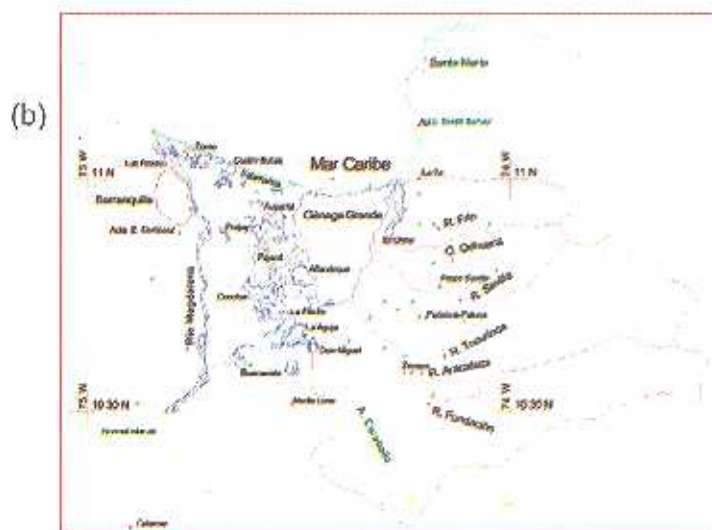
En este trabajo se presenta una interpretación de la dinámica hidrológica del complejo lagunar abarcando diferentes escalas temporales, basada en los resultados de un modelo hidrológico implementado para este fin. El modelo integra los procesos físicos que condicionan los flujos de agua y sustancias disueltas en ésta, principalmente sales provenientes del intercambio con el mar Caribe, y permite simular la evolución temporal de niveles y salinidades de los diferentes cuerpos de agua que conforman el sistema.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El complejo lagunar de la CGSM está ubicado en la región Caribe Colombiana, departamento del Magdalena. Su delimitación física se presenta con el Río Magdalena al Oeste, el mar Caribe al Norte, el piedemonte occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) al Este, y la divisoria con la ciénaga de Sapayán al Sur. Los principales cuerpos de agua son la CGSM con 443 Km² y la ciénaga de Pajalar con 96 Km². Al Sur de Pajalar, se encuentra un conjunto de ciénagas, las principales de las cuales son Alfandoque, Bucnavista, La Aguja, La Tigra, Tamacá, Don Miguel, El Juncal, La Piedra y El Conchal. Al Noroeste de la CGSM se ubican las ciénagas Auyama y Bristol, y más al norte, en la Isla de Salamanca, Cuatro Bocas, El Loro, El Torno y Poza Verde. En la Figura 1 se presenta la localización general, un mapa de la zona mostrando las estaciones climáticas de mediciones, las cuencas de drenaje y los cuerpos de agua que hacen parte del sistema, y una composición en falso color RGB 453 de una imagen Landsat de enero de 1987.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 1.

Complejo lagunar de la CGSM.

(a) Localización general.

(b) Mapa Hidrográfico, cuencas y estaciones climáticas.

(c) Combinación RGB 453 de Imagen Landsat de enero de 1987

3. CLIMA E HIDROLOGÍA

En la mayoría de los estudios de la problemática de la CGSM se ha tratado la dinámica hidrológica bajo una óptica del ciclo anual, considerando que las variaciones estacionales son las más relevantes en el comportamiento físico del sistema, suposición que ignora los ciclos

hidrológicos de una escala temporal mayor como la interanual. Esta perspectiva se ha reevaluado en los últimos años al tener un conocimiento más amplio de los procesos climáticos de escala global que gobiernan la variabilidad hidrológica a escala interanual, principalmente el fenómeno ENSO en sus fases cálida (El Niño) y fría (La Niña). Algunos trabajos han

demostrado la incidencia clara del ENSO sobre la hidrología colombiana (Poveda, 1996, 1998; Mesa, Poveda y Carvajal, 1997; Vélez, Poveda y Mesa, 2000). En gran parte del país, "La Niña" ocasiona un incremento en la precipitación, y el efecto inverso sucede con "El Niño". Existen evidencias sobre una disminución en las Ondas del Este que atraviesan la geografía colombiana en su trayectoria hacia el Pacífico cuando se presenta El Niño, las cuales son una importante fuente de variabilidad climática y de precipitación en la costa Caribe y el valle del río Magdalena (Martínez, 1993 citado por Vélez, Poveda y Mesa, 2000).

La precipitación media de la zona oscila entre 300 y 1500 mm/año que ocurren principalmente en el periodo comprendido entre abril y noviembre, con dos máximos apreciables concentrados entre los meses de mayo-junio y septiembre-octubre. El número de días con lluvia en la zona durante un año típico, según datos de 14 estaciones distribuidas en la región, fluctúa entre 20 y 100 con un valor medio de 60 y la temperatura ambiente promedio, según datos de 6 estaciones climáticas, está entre los 27 y 29 °C con variaciones diurnas del orden de los 10 °C. Las variaciones de temperatura a lo largo del año son poco significativas y la humedad relativa varía poco oscilando en el rango entre 75 y 85%; la radiación solar es muy intensa por la ausencia de cobertura de nubes en las horas diurnas (Mesa, Poveda y Carvajal, 1997). Si bien, la distribución espacial de la lluvia presenta cierta uniformidad, se observan gradientes importantes, principalmente en sentido norte - sur, ocasionados por efectos costeros locales que son debidos a la diferencia entre las tasas de calentamiento o enfriamiento entre cuerpos de agua y tierra firme, induciendo gradientes térmicos que causan inestabilidad en la atmósfera - fenómeno conocido como brisas marinas -. No obstante, los cambios más marcados en la distribución de la lluvia se dan al Este de la CGSM, cerca de la Sierra Nevada, relacionados con los patrones de viento que circundan el macizo (Mesa, Poveda y Carvajal, 1997).

Mejía (2002) reporta gran concentración de Sistemas Convectivos de Mesoescala en el valle del Río Magdalena y el piedemonte entre las llanuras de la región Caribe, atribuidos a la orientación de las montañas respecto a los flujos sinópticos, combinado al efecto del ciclo diurno de radiación solar con la circulación de vientos locales entre valles y montañas,

que en el caso particular de la CGSM son reforzados por la acción de las brisas marinas. La temporada seca, normalmente entre diciembre y abril, se atribuye a la intensa acción de los vientos Alisios del NE, con subsidencia y altas presiones asociadas. El resto del año, los Alisios se debilitan cobrando importancia las brisas marinas como mecanismos efectivos de generación de lluvia al arrastrar aire húmedo hacia el interior (Mesa, Poveda y Carvajal, 1997).

4. BALANCE HIDROLÓGICO

El forzamiento climático externo y los fenómenos hidrológicos locales determinan la variabilidad espacio temporal de la precipitación y las variables relacionadas con la evaporación: magnitud y dirección de los vientos sinópticos (los alisios), la humedad, la nubosidad, radiación solar y temperatura. Del mismo modo, condicionan el régimen fluvial del Río Magdalena y de los ríos que drenan la vertiente occidental de la SNSM hacia la CGSM. A la complejidad climática e hidrológica se adiciona la acción de otras componentes de más alta frecuencia en el frente costero, como el oleaje y la onda de marea. Estas variables, en conjunto con el aporte de sedimentos fluviales, determinan la morfología y la dinámica litoral, y condicionan la magnitud de los flujos de intercambio halohídrico entre el mar Caribe y el complejo de ciénagas.

La dinámica hidrológica del complejo lagunar, es decir, el comportamiento de los niveles, salinidades y concentración de nutrientes y contaminantes en cada ciénaga, está relacionado con su distribución espacial, los flujos de intercambio entre éstas y la atmósfera, aportes de las subcuencas de drenaje, el intercambio con los cuerpos de agua vecinos a través de caños, el intercambio indirecto con el mar Caribe a través de la CGSM, la capacidad de almacenamiento dada en virtud de su superficie y profundidad media y los patrones de circulación.

Para entender mejor esta dinámica, se implementó un modelo de balance hidrológico que involucra estas relaciones complejas en forma simple. El modelo se utilizó para efectuar una simulación numérica para el período de tiempo con registros históricos de las variables hidrológicas relevantes en el balance. Como resultado de esta simulación se obtiene la variabilidad de niveles y salinidades en cada cuerpo de agua del sistema.

4.1. El Modelo Matemático de Balance Hidrológico

El modelo matemático de balance de agua implementado se basa en el principio físico de conservación de la masa, que se puede representar matemáticamente para cada ciénaga del complejo lagunar mediante la ecuación de continuidad de masa. Este concepto permite representar el efecto que tienen las posibles entradas y salidas de agua hacia cada uno de los cuerpos que conforman el complejo lagunar y observar la evolución temporal de sus niveles, salinidades y otras variables físicas, teniendo en cuenta la variabilidad de las distintas escalas hidrológicas involucradas en los fenómenos que inciden sobre el balance.

Cada ciénaga es considerada como un tanque de almacenamiento que actúa como volumen de control para establecer el balance de masas. El modelo simula las transferencias de agua entre cuerpos de agua mediante la implementación de la ecuación de continuidad de masas, la cual tiene implícita una ecuación de momentum necesaria para establecer los flujos a través de los caños de interconexión. El intervalo de cálculo del modelo se definió en media hora, teniendo en cuenta las múltiples escalas temporales de los fenómenos que tienen influencia en el balance. Este intervalo de tiempo es razonable para caracterizar la precipitación y el fenómeno de la marea que son las variables con fluctuaciones de más alta frecuencia.

El concepto de conservación de masa, en su interpretación más simple, establece que la diferencia entre las entradas y salidas de agua al volumen de control en un período de tiempo, debe ser igual al cambio en la cantidad de agua almacenada en el período. Esta es la hipótesis fundamental para implementar el algoritmo de cálculo del balance de agua en el sistema. Las entradas y salidas respecto al volumen de control incluyen el intercambio con la atmósfera (precipitación y evaporación), la escorrentía en la subcuenca, y el intercambio con otros cuerpos de agua a través del sistema de canales de interconexión (ciénagas adyacentes, el río Magdalena y el mar Caribe). El intercambio con el subsuelo se considera de segundo orden en el análisis, debido a la presencia de suelos arcillosos que conforman diques y basines con conductividades hidráulicas muy bajas. Esta hipótesis se verificó en numéricamente evaluando las máximas tasas de flujo subterráneo posibles entre cuerpos de agua adyacentes, estableciendo en todos los casos, que el flujo de agua es al menos dos órdenes de magnitud menor a los flujos superficiales que se presentan por los caños de comunicación entre éstos cuerpos de agua para el mismo gradiente hidráulico asumido en el análisis.

Las transferencias a través de los caños de comunicación entre ciénagas tiene la forma de una ecuación de flujo uniforme representada por el último término de la expresión de Balance hidrológico que se presenta a continuación:

$$h_{(t+\Delta t)}^i = h_{(t)}^i + \frac{1}{A_{(t)}^i} \cdot \left(q_{atm}^i + q_{esc}^i + q_{sub}^i + \sum_j A c_{(t)}^{ij} \cdot C^j \cdot \sqrt{RH_{(t)}^{ij}} \cdot \sqrt{\frac{h_{(t)}^i - h_{(t)}^j}{L_{(t)}^{ij}}} \right) \cdot \Delta t \quad (1)$$

En esta expresión, el superíndice i se refiere a la ciénaga donde se efectúa el balance, el superíndice j se refiere a todas las ciénagas conectadas con la ciénaga designada por i . El parámetro h es el nivel de la ciénaga indicada por el superíndice, A es el área superficial del espejo de agua de la ciénaga. Los parámetros Ac , RH , C y L son el Área, Radio Hidráulico, Coeficiente de fricción de Chezy y Longitud del caño que comunica las ciénagas ij .

4.2. El Modelo matemático de Balance Salino

El modelo matemático de balance salino también se basa en el principio de conservación de la masa y está acoplado al modelo de balance de agua. Para evaluar la salinidad

en cada ciénaga, se tiene en cuenta como condición de frontera la salinidad media del mar como un valor invariante en el tiempo, y los intercambios de este con el complejo lagunar a través de la Boca de la Barra; esta componente del modelo permite obtener como resultado la evolución temporal de la concentración salina en cada ciénaga del complejo, asumiendo como hipótesis que las sales son sustancias conservativas en el agua. En el balance de sal en cada ciénaga se asume que la concentración salina del agua que fluye por un caño en un período de tiempo es igual a la concentración del cuerpo de salida en el período anterior y la masa de sal que sale en el período es igual al producto del volumen de agua transportado en ese período y su concentración.

La concentración de sal en cada ciénaga al final del intervalo de simulación, se evalúa teniendo en cuenta la salinidad del período anterior y la masa de sal que entra

y sale por todos los caños que comunican la ciénaga con otros cuerpos de agua, dividiendo por el nuevo volumen de agua. La ecuación de balance es la siguiente:

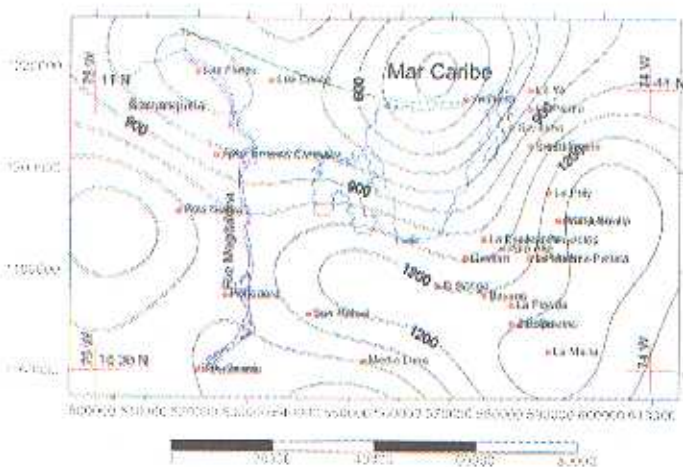
$$C_{t+\Delta t}^i = \frac{\left(C_i^i \cdot Vcic_i^i + Qatm_t^i \cdot \Delta t + \sum_j Q_{t+\Delta t}^{ij} \cdot C_j^i \cdot \Delta t - \sum_j Q_{t-\Delta t}^{ij} \cdot C_i^i \cdot \Delta t \right)}{Vcic_{t+\Delta t}^i} \quad (2)$$

En la ecuación anterior, el superíndice *i* se refiere a la ciénaga considerada en el balance, *j* se refiere a las otras ciénagas conectadas con la ciénaga *i*, *C* es la concentración de la ciénaga indicada en el período especificado, *Vcic* es el volumen de la ciénaga en el período especificado, *Qatm* Δ*t* es el volumen de agua intercambiado con la atmósfera en el período, *Q*_{*t*+Δ*t*}^{*ij*} es el caudal en el caño que comunica las ciénagas *ij* en el período, y el signo de la sumatoria indicará si el flujo ingresa (+), ó si sale (-).

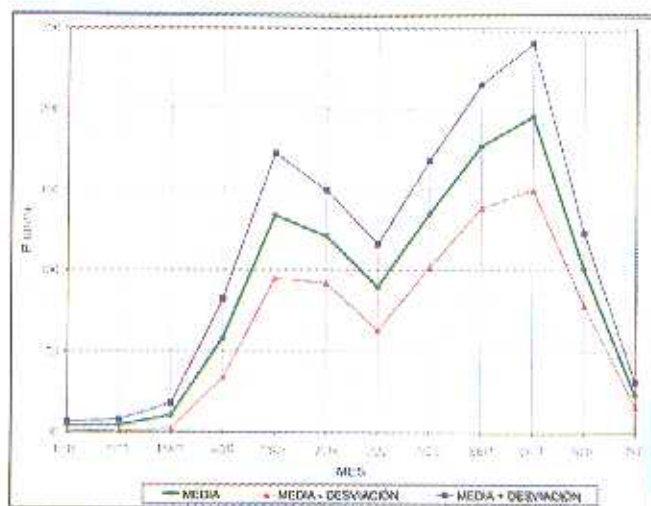
4.3. Componentes del Modelo de Balance Hidrológico

La precipitación. Constituye la entrada de agua desde la atmósfera y se estima directamente de los registros de las estaciones pluviométricas de la zona, ponderadas

convenientemente, de acuerdo a la estructura de correlación de los datos. La variación espacio temporal de la precipitación se analiza con base en información mensual de 33 estaciones distribuidas a lo largo de todo el complejo lagunar. Para ilustrar la variabilidad en el ciclo anual se construyeron isoyetas mensuales para toda la región de la CGSM (Figura 2a). Con los registros de precipitación mensuales multianuales de las estaciones se determinó el ciclo anual de precipitación para toda la zona (Figura 2b). En las Figuras 2c y 2d se presentan isoyetas promedio mensuales para el mes más seco (enero) y más lluvioso (octubre).



(a)

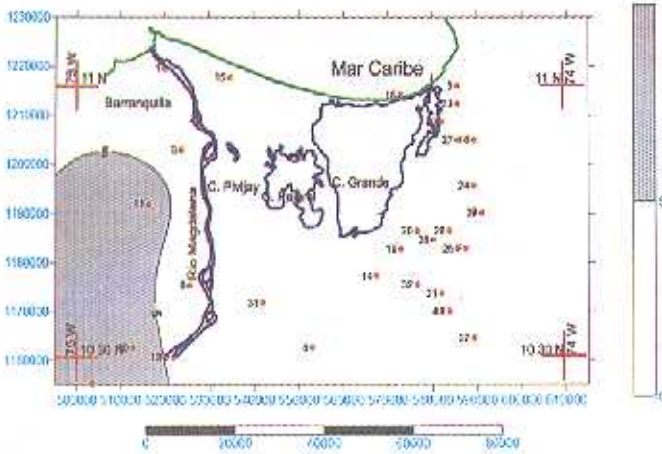


(b)

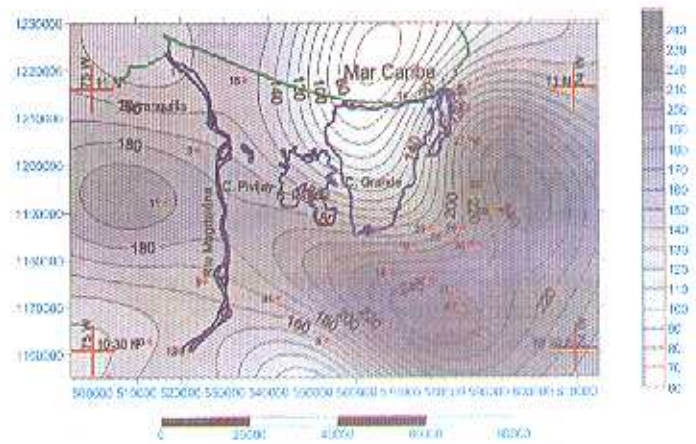
FIGURA 2.

(a). Isoyetas de Precipitación anual.

(b) Ciclo anual de Precipitación según estaciones en la zona con bandas de una desviación típica.



(c)



(d)

FIGURA 2.

- (c) Isoyetas mensuales de enero.
- (d) Isoyetas mensuales de octubre.

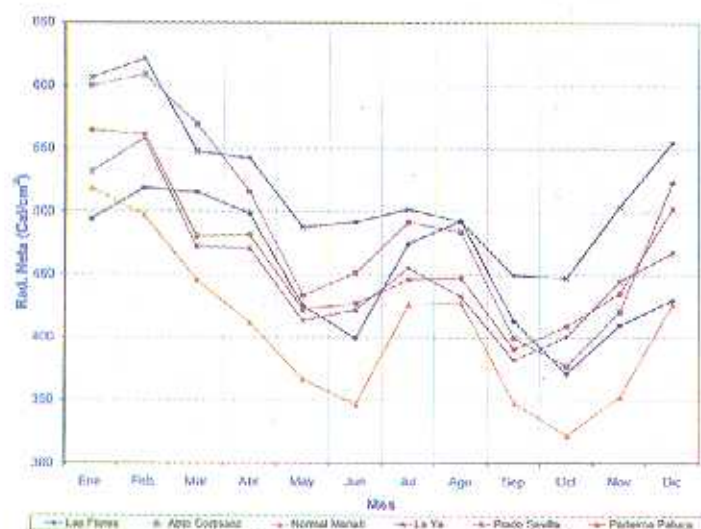
La evapotranspiración. Es la salida directa de agua desde el suelo y los cuerpos de agua hacia la atmósfera y su determinación son fundamentales en la simulación del balance hídrico del complejo lagunar. Esta variable posee una variabilidad espacio temporal mucho menor que la precipitación, y por esta razón, su determinación se hizo a escala mensual para su posterior desagregación a intervalos de tiempo menores acordes con el modelo.

La evaporación potencial se estimó en sitios puntuales correspondientes a las estaciones con información climática, y posteriormente se trasladó a cada una de las ciénagas ponderando los valores puntuales de acuerdo a su distribución espacial y a características regionales. Aunque existen algunas mediciones de tanque evaporímetro en algunas estaciones, las series presentan muchas interrupciones, por lo cual estos registros se utilizaron solo como valores de referencia y se calculó la variable aplicando una metodología indirecta con base en las series de otras variables climáticas más confiables (Radiación solar, Temperatura, Humedad Relativa, Precipitación). El método utilizado para estimar la evaporación potencial es el de Turc modificado (ver Barco y Cuartas 1998),

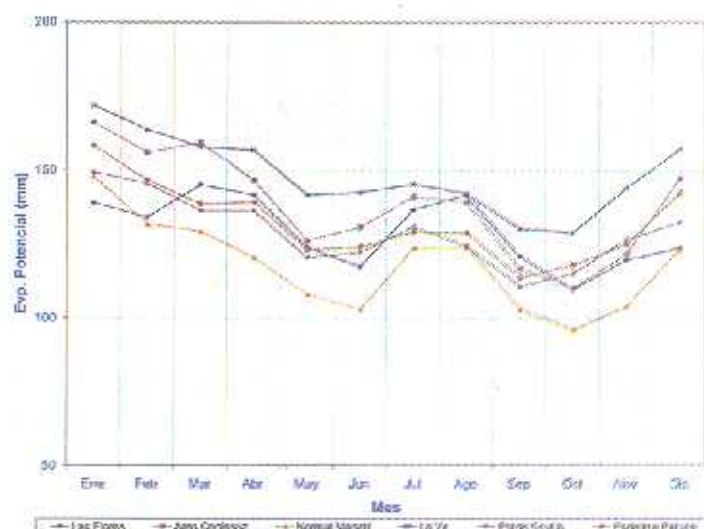
el cual tiene base física adecuada para las condiciones climatológicas de la zona de estudio, basado en radiación solar y temperatura. Para aplicar el método de Turc se cuenta con información de estas variables en series históricas de buena longitud para seis estaciones climáticas distribuidas en la zona. El modelo es el siguiente:

$$EVP = K \left(\frac{T}{T + 15} \right) (R_g + 50) \quad (3)$$

EVP es la Evaporación Potencial en (mm/mes) para una Humedad Relativa media mensual superior al 50 % (condición que se cumple en la zona todo el año), K es una constante igual a 0.40 para meses de 30 ó 31 días y 0.37 para febrero, T es la Temperatura media mensual en (°C) y R_g es la Radiación Solar Global Incidente del mes considerado (ca/cm²/día). En la Figura 3 se presenta el ciclo anual de las series de radiación solar y evaporación potencial de las series calculadas para las seis estaciones climáticas con información disponible.



(a)



(b)

FIGURA 3.

(a) Ciclo Anual de Radiación Solar Global y
 (b) Evaporación potencial calculada por el método de Turc Modificado,
 para las estaciones climáticas distribuidas en la zona de estudio.

En el modelo de balance hídrico se asume que la tasa de evaporación en los cuerpos de agua es igual a la potencial. La evapotranspiración real en el suelo se determina considerando el almacenamiento de agua en el suelo mediante un modelo simple de tanques en el cual se considera que el agua que sale del tanque es proporcional a la tasa de evaporación potencial de acuerdo a una función no lineal potencial del cociente entre la humedad disponible y la máxima capacidad de almacenamiento en el suelo. El exponente tiene un valor entre 0.5 y 1.0. Se adoptó el valor de 0.5 avalado en experiencias previas de modelación en la zona (Universidad Nacional, 2002).

Aportes Fluviales. Son los flujos provenientes del Río Magdalena a través de los caños que alimentan algunas ciénagas del complejo de Pajaral y la isla de Salamanca, y los Ríos que drenan la vertiente occidental de la SNSM (Aracataca, Fundación, Frío, Sevilla) descargando directamente en la CGSM. Para evaluar el ingreso de agua desde el Río Magdalena, se utilizan los nivel diarios

registrados en la estación hidrométrica de Calamar (Ver Figura 1 (b)). Los niveles históricos registrados en esta estación se pueden trasladar a la localización de la sección de entrada de cada uno de los caños que ingresan agua hacia el complejo lagunar, mediante curvas de calibración construidas con base en un estudio de perfiles de flujo elaborado en el tramo del Río Magdalena comprendido entre Calamar y la desembocadura en Bocas de Ceniza (Cogollo, 1993). Este estudio fue validado para el período 1992 – 2000 con base en una serie altimétrica de radar registrada por el satélite TOPEX POSEIDÓN en un tramo del Río Magdalena próximo a las coordenadas geográficas (10.85N, 74.729W) y (10.90N, 74.711W).

En la Figura 4 se presenta la serie de niveles de la estación Calamar para este período, la serie altimétrica del TOPEX a la que se hizo referencia y una tercera serie construida para la localización aproximada referida con base en los perfiles de flujo.

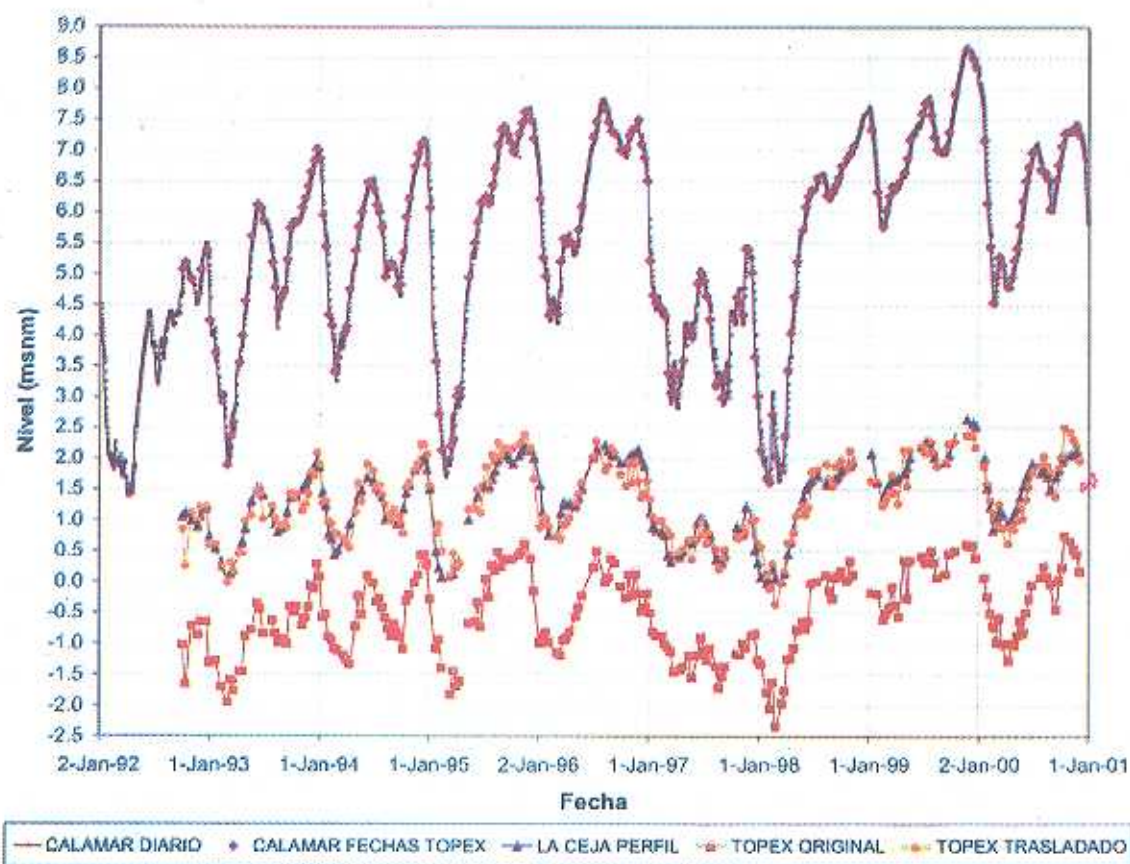


FIGURA 4. Comparación de la serie altimétrica obtenida por el satélite Topex Poseidon en el Río Magdalena cerca al caño La Ceja y una serie sintética construida para la misma localización con los registros de la estación Calamar y el estudio de perfiles de flujo de Prociénaga.

En la figura se puede observar que la serie original del TOPEX no está referenciada al mismo Datum vertical de los niveles en Calamar, puesto que su origen corresponde a un elipsoide de referencia. Por esta razón, la serie del Topex se desplazó una cantidad igual a la diferencia entre su valor medio y el de la serie construida con los perfiles de flujo. Se puede observar la semejanza entre ambas series, validando el estudio de perfiles de flujo en el tramo de interés.

En la Figura 5 se presenta la curva de calibración construida con los perfiles de flujo a la entrada del caño Renegado. Para todos los caños del complejo lagunar que están comunicados con el Río Magdalena se construyeron curvas de calibración como ésta, con el objeto de trasladar la serie de niveles registrada en Calamar al sitio de derivación de cada uno de éstos.

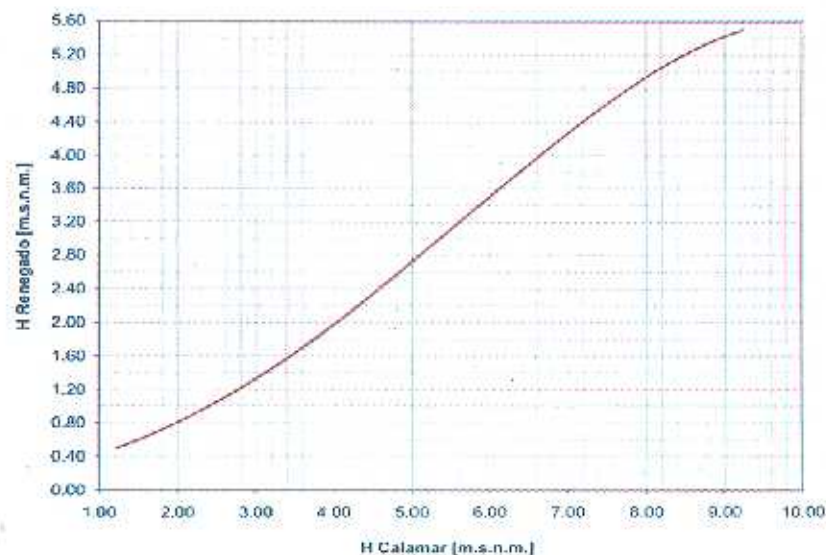


FIGURA 5. Curva de calibración de niveles de la entrada del caño Renegado respecto a Calamar.

El nivel en el punto de derivación del caño en el Río Magdalena, la longitud del caño hasta la ciénaga donde entregan sus aguas y el nivel simulado dinámicamente en éstas, permite determinar el gradiente hidráulico del caño. Este parámetro, en conjunto con otras variables hidráulicas, permite estimar el caudal derivado en cada intervalo de simulación. Los aportes de los ríos de la SNSM se obtienen directamente de datos históricos de caudal reportados en las estaciones limnigráficas cercanas a la desembocadura de estos ríos en la CGSM. Las áreas de las cuencas de drenaje de estos ríos que están localizadas aguas abajo de las estaciones se incluyen en el balance como parte de la subcuenca de drenaje de la CGSM.

Intercambio entre ciénagas a través de caños. Los caudales transportados por los caños de interconexión en un período de tiempo, se estiman con una ecuación de flujo simple que tenga validez en el intervalo de cálculo. El desnivel entre los cuerpos interconectados determina la pendiente hidráulica y el sentido del flujo. La configuración granulométrica de los sedimentos y las formas del lecho, los cambios de alineamiento y de sección y la vegetación en las márgenes determinan la resistencia al flujo representada por un parámetro de rugosidad que da cuenta de todos estos efectos. La profundidad, ancho de la base y los taludes laterales determinan la capacidad hidráulica. Se asume que el gradiente de energía es constante en toda la longitud del caño y que la velocidad del flujo es proporcional a éste de acuerdo a una expresión de flujo uniforme como la ecuación de Chezy, que está implícita en el último término de la ecuación de balance hidrológico.

Intercambio de agua con el mar Caribe. En el modelo de balance hidrológico, se asume que el nivel del mar es una condición de frontera externa, impuesta por las condiciones de la marea en el exterior de la conexión hidráulica entre la CGSM y el mar Caribe en la Boca de La Barra. La marea es una onda larga que modifica el nivel del mar de forma cíclica por la acción gravitatoria entre diferentes cuerpos celestes (componente astronómica), y se superpone a una componente debida a efectos atmosféricos de ondas de presión con frecuencias similares. Las características de la marea en un punto de la Tierra dependen sólo de su posición geográfica y de efectos locales de la batimetría. La onda de marea se puede representar por una función matemática que describe su comportamiento como una

superposición de armónicos de distinta frecuencia, amplitud y fase. Para obtener esta función matemática, se utilizaron 9 series horarias de niveles en la Boca de la Barra, de 48 horas consecutivas de medición, distribuidas a lo largo de un año completo, permitiendo tener representatividad muestral en cuanto al ciclo anual del sol y la luna, principales cuerpos que gobiernan este fenómeno. El procedimiento consiste en correlacionar las mediciones puntuales de corta duración en la zona de estudio, con una serie histórica horaria de un año completo en la estación mareográfica de Cartagena.

En la caracterización de la marea desde una perspectiva astronómica, se espera que ambas señales tengan componentes astronómicas armónicas similares, por la cercanía entre ambas localizaciones, suposición cuya validez se verificó correlacionando ambas fuentes de datos. La descomposición de la señal de marea en sus armónicos astronómicos constitutivos se hizo utilizando el método de satélites artificiales que simulan los efectos astronómicos del Sol y la Luna (Shureman, 1958). Para detectar las frecuencias de estos armónicos en la señal mareográfica de Cartagena se utilizó la Transformada discreta de Fourier (Ver Cardona y Fernández 2001), identificando trece armónicos para la señal de marea en Cartagena. Con los armónicos identificados en Cartagena, se hizo un ajuste mínimo cuadrático respecto a las mediciones de las nueve campañas de medición en La Boca de la Barra, adoptando los armónicos identificados en la señal analizada de un año completo en Cartagena. Finalmente, se ajustan las amplitudes a los valores medidas en La Boca de La Barra durante las campañas de corta duración. La función que caracteriza la marea a la salida de la Boca de la Barra se puede describir por una función matemática de la forma:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{13} A_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \phi_i) \quad (4)$$

$h(t)$ es el nivel de marea en el tiempo t (Calendario Juliano), A_i es la amplitud en (m) asociada a cada frecuencia ω_i (grados/hora) y ϕ_i (grados) es la fase asociada a la frecuencia ω_i . En la Tabla 1 se presenta la nomenclatura de los 13 armónicos identificados en la señal de marea de Cartagena en el sistema internacional y en el propuesto por Shureman (1958), y los valores ajustados para las amplitudes y fases asociados a los armónicos principales para caracterizar la marea en La Boca de La Barra.

Nomenclatura Internacional	Nomenclatura Shureman	Amplitud A(m)	Frecuencia ω (°/hora)	Fase Φ (°)
Nnn	B8	0,03944	0,04107	-117,886
Nnn	B9	0,05310	0,14427	-57,187
Nnn	A4	0,05136	0,47152	46,598
Mm	A2	0,05978	0,54437	-60,427
Nnn	A11	0,01985	0,62651	-124,534
MSf	A5	0,06857	1,01590	-13,395
O1	A14	0,03223	13,9430	163,448
P1	B14	0,03325	14,9589	-176,621
K1	B22	0,05275	15,0411	171,840
N2	A40	0,02187	28,4397	-34,002
M2	A39	0,01053	28,9841	-6,238
Nnn	A54	0,00995	29,0662	123,256
S2	B39	0,00708	30,0000	-99,697

TABLA 1.
Parámetros de la función de Ajuste a la onda de marea en La Barra.

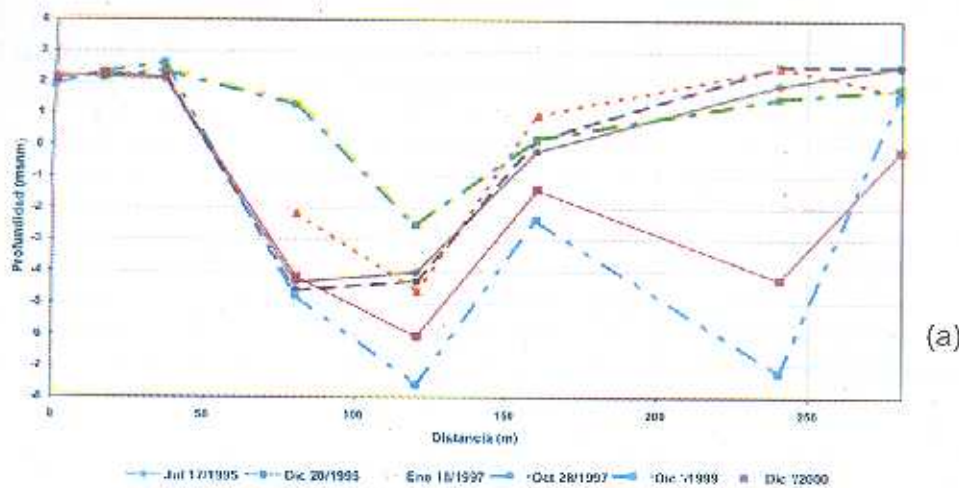
Los cambios morfodinámicos en la Boca de la Barra se estudiaron recurriendo al análisis de levantamientos topobatómicos multitemporales. El levantamiento de secciones transversales a la costa, en un tramo que incluye La Boca de La Barra, se realizaron en varias fechas en el período transcurrido entre julio de 1995 y diciembre de 2000. En los levantamientos se evidencian importantes cambios morfológicos en la sección transversal como resultado de la magnitud de los flujos de intercambio en el período antecedente, los cuales están relacionados con el régimen hidrológico predominante en la cuenca de drenaje del complejo lagunar. La intensidad hidrológica local a escala estacional está determinada en buena medida por las alteraciones climáticas inducidas como consecuencia del fenómeno ENSO, y por esta razón, en el análisis se enfatizó en los dos levantamientos que representan condiciones más extremas del ENSO: El Niño 1997-1998 (octubre de 1997) y La Niña 1999-2000 (diciembre de 1999).

La diferencia en la morfología de la Boca entre estos dos levantamientos se estimó construyendo para cada uno de ellos modelos de elevación digital de la superficie del terreno (MDT). En la construcción de los MDT se georeferenciaron todos los puntos de las secciones levantadas en campo y se encontraron los parámetros de ajuste del modelo de semivariograma empírico de los datos para aplicar el algoritmo de interpolación espacial del modelo de Kriging definiendo celdas de 2.5 x 2.5 metros. Los dos mapas correspondientes a ambos MDT se restaron para visualizar los cambios ocurridos en cada

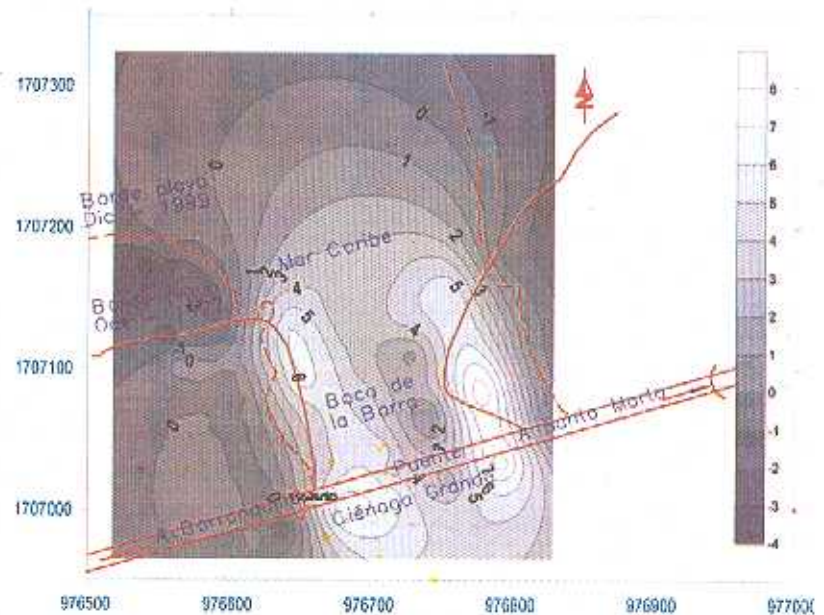
píxel entre las dos fechas. En la Figura 6 se presentan los perfiles transversales de la Boca en las diferentes fechas de los levantamientos y el mapa resultante de efectuar la resta de los MDT de las fechas mencionadas.

Este análisis permite tener una idea de la variabilidad de La Boca en respuesta a las condiciones climáticas, aspecto que fue considerado en el modelo hidrológico alterando la geometría de la sección de La Boca de acuerdo al comportamiento climático observado en el período de simulación. El intercambio de agua entre el mar y la CGSM se estima como en los otros caños, con el nivel del mar determinado por la función de marea y el nivel de la CGSM establecido en forma dinámica por el modelo. El sentido del flujo y el gradiente hidráulico en cada período están dados por los niveles relativos entre ambos sistemas.

Intercambio de agua con el subsuelo. El flujo subterráneo se ha despreciado en el modelo, al considerar que esta componente es irrelevante en los resultados del balance. Esta hipótesis se sustenta, evaluando el orden de magnitud de las caudales subterráneas estimadas con la ecuación de Darcy para flujo en medio saturado entre cuerpos de agua adyacentes con algún caño que las comunique entre sí, y se encontró que los caudales subterráneos calculados empíricamente son por lo menos dos órdenes de magnitud menores que los caudales superficiales que serían transferidos por el caño para el mismo gradiente hidráulico.



(a)



(b)

FIGURA 6.
 (a) Perfiles transversales levantados en distintas fechas en La Boca de La Barra.
 (b) Resta de MDI de oct de 1997 y dic de 1999 para mostrar cambios morfológicos en La Boca.

4.4. Calibración del Modelo

En la región no existen registros continuos de niveles en las ciénagas y caudales en los caños en forma simultánea para elaborar una calibración adecuada del modelo. Sin embargo, se tienen algunas campañas de medición de aforos en los principales caños del sistema (entre dos y cuatro campañas por año en el período 1993-1997). Esta es la fuente de información más adecuada que se tiene disponible para hacer un intento de calibración del modelo, o al menos para verificar que éste sea robusto en el sentido de reproducir los órdenes de magnitud en los flujos medidos entre las ciénagas, y algunos parámetros hidráulicos como la velocidad de flujo.

En el proceso de calibración se hicieron comparaciones para los nueve caños con mediciones más confiables. Para cada uno de estos caños, se hizo un análisis de sensibilidad de las velocidades y caudales obtenidos en el modelo, ajustando los resultados de las corridas, modificando de los factores de rugosidad al flujo y haciendo pequeñas variaciones en las profundidades de los caños, en función de la conveniencia de estas modificaciones sobre la respuesta esperada del modelo. El proceso se repitió en varias corridas hasta ajustar los parámetros a valores que se juzgaron aceptables. En la Figura 7 se presentan una comparación entre mediciones puntuales de caudal y velocidad en el caño Aguas Negras para varias campañas de medición, respecto a los valores simulados de estos parámetros con el modelo.

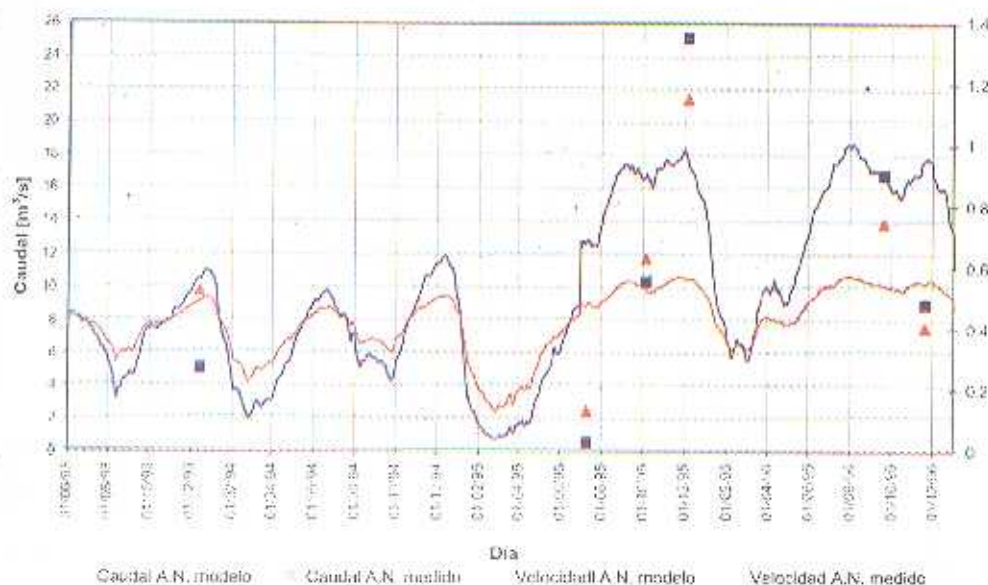


FIGURA 7.
Caudales y velocidades medidos en el caño Aguas Negras y simulados con el modelo

4.5. Resultados de simulación para la serie histórica en el período 1991 – 1995

El modelo se configuró con los datos de las series históricas para reconstruir la evolución hidrológica del complejo lagunar mediante simulación del balance hidrológico comenzando en 1971. Las simulaciones se hicieron por bloques de cinco años para efectos de tiempo

de cálculo y visualización de los resultados. En las corridas se garantiza la continuidad temporal de las simulaciones iniciando cada bloque con las condiciones finales del bloque anterior. En la Figura 8 se presentan las series de niveles y salinidades obtenidas en el período 1991 – 1995 para el conjunto de ciénagas del sector central del complejo, en contacto directo con la CGSM.

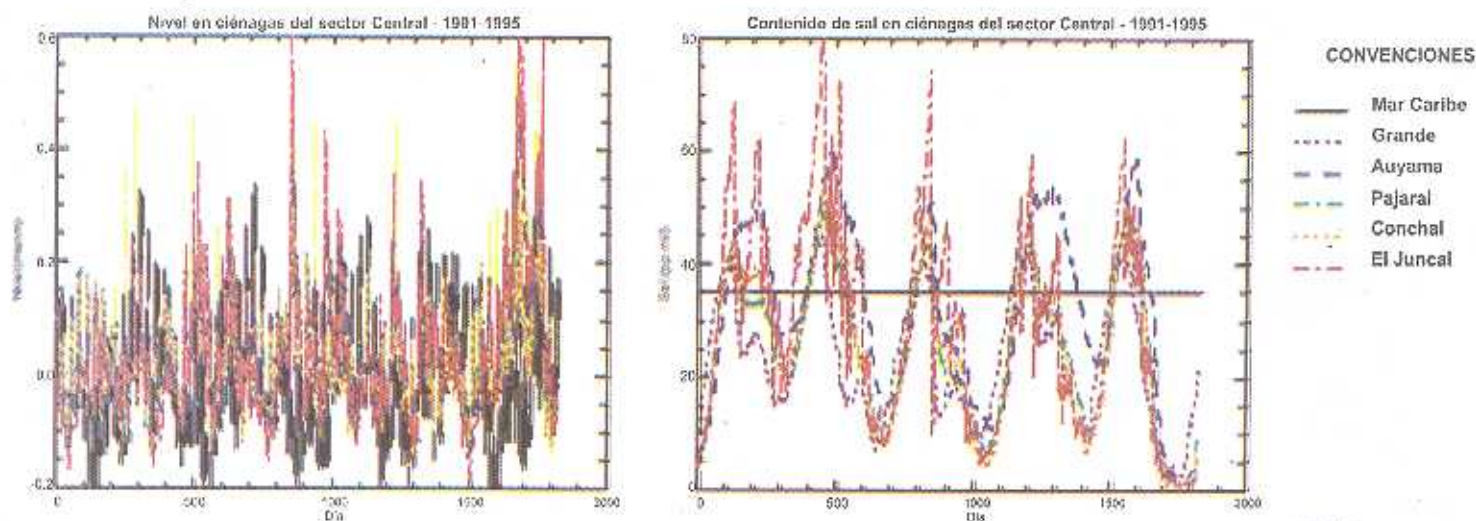


FIGURA 8.
Resultados de Niveles y salinidades obtenidos con el modelo, años 1991-1995



4.6. Resultados de simulación para dos escenarios de operación del sistema de compuertas hidráulicas instaladas en el complejo lagunar, período 1998-2000

El sistema de control hidráulico diseñado en el plan de recuperación comenzó a operar en el año 1998 y está compuesto de dos compuertas para cada uno de los caños Aguas Negras y Renegado. El modelo hidrológico permite observar la respuesta del modelo ante diferentes reglas

de operación del sistema hidráulico. En la Figura 9 se presentan series de niveles y salinidades obtenidas con el modelo para algunas ciénagas bajo dos escenarios supuestos de operación en el período 1998 - 2000. El primer escenario considera ambas compuertas abiertas 1 m entre febrero y abril y apertura máxima (2.5 m) los meses restantes. El segundo escenario contempla una compuerta abierta 2.5 m y una cerrada durante todo el período de simulación.

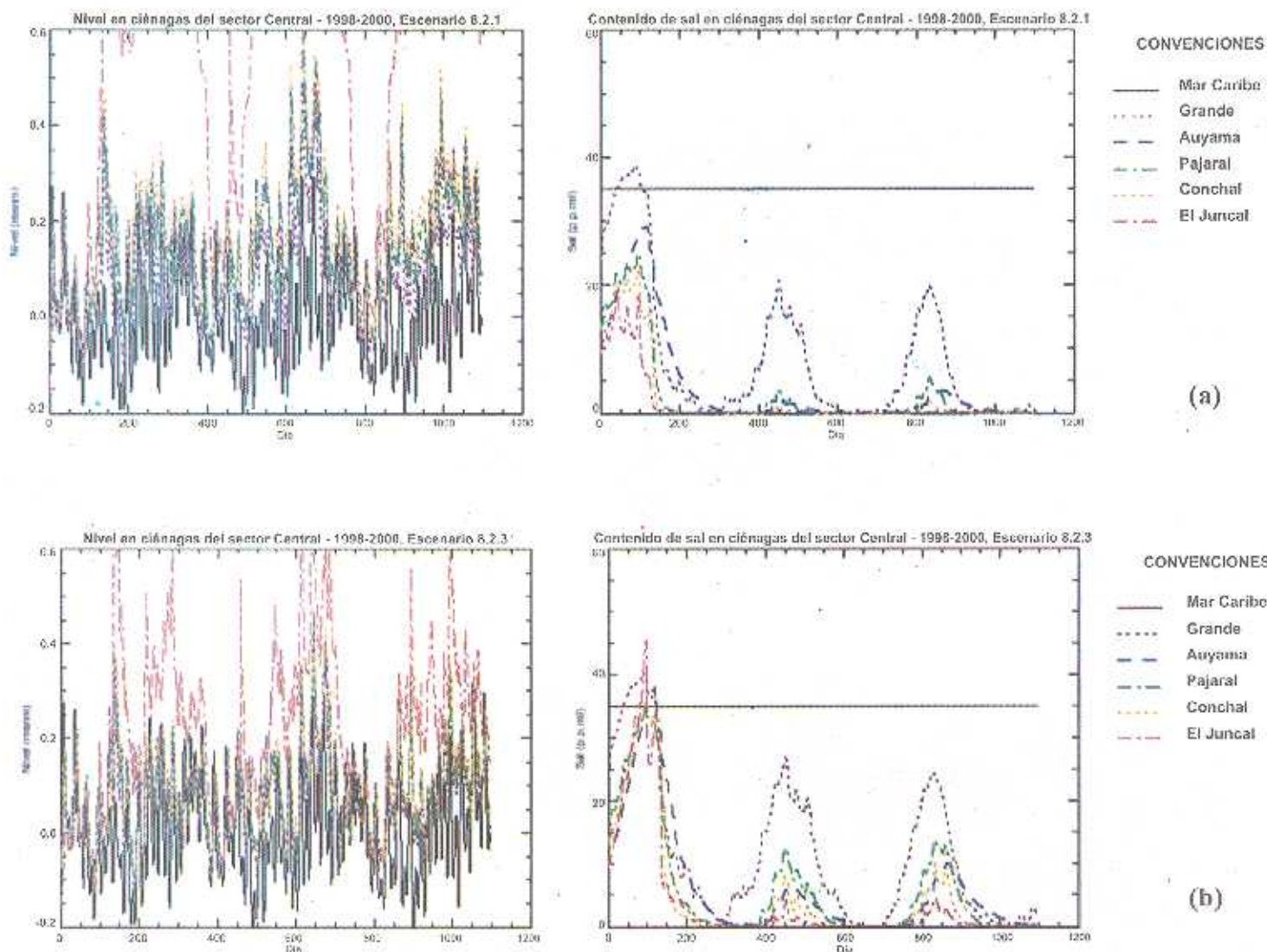


FIGURA 9. Niveles y salinidades obtenidos con el modelo en algunas ciénagas para dos escenarios de operación de compuertas, período 1998-2000. (a) Escenario 1. (b) Escenario 2.

4.7. Validación del Modelo

Para la validación del modelo se utilizaron algunos registros de salinidad medidos en algunos puntos de la CGSM en los periodos Feb/1987 - Ene/1988, Mar/1993 - Dic/1993 y Ene/1999 - Dic/2000. Esta variable es robusta y presenta ventajas para evaluar la validez del modelo, puesto que las sales son sustancias conservativas

en el agua. Por otro lado, la salinidad del mar presenta pocas fluctuaciones en el tiempo, siendo útil como valor de referencia. En el proceso de validación se comparan los valores de salinidad medidos en estos puntos y simulados en promedio para la CGSM en los tres periodos de tiempo. En la Figura 10 se presentan las series de salinidad promedio mensual para el primer y tercer periodos.

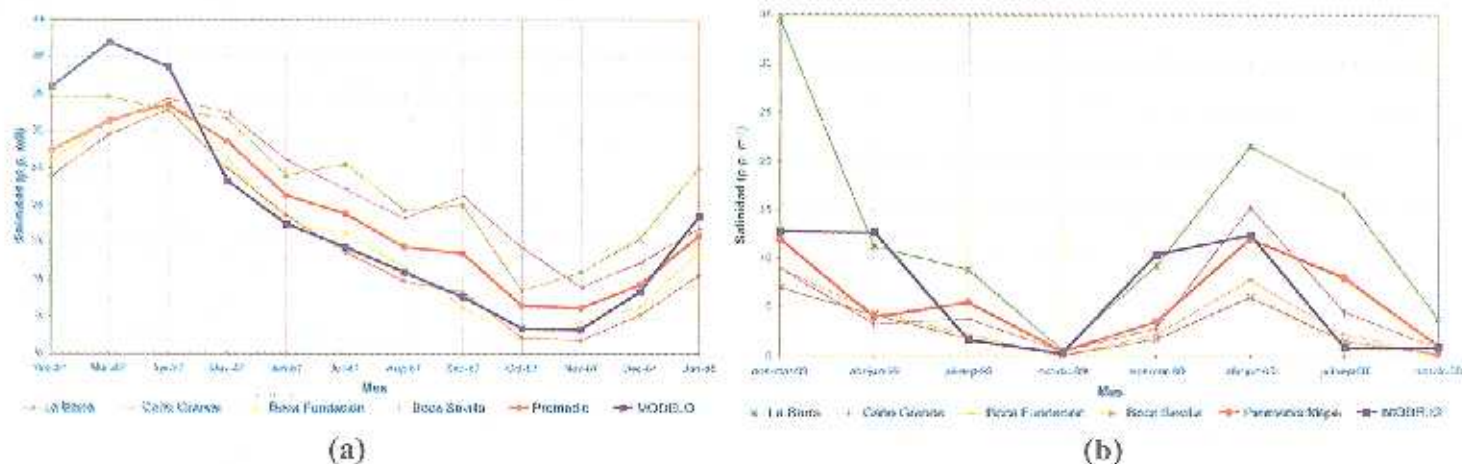


FIGURA 10. Salinidades mensuales medidas en varios puntos de la CGSM y valores medios obtenidos con el modelo.
(a) Feb/1987 - Ene/1988.
(b) Ene-mar/1999 - Oct-Dic/2000.

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

El modelo hidrológico presentado representa los procesos hidrológicos involucrados en un sistema tan complejo como el de CGSM de una forma bastante simple. Se muestra su utilidad para simular el comportamiento hidrológico del sistema en forma robusta, además de permitir formular escenarios de posibles actuaciones y estudiar la respuesta esperada en el sistema, así como otras aplicaciones como estudios de calidad de aguas y su utilización para proveer condiciones de frontera razonables a modelos hidrodinámicos de circulación más sofisticados.

Las limitaciones en cuanto a la información disponible, no permiten llevar a cabo procesos más exhaustivos de calibración y validación del modelo, que permitan establecer su precisión o confiabilidad. Sin embargo, se considera que los resultados obtenidos reflejan bastante bien las condiciones observadas en el sistema, reproduciendo los

órdenes de magnitud de las principales variables y mostrando que el modelo es robusto en este aspecto.

La simulación de los diferentes escenarios evidencia la importancia del ingreso de agua dulce por el sistema de caños sobre el comportamiento de la salinidad. Las simulaciones de la serie histórica muestran un ciclo anual muy marcado de esta variable en todas las ciénagas, reflejando la variabilidad de los aportes de agua dulce al sistema y permitiendo visualizar diferencias de esos aportes entre años, asociados a la variabilidad climática interanual.

Finalmente, los resultados del modelo ilustran su utilidad como herramienta de planificación del complejo lagunar de la CGSM.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Charon Birkett de NASA, por el aporte de las series altimétricas del TOPEX POSEIDÓN, al DIME (Dirección de

Investigaciones de la U. Nacional sede Medellín), y a las entidades CORPAMAG y CIOH por el suministro de valiosa información.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Barco O. J. y Cuartas A., 1998. Estimación de la Evaporación en Colombia. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Facultad de Minas. 136p.
- Cardona, Y. y Fernández J., 2001. Análisis de mareas por el método de la descomposición en armónicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 162p.
- Cogollo R., 1993. Plan de recuperación del complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Estimación del volumen promedio anual derivado del río Magdalena al complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta en condiciones naturales originales. Informe Técnico.
- CORPAMAG, 1993. Estudio de impacto ambiental del proyecto obras de rehabilitación de la ciénaga Grande de Santa Marta. Santa Marta, 1993.
- CORPAMAG-DNP-PROCIÉNAGA, 1993. Plan de recuperación del complejo lagunar de la ciénaga Grande de Santa Marta. Análisis de Alternativas. Santa Marta.
- Mejía J., 2002. Ciclo diurno de la lluvia y ambientes atmosféricos en Sistemas Convectivos de Meso Escala sobre Colombia y el Este del Océano Pacífico usando datos de la TRMM y del REANALISIS del NCEP/NCAR. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín.
- Mesa O., Poveda G. y Carvajal L., 1997. Introducción al Clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín. 390 p.
- Múnica J. et al., 2003. (En imprenta). Dinámica Hidrológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta mediante técnicas de sensores remotos. El mundo marino de Colombia: Investigación y Desarrollo de Territorios Olvidados. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Piñeiro, M. et al., 2002. Elementos para fortalecer la cooperación entre la GTZ y el BID en desarrollo rural y manejo de recursos naturales. Lecciones de tres estudios de caso. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington D. C. PP 15-23. www.iadb.org/sds/doc/CooperacionBID%2DGTZ.pdf.
- Poveda G., Vélez J., Mesa O. J. et al, 2002. Cuantificación Lineal y no Lineal de la Influencia De Fenómenos Macrocimáticos sobre el Ciclo Anual de la Hidrología Colombiana. Memorias en CD, XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Medellín, Colombia. 11p.
- Poveda G. y Mesa O. J., 1996. Las Fases Extremas del Fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su Influencia sobre la Hidrología de Colombia. Ingeniería Hidráulica en México. Vol XL. PP 21-37.
- PROCIÉNAGA, 1994. Estudio de Impacto Ambiental – Recaptura de Canales en el Delta Exterior Derecho del Río Magdalena. Santa Marta. Informe Técnico
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2002. Estudio hidrológico e hidráulico sobre las causas que originaron las inundaciones en el subsistema Pivijay - El Rodeo. Informe final. Medellín. 120p.