

Modelación Hidrodinámica De La Ciénaga Grande De Santa Marta

Primer paso para un Modelo Ecológico

La degradación ecológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta y sus zonas aledañas ha motivado la realización de estudios de diagnóstico y diseño por parte de varias entidades del estado y privadas. Uno de los esfuerzos recomendados por asesores internacionales era el de desarrollar un modelo ecológico que permitiera el manejo del cuerpo de agua y la prueba económica de alternativas de solución a los problemas ecológicos. La primera parte de un modelo de este tipo es a su vez un modelo que simule el movimiento del agua dentro de la ciénaga, es decir, un modelo hidrodinámico. La realización de éste fué encargada al Departamento de Ingeniería Civil, por parte de Colciencias.

Introducción

El presente artículo contiene una explicación general del modelo hidrodinámico que está siendo desarrollado por un grupo de profesores del Departamento de Ingeniería Civil como parte de una investigación financiada por Colciencias. En la primera parte se describen las causas ecológicas y los antecedentes que dieron origen a esta investigación, incluyendo los diagnósticos que fueron hechos por asesores extranjeros y por los profesores de la Universidad de los Andes que participaron en la preparación de la propuesta.

En la segunda parte del artículo se describen las diferentes partes que conforman el complejo de la Ciénaga Grande de Santa Marta, incluyendo un breve resumen de las características sociales y económicas que aumentan la complejidad del problema.

Adicionalmente se describen las características hidráulicas de las diferentes partes y su interacción hidrodinámica, las cuales deben ser reproducidas por el modelo hidrodinámico.



JUAN SALDARRIAGA. Ingeniero Civil, Uniandes. MSHE. University of Newcastle Upon Tyne, Inglaterra. Profesor de Ingeniería Civil, Uniandes. Areas de especialización: Hidráulica y Estructuras Hidráulicas.

La tercera parte se dedica a hacer una descripción completa del problema de la modelación de la Ciénaga. En ella se explica en forma cualitativa el tipo de modelo hidrodinámico utilizado, su funcionamiento, los datos de entrada necesarios y los resultados que pueden ser esperados. Igualmente se detallan las condiciones de frontera y los programas adicionales que tuvieron que ser desarrollados con el fin de estimarlas. Toda esta explicación se hace en forma sencilla y sin entrar en los detalles matemáticos del modelo; sin embargo, el lector puede omitir la lectura de esta parte sin perder la secuencia lógica del artículo.

En la cuarta y última parte se habla del futuro de la investigación. En ella se describe cómo el modelo hidrodinámico es la base para desarrollar un modelo ecológico completo que permita un manejo racional y planificado del cuerpo de agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta por parte del personal de biólogos del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín, INVEMAR, o por parte de cualquier otro instituto al que se le encargue el manejo de ese gran recurso.

Antecedentes De La Investigación

Desde hace aproximadamente 15 años la Ciénaga Grande de Santa Marta ha venido experimentando un deterioro ecológico que se ha acentuado los últimos años. Dicho deterioro se manifiesta principalmente por la muerte del manglar que se localiza en sus orillas y en la zona conocida

como el complejo de ciénagas de Pajaral. En la actualidad la superficie de mangle afectada es superior a las 40.000 hectáreas; alrededor de 6 especies diferentes de mangle se encuentran en proceso de desaparición o ya lo han hecho en algunos lugares de la zona. Aparentemente este proceso de deterioro es causado por la salinización de las ciénagas debido principalmente a que los aportes de agua dulce que periódicamente llegaban desde el Río Magdalena han sido reducidos y en algunos lugares eliminados por los colonos y terratenientes dueños de fincas en la orilla oriental del río.

El manglar se caracteriza por ser una especie que aporta una gran cantidad de nutrientes a las zonas donde crece y porque en sus raíces encuentran refugio una gran variedad de juveniles especies de crustáceos y peces. Por consiguiente, la muerte del manglar ha llevado a una disminución muy importante del recurso pesquero del cual viven alrededor de 50.000 personas asentadas alrededor de la Ciénaga Grande; cada día las condiciones de pobreza en la

zona están aumentando lo que ha llevado a los pescadores a tratar de optimizar sus métodos de pesca, cosa que ha acelerado el proceso de deterioro del recurso ya que dichos métodos son, en la gran mayoría de los casos, antitécnicos. En la actualidad se pescan peces cada vez de menor tamaño y en algunos casos antes de que alcancen su madurez sexual.

El problema de la Ciénaga Grande se volvió evidente cuando alcanzó la zona del parque natural Isla de Salamanca en donde era fácilmente visible desde la carretera que une a Barranquilla con Ciénaga; sin embargo, la zona afectada dentro del complejo de ciénagas de Pajaral y a orillas de la Ciénaga Grande es mucho mayor. Las notas de prensa y la preocupación estatal apareció cuando el problema había alcanzado magnitudes casi irreversibles. Una de las primeras entidades que dió aviso del problema y que encontró muy poco eco en un principio fué el Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín, INVEMAR. Este instituto empezó un monitoreo ecológico de la zona hace aproximadamente 6 años como parte de una investigación financiada por Colciencias; el objetivo era conocer la estructura y el comportamiento de la ciénaga. Para cumplir con este objetivo se decidió, entre otras cosas, hacer un inventario de las especies que habitan la Ciénaga, a la vez que se tomaban muestras con el fin de estimar el grado de contaminación de las aguas por coliformes y por químicos organoclorados y estudiar la salinización del cuerpo de agua.

Como parte de la investigación original INVEMAR-Colciencias contrataron la asesoría de un experto internacional en ecosistemas de lagunas costeras con el fin de empezar a plantear alternativas de solución a los problemas y plantear metodologías de manejo racional

del cuerpo de agua. El experto escogido fué el profesor Vladimir Koutitonsky de la Universidad de Quebec en Rimousky quien es un oceanógrafo especialista en modelación ecológica. El profesor Koutitonsky visitó la Ciénaga Grande de Santa Marta en 1986 y llegó a la conclusión de que era necesario desarrollar un modelo ecológico que permitiera probar en forma rápida y económica alternativas de solución al problema de la degradación ecológica.

Adicionalmente aclaró que los modelos numéricos de simulación eran muy costosos ya que requerían altos tiempos de CPU en computadores grandes y porque su tiempo de desarrollo y verificación sobre una zona de estudio como la de la Ciénaga Grande podría tomar 2 o 3 años; esto hacía que el desarrollo del modelo por fuera de Colombia no fuera factible. Propuso que se adelantara otro proyecto diferente cuyo objetivo único fuera desarrollar un modelo hidrodinámico de la ciénaga que luego sirviera de base a modelos ecológicos, de calidad de agua y de niveles tróficos. Una vez estuviera desarrollada la parte hidrodinámica del proyecto se podría continuar con el apoyo de la Universidad de Quebec. Para el desarrollo del modelo hidrodinámico sugirió alguna universidad colombiana con una Facultad de Ingeniería Civil que tuviera experiencia en modelación matemática de cuerpos de agua.

Teniendo en cuenta los resultados de esa visita Colciencias contactó a la Universidad de los Andes con el fin de que presentara una propuesta para la realización del modelo hidrodinámico. Dicha propuesta, la cual fué aprobada en forma inmediata, incluía un trabajo de campo extenso con el fin de recolectar información hidrodinámica que permitiera la calibración del modelo, el desarrollo del modelo hidrodinámico en sí y el desarrollo

de otros modelos que permitieran conocer las condiciones de frontera necesarias para el modelo principal. La investigación tomó un total de 26 meses y requirió de una financiación de \$36.000.000.00, muy por debajo de lo que hubiera costado el desarrollo del modelo en el exterior sin tener en cuenta que de todas maneras se hubieran necesitado los trabajos de campo.

Partes De La Ciénaga Grande. Características Hidráulicas

Las aguas que interactúan dinámicamente dentro de la Ciénaga Grande de Santa Marta provienen de muchas partes diferentes pero que pueden ser clasificadas en cinco grandes grupos o zonas: La Sierra Nevada de Santa Marta, la zona bananera en el pie de monte de la sierra, la zona de la Ciénaga Grande en sí, el complejo de Ciénagas de Pajaral y la zona de inundación del Río Magdalena al occidente de dicho complejo. El modelo hidrodinámico se relaciona sólo con la tercera de las zonas mencionadas; sin embargo, las otras conforman las condiciones de frontera del modelo. Por esta razón en este capítulo se describen, incluyendo algunos aspectos hidráulicos que las caracterizan.

Zona de la Sierra Nevada de Santa Marta

La zona occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta drena sus aguas hacia la Ciénaga Grande y constituye uno de los dos aportes de agua dulce que llega al cuerpo de agua de ésta. Esta zona se caracteriza por tener precipitaciones entre los 600 y los 1500mm. al año. El agua es movida a través de un sistema de ríos que llegan a la ciénaga por sus fronteras oriental y sur, pero que antes atraviesan la zona

bananera; los principales ríos son el Río Frío, el Sevilla, el Aracataca, el Orihueca, el Tucurín y el Fundación, los cuales aportan a la zona bananera un total de $60\text{m}^3/\text{seg}$ de agua dulce en promedio anual.

La zona de la Sierra Nevada de Santa Martha es la única de las zonas que interactúan dinámicamente alrededor de la Ciénaga Grande, que no tiene aportes hacia ella.

Zona Bananera

a) APORTES DE AGUA A LA ZONA

La zona bananera recibe los aportes provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta a través de los ríos mencionados. Estos caudales de agua, antes de llegar a la ciénaga, alimentan el acuífero el cual juega un papel muy importante dentro de la dinámica del problema y es el factor que permite un uso intensivo del suelo en dicha zona.

Adicionalmente, la zona bananera puede recibir agua desde la Ciénaga Grande durante las épocas de verano; esa agua es salada lo cual pone en peligro algunas de las zonas cultivadas más cercanas a la orilla. Este fenómeno se ha vuelto cada vez más complejo debido al alto uso de las aguas subterráneas con propósitos de riego.

b) SALIDAS DE AGUA DE LA ZONA

De la zona bananera salen aguas en dos formas diferentes: como evapotranspiración y como aportes hacia la Ciénaga Grande. La zona cultivada en la actualidad supera las 20.000 hectáreas y se caracteriza por tener un alto consumo de agua tanto superficial como subterránea; este consumo es muy grande en las épocas de verano durante las cuales se bombea una cantidad importante del agua contenida en el acuífero. La evapotranspiración es del orden de los 2250 mm. al año, mucho mayor que la precipitación que

cae en la zona (600 mm. por año).

Como se mencionó anteriormente, durante las épocas de invierno la zona bananera aporta agua a la ciénaga a través del acuífero. Adicionalmente, de dicha zona hay permanentemente aportes de agua dulce hacia la ciénaga a través de los ríos que bajan de la sierra.

Zona de la Ciénaga Grande de Santa Marta

La zona del cuerpo de agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta es el objetivo primordial de la modelación hidrodinámica; es preciso conocer en forma detallada el movimiento de aguas con el fin de determinar su efecto sobre la ecología de la zona. La ciénaga se caracteriza por tener una superficie de 45.000 hectáreas y una profundidad promedio de sólo 1.50 metros; es una de las lagunas costeras más grandes del mar Caribe.

a) APORTES DE AGUA A LA ZONA

Como se había mencionado con anterioridad a la ciénaga entran, en los períodos de invierno, aportes de agua dulce desde el acuífero de la zona bananera y durante todo el año aportes de agua dulce a través de los ríos que fluyen desde la sierra. Además de esos dos aportes, a la Ciénaga Grande llegan aguas desde el mar, desde el complejo de ciénagas de Pajalal y por la precipitación. La ciénaga actualmente se conecta con el mar a través de una única comunicación dejada después de la construcción de la carretera entre Barranquilla y Santa Marta; esta comunicación es la Boca de la Barra, la cual es un canal de 450 m. de longitud y 250 m. de ancho, con una profundidad promedio de 5.0 m. La interacción entre la ciénaga y el mar es compleja ya que depende de los niveles relativos entre ellos y del régimen de mareas.

Desde el complejo de ciénagas de Pajalal, dependiendo nuevamente de los niveles relativos entre las diferentes ciénagas, puede entrar agua hacia la Ciénaga Grande. En el pasado este aporte debía ser mucho mayor de lo que es en la actualidad, especialmente en las épocas de invierno; el agua aportada debía tener una salinidad muy baja debido a los grandes aportes del Río Magdalena. Hoy en día los aportes son bajos y por lo general el agua es muy salina debido a la alta evaporación que se registra en el complejo de Pajalal.

El último aporte de agua hacia la ciénaga es la precipitación. Esta no supera los 450 mm. al año y es mucho menor que la evaporación que ocurre en el cuerpo de agua.

b) SALIDAS DE AGUA DE LA ZONA

De la Zona de la Ciénaga Grande salen aguas hacia el mar y hacia el complejo de ciénagas de Pajalal dependiendo de los niveles relativos de esos cuerpos de agua. Adicionalmente se pierde una cantidad de agua apreciable debido a la evaporación. Dependiendo de las condiciones de marea, del viento y del nivel del agua en la ciénaga, puede existir una salida neta de agua hacia el mar. Esta salida es bastante significativa y se presenta dos veces al día ya que la marea es semidiurna; en las épocas de invierno la salida de agua es apreciable llegando a ampliar el canal de la Boca de la Barra. En los períodos de verano, los cuales coinciden con los vientos Alisios y por consiguiente con los mayores oleajes y transporte litoral de sedimentos, la salida del agua de la ciénaga hacia el mar puede ser tan baja que en algunas ocasiones el canal de la boca se ha cerrado.

Los aportes de agua hacia el complejo de ciénagas de Pajalal se realizan a través del canal de Caño Grande el cual tiene una longitud de 500 m. aproximadamente y un ancho que

fluctúa entre los 60 y los 100 m. La profundidad es del orden de los 9 m. Las dimensiones del canal indican que en el pasado los caudales típicos que circulaban por él eran mucho mayores a los registrados por los investigadores de la Universidad de los Andes. Como se mencionó anteriormente a través de este canal el agua puede moverse en los dos sentidos dependiendo de los niveles relativos entre la Ciénaga Grande y la de Pajalal; sin embargo, en la actualidad es más importante el flujo hacia Pajalal que en el otro sentido.

c) OTROS ASPECTOS IMPORTANTES EN LA HIDRODINAMICA DE LA CIENAGA GRANDE.

Los siguientes son los aspectos más importantes, aparte de los aportes y salidas de agua, que afectan el comportamiento hidrodinámico de la ciénaga y que deben ser tenidos en cuenta en cualquier tipo de modelación sobre el movimiento de las aguas:

MAREAS:

Las mareas generan corrientes importantes a todo lo largo de la ciénaga pero especialmente cerca a la Boca de la Barra. Las mareas y los aportes o salidas de agua que implican son los principales responsables de las variaciones de niveles dentro de la Ciénaga Grande.

VIENTOS:

Los vientos constituyen el factor más importante de la dinámica de las aguas en la ciénaga. Son el principal generador de las corrientes secundarias que ocurren dentro del cuerpo de agua y en la parte sur de la ciénaga generan mareas de viento muy importantes. Por otro lado los vientos generan un oleaje muy importante el cual puede llegar a tener hasta 60 cm. de amplitud; este oleaje en una profundidad promedio de 1.5 m. garantiza una mezcla total de la columna de agua razón por la cual en la mayor parte de la ciénaga no se detectan corrientes

de densidad o corrientes térmicas.

CORRIENTES DE DENSIDAD:

Generadas por la mezcla del agua dulce proveniente de los ríos de la sierra y el agua salada del mar. Estas corrientes son importantes en las zonas cercanas a la Boca de la Barra pero son despreciables en el resto de la ciénaga, razón por la cual no son tenidas en cuenta en el modelo.

CORRIENTES TERMICAS:

Generadas por las diferencias de temperatura entre el agua de los ríos que bajan de la sierra (10 a 15 grados) y el agua en la ciénaga (27 a 30 grados). Nuevamente estas corrientes son importantes en las desembocaduras de los ríos, pero son irrelevantes en el resto de la zona.

Complejo de Ciénagas de Pajalal

El complejo de ciénagas de Pajalal está compuesto por una gran cantidad de ciénagas que se localizan al occidente de la Ciénaga Grande y que cubren un área superior a la de ésta (unas 75.000 hectáreas); las principales ciénagas del complejo son la Ciénaga de Pajalal, que es la única que tiene comunicación directa con la ciénaga Grande a través del Caño Grande, la Ciénaga de la Aguja, la Ciénaga de Media Luna y la Ciénaga de Alfandoque, las cuales se caracterizan por tener una profundidad bastante menor a la de la Ciénaga Grande. La intercomunicación entre las diferentes ciénagas del complejo se hace a través de una complicada red de caños angostos, los cuales implican un alto tiempo de retención de las aguas que llegan a él.

a) APORTES DE AGUA AL COMPLEJO DE PAJARAL

Los aportes de agua a esta zona son aquellos producidos por la Ciénaga Grande, los cuales fueron

descritos en el numeral anterior, los aportes de precipitación y los aportes de la zona inundable del Río Magdalena. La precipitación en la zona es muy baja y su efecto sobre el balance de aguas en el complejo es despreciable. Esta es la zona menos lluviosa del área del proyecto; la cantidad de agua aportada por este aspecto es bastante menor que la evaporada.

Los aportes de agua desde la zona inundable del Río Magdalena eran muy importantes en épocas de invierno; estos se hacían a través de una red de caños que partían del río y que llegaban a las ciénagas situadas más al occidente. Una vez que las aguas alcanzaban el complejo eran retenidas produciéndose dos fenómenos: las aguas se dulcificaban generando el ciclo agua dulce-agua salada que requieren los mangles para sobrevivir; esa dulcificación era tan importante que inclusive llegaba a dulcificar la parte suroccidental y occidental de la Ciénaga Grande. El segundo fenómeno era aquel por el cual los niveles en el complejo permanecían muy altos durante un largo período, debido a lo angosto de los caños de intercomunicación entre las diferentes ciénagas; durante estos períodos los playones en que crecía el mangle eran inundados y la sal que se depositaba en ellos era lavada permitiendo el nacimiento de nuevas plantas y la fortificación de las existentes.

El movimiento de aguas individual más afectado en la actualidad es el de los aportes del río a la zona de Pajalal. La acción de colonos y terratenientes ha cortado la intercomunicación entre los caños que nacen en el río y que llegan a las ciénagas. Esto ha ocasionado que la salinidad en el complejo sea varias veces superior a la salinidad media del mar y que las inundaciones periódicas de los playones hayan dejado de producirse; en estas condiciones es muy difícil que el mangle sobreviva.

b) SALIDAS DE AGUA DESDE EL COMPLEJO DE PAJARAL:

Las salidas de agua desde Pajara! se dividen en dos: Los aportes hacia la Ciénaga Grande y la evapotranspiración. Los aportes hacia la Ciénaga son cada vez menores debido a que al complejo no llega la misma cantidad de agua que en el pasado, especialmente en la época de invierno. Por lo general el nivel en Pajara! es menor que el nivel en la Ciénaga lo cual implica que en la gran mayoría del tiempo hay un aporte efectivo hacia el complejo. Cuando hay aporte hacia la Ciénaga, este se caracteriza por ser de agua con salinidades altas, en algunos casos superiores a las del mar.

La evapotranspiración en esta zona es muy alta y esto combinado con el hecho de que las Ciénagas son muy poco profundas agrava el problema de la salinización. En los playones donde antes existía mangle sano, hoy en día se encuentra una capa de sal solidificada de más de 5 cm. de espesor.

Zona Inundable del Río Magdalena

a) APORTES DE AGUA A LA ZONA

Los aportes de agua a la zona eran principalmente las aguas provenientes del Río Magdalena en épocas de crecientes. El río se desbordaba y el agua inundaba su zona oriental; la única manera que tenía el agua para fluir era hacia el complejo de Pajara! a través de una serie de caños, algunos de los cuales eran muy importantes. Las inundaciones periódicas eran vistas como un problema por los terratenientes y colonos que se veían en la necesidad de trasladar su ganado hacia otras zonas. Por esta razón empezaron a cerrar los caños e impedir el movimiento natural de las aguas; esta acción probó ser altamente perjudicial para ellos mismos ya que hoy en

día las tierras se están salinizando. El problema fué aumentado por la construcción de la carretera Palermo-Sitio Nuevo paralela al río en su orilla oriental, la cual cerró una gran cantidad de vías de agua.

b) SALIDAS DE AGUA DESDE LA ZONA INUNDABLE

Tal como se mencionó anteriormente toda el agua que llegaba a la zona de inundación del Río Magdalena era drenada hacia el complejo de Ciénagas de Pajara!. Hoy en día ese movimiento está interrumpido casi completamente.

Modelo Hidrodinámico De La Ciénaga Grande De Santa Marta

Con el fin de modelar el movimiento de las aguas dentro de la Ciénaga Grande de Santa Marta se desarrolló un modelo hidrodinámico y varios modelos que permiten calcular las condiciones de frontera que aquel requiere en cada momento de los cálculos computacionales. Las fronteras importantes dentro de la modelación hidrodinámica de la Ciénaga son: Las mareas en la Boca de la Barra, la frontera física, los caudales de agua dulce de los ríos de la Sierra Nevada, las lluvias, el viento, la evapotranspiración, el nivel del agua en la Ciénaga del Pajara! y la batimetría de la zona. De todas estas condiciones de frontera solo dos permanecen constantes: Las fronteras físicas y la batimetría.

Las fronteras físicas se obtuvieron actualizando, mediante fotografías aéreas e imágenes de satélite, la cartografía existente en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. La batimetría fué realizada con la ayuda de la Armada Nacional, entidad que puso a disposición de la Universidad de los Andes sus equipos de sondeo y

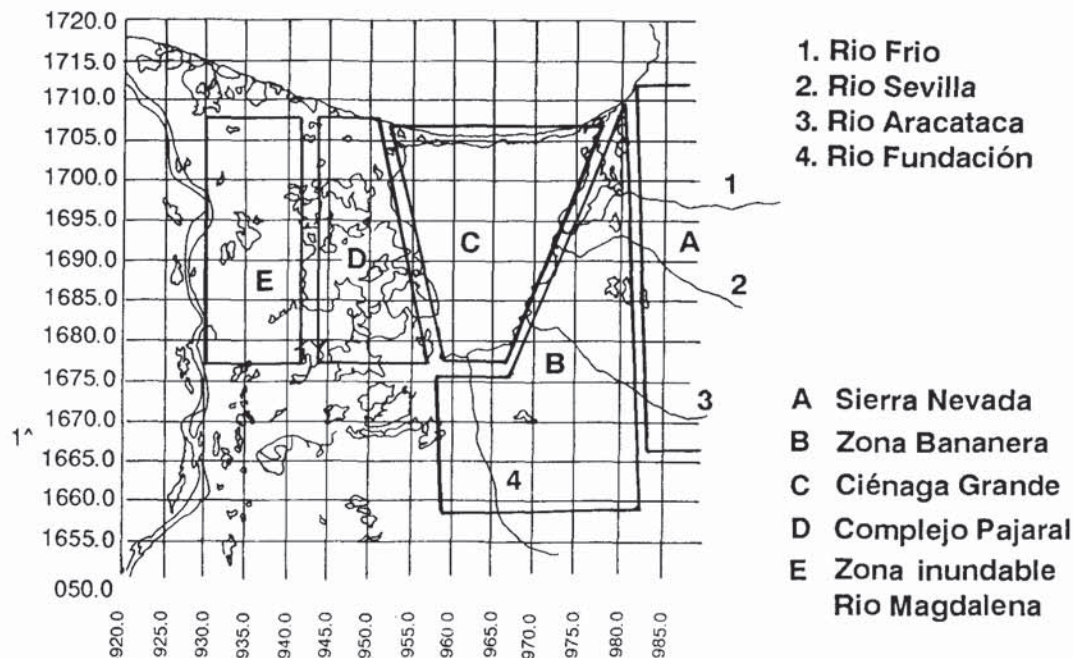
posicionamiento geodésico. El resto de las condiciones de frontera tuvo que ser modelado a través de programas independientes; a continuación se hace una breve descripción cualitativa de cada uno de los modelos.

Modelo Hidrodinámico de la Ciénaga Grande

El modelo desarrollado es un modelo bidimensional de diferencias finitas; las razones para adoptar este tipo de esquema son el tamaño de la Ciénaga y su poca profundidad lo cual garantiza una mezcla completa a lo largo de la vertical. Esto implica que es un modelo integrado en esa dirección. Está basado en un desarrollo para estuarios hecho por Jean J. Leenderseen.

El método matemático es un método multioperacional implícito y explícito para solucionar las ecuaciones de continuidad y de conservación de momentum lineal; implícito porque los cálculos superficiales en un punto de la red de diferencias finitas en un momento dado se basan en las condiciones de los puntos circunvecinos en el intervalo de tiempo inmediatamente anterior. La parte explícita se relaciona con los cálculos a lo largo de la vertical de los puntos de la red; éstos se basan en los datos superficiales del punto y de los puntos circunvecinos en el mismo tiempo.

Además de las condiciones de frontera ya mencionadas el modelo tiene que tener, en cada uno de los puntos que conforman la red, unas condiciones de velocidad y nivel del agua iniciales. Con el fin de iniciar la modelación el nivel de todos los puntos se supone igual al nivel medio del mar y la velocidad del agua igual a cero en toda la Ciénaga; se probó que el efecto de estas suposiciones solo se propagaba hasta el tiempo 3 días.



HIDRODINAMICA DE LA CIENAGA GRANDE

Las salidas del modelo son el nivel y la velocidad del agua en cada punto de la red para cada intervalo de tiempo. Con estos datos es fácil interpretar lo que puede suceder con un contaminante o con una variable de tipo biológico. El tamaño típico de la red es de 500mx500m y el intervalo de tiempo, el cual es función de dicho tamaño, es del orden de los 3 minutos. Lo anterior significa que el programa arroja datos de nivel y velocidad para unos 1700 puntos cada 3 minutos (tiempo prototipo). El tamaño de la red se puede aumentar o reducir a criterio del modelador; sin embargo, para redes del orden de 200mx200m o inferiores el modelo empieza a presentar problemas de convergencia.

El viento se da como un dato de entrada para cada punto de la red y para cada instante del

tiempo. Una de las mayores modificaciones al modelo original es que el viento se puede variar en el tiempo y en el espacio. Los datos de viento fueron tomados directamente en el campo, a lo largo de las campañas de medición hechas por los investigadores de la Universidad de los Andes.

Otras de las variaciones que se hizo al modelo es que éste puede manejar elementos asimétricos en la red, es decir, elementos en los cuales Δx es diferente a Δy . Esto es muy útil en las zonas en las cuales se requiere un detalle superior como en la Boca de la Barra o en la desembocadura de los ríos.

Modelo de Mareas

Una de las condiciones de frontera más importante para la hidrodinámica de la Ciénaga son

las mareas en la Boca de la Barra. Para conocer éstas se desarrolló un modelo que utiliza el método de los armónicos basado en registros de un mareógrafo en el sitio o en algún sitio cercano. En el caso de la Ciénaga el registro más confiable se encuentra en el puerto de Colón en Panamá; el modelo efectúa correcciones en tiempo y distancia sobre el registro.

El generador de mareas basado en el método armónico tiene como dato de entrada un registro horario durante el número de días que se desee modelar; el modelo tiene la opción de recibir registros mareográficos discontinuos con un máximo de 4 niveles por día y un mínimo de un nivel por día. Los datos de salida los constituyen niveles en la Boca de la Barra cada hora.

El método del armónico utiliza 3 componentes solares y 3 componentes lunares. Dichos componentes son los 3 elementos principales de las series de Fourier que simulan las variaciones de nivel generadas por esos dos cuerpos astronómicos.

Caudales de los Ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta

Para obtener los caudales que entran a la Ciénaga Grande de Santa Marta desde la Sierra Nevada se desarrolló un modelo hidrológico que utilizó como datos de entrada los registros hidrográficos de las estaciones que el HIMAT tiene en los ríos de la zona. Los registros cubrían el período 1967 a 1984, pero en algunos casos se encontraban incompletos; los datos se complementaron haciendo análisis de doble masa. La información así obtenida se desagregó a nivel de caudal para obtener caudales de entrada de cada uno de los ríos a la zona bananera.

Para obtener los caudales en las bocas de los ríos se hizo un balance hídrico para cada uno de ellos y su cuenca en la zona bananera. El balance incluía los caudales de entrada a nivel decadal, la precipitación y la evapotranspiración. Esta última es tan alta que en algunos casos en la época de verano resultaban caudales negativos en la ciénaga; como esto no era posible, se supuso caudal cero para esos períodos, que en general eran muy cortos.

Interacción con el complejo de Ciénagas de Pajarl

Con el fin de conocer las salidas y entradas del caudal desde la Ciénaga de Pajarl y desde otras ciénagas del complejo se tuvo que desarrollar otro modelo. Este consiste en un balance hídrico y está basado en un modelo

desarrollado por la firma Estudios y Asesorías S.A., para el INDERENA. Las ciénagas que interactúan dentro del modelo son la Ciénaga Grande, la del Pajarl, la de la Aguja, la de Media Luna y la de Alfandoque.

Dentro del programa se plantean ecuaciones de continuidad y conservación del momentum lineal para cada una de las bocas. Allí se plantean ecuaciones diferenciales para los niveles, los cuales se consideran constantes y de variación instantánea en cada una de las ciénagas. De esta forma se pueden calcular los intercambios de agua para períodos largos entre los diferentes cuerpos de agua. La salida del programa la constituyen los caudales netos por cada interconexión; sin embargo, para propósitos del modelo hidrodinámico es suficiente conocer los niveles relativos entre la Ciénaga Grande y Pajarl; esto se asimila a una condición de frontera tipo marea.

Una de las mejoras implementadas al modelo original de Estudios y Asesorías S.A. fue la de utilizar el método del gradiente para acelerar la convergencia de los cálculos. Este método es ampliamente utilizado en el diseño de redes de tuberías.

Sistema de Información Geográfico

Debido a la cantidad y complejidad de los datos de salida por el modelo hidrodinámico y al hecho de que estos van a ser utilizados por personal no técnico (Biólogos, Biólogos Marinos y Ecólogos) se decidió presentarlos en forma gráfica. Con este fin se desarrolló un sistema de información que contiene toda la geografía, la batimetría y la hidrografía de la zona de la Ciénaga Grande. El sistema puede dibujar mapas a cualquier escala y sobre éstos indicar las velocidades de agua y niveles en los tiempos

escogidos por el usuario. Así se puede tener en forma rápida y de muy fácil interpretación la hidrodinámica de la Ciénaga en períodos de interés.

Futuro de la Investigación

Teniendo en cuenta los resultados de la primera parte de la investigación se pueden plantear los siguientes pasos, los cuales muy probablemente serán financiados por Colciencias para ser desarrollados por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes en conjunto con INVEMAR y con la asesoría de la Universidad de Quebec.

- Modelación Hidrodinámica del Complejo de Pajarl: Se encontró que la dinámica de la Ciénaga está muy relacionada con la del Complejo de Pajarl. Por esta razón, antes de desarrollar el Modelo Ecológico, es necesario incluir dentro del modelo hidrodinámico el complejo de Pajarl.
- Modelación de Niveles Tróficos.
- Modelación del Ecosistema de la Ciénaga Grande: Este modelo debe incluir el movimiento de los nutrientes, del fitoplancton y del zooplancton y la interacción entre ellos.
- Modelo de Calidad de Aguas: Incluyendo la modelación de salinidades, de contaminantes biodegradables y no biodegradables, de oxígeno disuelto y en algunos casos de larvas, bacterias y otras variables biológicas.

Una vez terminada toda la modelación ecológica se tendrá una herramienta que permitirá manejar racionalmente la zona de la Ciénaga Grande y el Complejo de Pajarl. Esto permitiría el incremento en la pesca y la

acuacultura de ostras mejorando así la calidad de vida de la población que vive de ese gran recurso.

Equipo De Trabajo

El personal que llevó a cabo la investigación descrita en el presente artículo está compuesto por los profesores del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes,

adscrito al grupo de Recursos Hidráulicos. Adicionalmente se contó con la participación de varios alumnos de los programas de postgrado y pregrado del Departamento.

El equipo de trabajo estuvo compuesto por las siguientes personas: Juan Saldarriaga, Director de la Investigación, Jaime I. Ordoñez, Investigador principal; Mario Díaz Granados, experto en hidrología; Mauricio González,

Ingeniero residente del proyecto; Luis A. Camacho, Ingeniero residente del Modelo Hidrodinámico; Jorge A. Cortés, Ingeniero encargado del Sistema de Información Geográfico. Adicionalmente participaron los siguientes estudiantes: Martha Cardona, Mónica Reina, Marcela Cañón, Juan D. Díaz, Jair Morales, Isabel Tirado y Marcela Silva.

