

SEDIMENTACIÓN DEL EMBALSE DEL P.H. ANGOSTURA, ESTUDIOS Y EXPERIENCIAS

Oscar Jiménez Ramírez¹, Carlos Roberto Rodríguez Meza¹ y Nils R. Olsen²

(1) Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica , (2) Norwegian Institute of Technology
Tel. (506)2207631, Email: (1) ojimenezr@ice.go.cr, (2) nils.r.olsen@bygg.ntnu.no

RESUMEN

En este trabajo se describen los estudios sedimentológicos realizados durante el planeamiento, diseño y primeros años de operación de la planta hidroeléctrica Angostura, Costa Rica. Esta planta, en operación desde el 2001, se localiza en la cuenca media del río Reventazón, y tiene un embalse de $15 \times 10^6 \text{ m}^3$. El río hasta el sitio del proyecto drena una cuenca de 1463 km^2 con pendientes muy pronunciadas y altas precipitaciones que sobrepasan los 6000 mm en algunos sectores, razón por la que acarrea una cantidad muy importante de sedimentos, estimada en unos $3 \times 10^6 \text{ t/año}$. Desde las etapas iniciales de planeamiento del proyecto se realizó una cuantificación de los sedimentos que se espera lleguen a la planta. Con dicha información se planeó una estrategia para el manejo de los sedimentos durante la vida útil del proyecto, que incluyó la disposición de obras de control, y procedimientos de operación y monitoreo. Entre los aspectos importantes a considerar está el cálculo de la forma en que se depositarán los sedimentos a lo largo de los años de operación, lo cual es complicado debido a la incertidumbre en cuanto al ingreso real de sedimentos, muy variable año a año, y principalmente por la geometría del embalse, en el cual los flujos son tridimensionales. Para ello se utilizaron varios procedimientos para estimar la evolución del embalse, desde métodos empíricos hasta un modelo tridimensional.

ABSTRACT

This paper describes the sedimentological studies for the Angostura Power Plant, Costa Rica. The plant, in operation since 2001, is located in the middle basin of the Reventazon River, and has a reservoir of about $15 \times 10^6 \text{ m}^3$. The river up to the project site has a drainage area of 1463 km^2 , with large slopes and high precipitation, exceeding up to 6000 mm in several places, which causes a heavy sediment production. Since the initial planning studies, very detailed surveys were carried out to quantify the sediments entering the future reservoir. This information helped to design a strategy for handling and routing the sediments including several operational policies like de definition of suitable bottom outlets, definition of flushing procedures and appropriate monitoring of the reservoir.

One of the most important topics of these studies was the computation of the sediment deposition pattern along the reservoir, which has a very complex geometry, with three-dimensional flows. For this, several procedures were employed, from empirical methods down to a fully 3D hydrodynamic, which allowed computing the flow field and sedimentation patterns.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describen los estudios sedimentológicos realizados durante el planeamiento y diseño de la planta hidroeléctrica Angostura, así como los primeros resultados del seguimiento y control de la sedimentación. Esta planta, que inició su operación en octubre del 2000, aprovecha la cuenca media del río Reventazón, localizada en la vertiente atlántica de Costa Rica (ver Fig. 1).

Las aguas del río Reventazón son desviadas mediante una presa de enrocamiento de 38 m de altura. El caudal de diseño es $160 \text{ m}^3/\text{s}$, la caída neta es 124 m y la capacidad instalada es de 177 MW. La conducción en túnel tiene una longitud de 6.2 km hasta el tanque de oscilación, con un diámetro interno de 5.8 m en los tramos blindados y de 7.0 m en el tramo revestido con concreto reforzado. La tubería forzada tiene una longitud de 0.6 km, con diámetros internos de 6.4 y 6.2 m. Aguas arriba de esta planta se encuentran en operación las plantas Río Macho, y Cachí, y una nueva central, La Joya, actualmente está en construcción. Todas estas plantas tienen una capacidad de 450 MW y representan un 22% del Sistema Interconectado Nacional (ver Fig. 2).



Figura 1.-Localización de la cuenca del río Reventazón

El P.H. Angostura ha sido concebido como una planta de filo de agua con regulación diaria. Esto significa que se debe contar con un embalse que sea capaz de almacenar agua diariamente (durante la noche u horas de baja demanda), para operar a potencias altas en las horas de mayor demanda. Para lograr esta regulación, y poder lograr la potencia de la planta durante la época seca, es necesario contar con un embalse útil de al menos 2.5 millones de m^3 . El volumen total del embalse es de unos 17 millones de m^3 , de los cuales unos 11 millones corresponden al volumen útil, entre las cotas 570 y 577 msnm.

suspensión, en su paso por el proyecto, estimada en unos 3 millones de toneladas anuales. Si todos estos sedimentos se acumularan en el embalse, ocuparían un volumen aproximadamente igual a su tonelaje, y por lo tanto bastarían unos 6 años para que el éste se llenara completamente. En la realidad, solo parte de los sedimentos se depositan en el embalse, y se estima que inicialmente la cantidad depositada será de alrededor del 60% del total de los sedimentos que ingresan, e irá disminuyendo conforme el embalse acumula sedimentos. Esto implica que el proceso de llenado tomará más años, pero aun así, se ha estimado que si no se toman medidas preventivas, el embalse terminará perdiéndose antes de 20 años.

Por otra parte, aguas arriba de Angostura se encuentra la Planta Cachí (ver Fig. 2). A partir de 1973, el embalse de esta planta ha sido objeto de vaciados de limpieza (24 veces hasta 2002), lo que le ha permitido mantener su embalse, estimándose que a la fecha se ha perdido aproximadamente el 10% de su volumen original. El valor medio de los sedimentos descargados en cada ocasión se ha estimado en 615000 toneladas. Si este valor es representativo de todas las limpiezas, la descarga anual para el período de 29 años corresponde a 499000 toneladas. Esta cantidad ha sido incluida en la cifra dada anteriormente, de 3 millones de toneladas. Sin embargo, desde un punto de vista operativo, para la P.H. Angostura estas limpiezas tienen la dificultad de que se llevan a cabo en un período de pocos días en los que la descarga de sedimentos se concentra y es transportada hacia aguas abajo. En esas ocasiones, en la Est. Angostura se han medido concentraciones de sedimentos de hasta 300 000 ppm.

Las cifras anteriores evidencian el importante problema que la sedimentación puede significar para la operación de la planta, por lo que desde las etapas iniciales de planeamiento se iniciaron estudios para evaluar el impacto del problema, así como para determinar medidas para alargar la vida útil del embalse.

Los objetivos principales de este informe son: primero mostrar la aplicación práctica de diversos métodos para la estimación del acolmatamiento de un embalse; segundo, la definición de estructuras para manejo de los sedimentos; y tercero, la puesta en práctica de políticas de operación para disminuir el impacto de los sedimentos; finalmente se presentan los resultados iniciales de la operación de la central.

ARRASTRE DE SEDIMENTOS

Las fuentes de sedimentos que ingresarán al embalse del P.H. Angostura se pueden clasificar en tres tipos:

- a) *Sedimentos en suspensión.* Se trata de partículas con diámetros menores a 1 o 2 mm que la corriente arrastra en forma suspendida, y que provienen de la erosión de los suelos que forman la cuenca, así como de deslizamientos o movimientos en masa que la lluvia arrastra hasta los cauces.
- b) *Sedimentos en suspensión debido a limpiezas del embalse de Cachí.* Son partículas finas que tienen su origen en las vaciados anuales que se realizan en dicha planta, localizada unos 15 km aguas arriba del embalse de Angostura.

c) *Sedimentos gruesos o carga de fondo*. Se trata de partículas de 2 mm en adelante que son arrastrados por la corriente y que esencialmente se deslizan por el fondo del río. En avenidas grandes, ríos de fuerte pendiente como el Reventazón son capaces de arrastrar gravas y bolones decimétricos.

De estas tres fuentes de sedimentos la última constituye alrededor del 10% del total. Estos sedimentos gruesos necesariamente se van a depositar en el embalse, en su parte aguas arriba, y es poco lo que se puede hacer para evitar su deposición, excepto por el eventual uso de medios mecánicos de remoción.

De interés principal para efectos de este estudio son los sedimentos en suspensión del tipo a) y b). En cuanto a los sedimentos en suspensión del punto a), la Figura 4 muestra una estimación de la cantidad de sedimentos en suspensión histórica en el sitio de la estación Angostura, para el período 1967-2000, obtenida a partir de muestreos de sedimentos y su correlación con los caudales líquidos.

Se puede observar que mientras los caudales medios oscilan entre 74 y 158 m³/s, los arrastres en suspensión lo hacen entre 0.6 y 20 millones de toneladas. Este se debe a que el arrastre en suspensión es una función potencial del caudal, y en años muy húmedos, tales como el 69-70 y el 70-71, el arrastre resulta más de 5 veces mayor que en años promedios. De hecho, 1 o 2 avenidas extraordinarias, como las ocurridas en dichos años, son capaces de arrastrar en pocos días tantos sedimentos como los que ocurren en todo un año de escorrentía normal. Los caudales líquidos más frecuentes oscilan entre 50 y 130 m³/s (el caudal medio es 101 m³/s), y constituyen más del 67% de la escorrentía anual. Sin embargo, estos caudales prácticamente no aportan arrastre sólido, pues contribuyen con apenas un 25% del arrastre. De hecho, este arrastre empieza a ser significativo para caudales mayores a 100 m³/s. Los lavados de Cachí contribuyen en cerca de un 22% de los sedimentos en suspensión.

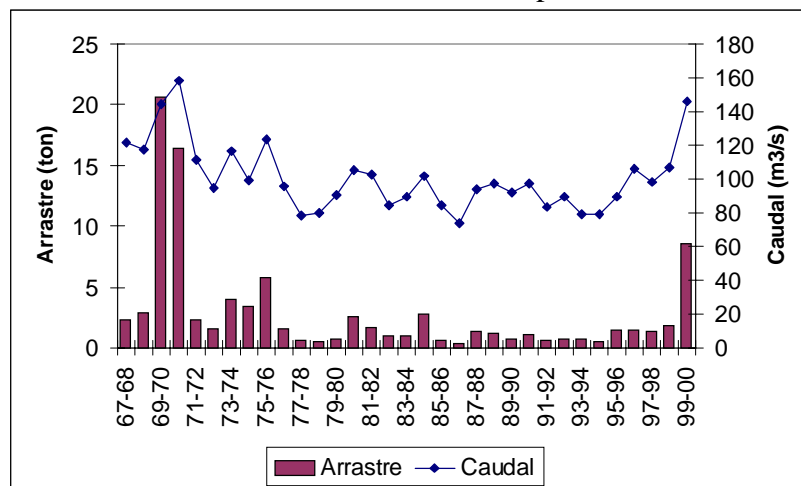


Figura 4.-Caudal Medio y Arrastre Anual de Sedimentos

Como se mencionó anteriormente, los vaciados de limpieza del embalse de Cachí contribuyen en casi 500,000 toneladas anualmente de sedimentos en suspensión. El embalse del P.H. Cachí tenía una capacidad original de 54 millones de m³ en el año de 1967, cuando entraron a operar sus primeras dos unidades. Durante los primeros años de operación se empezó a notar que el sedimento que ingresaba al embalse podría ocasionar inconvenientes en la operación de la planta, pues parte de estos sedimentos se acumulaban cerca de la toma de aguas e ingresaban

hacia las turbinas. En octubre de 1973 por primera vez se decidió vaciar el embalse utilizando la descarga de fondo. Esta operación fue muy exitosa, por lo que se ha continuado realizándola casi todos los años, durante la época lluviosa.

Hasta el año de 2002, el embalse se había vaciado en 24 ocasiones, lo que ha permitido descargar una gran parte de los sedimentos acumulados, y mantener el volumen del embalse, que se estima es actualmente en unos 48 millones de m³.

Durante estas operaciones de limpieza, se descarga una onda de sedimentos después del vaciado completo del embalse durante un lapso de 3 a 5 horas, cuando la concentración de sedimentos alcanza un pico del orden de los 300 000 - 400 000 ppm. Esta onda toma unos 220 minutos en llegar desde la presa de Cachí a la Estación Angostura. Sin embargo, a lo largo de este trecho el pico de sedimentos se amortigua, y la concentración disminuye a valores del orden de 150 000 ppm. Aún así, durante las primeras 12 horas luego de vaciado llegan a la Est. Angostura casi 300 000 toneladas. Después de este pico de sedimentos, el arrastre continúa de forma importante por 1 o 2 días, aunque con concentraciones menores de entre 15 000 y 25 000 ppm, ver Figura 5.

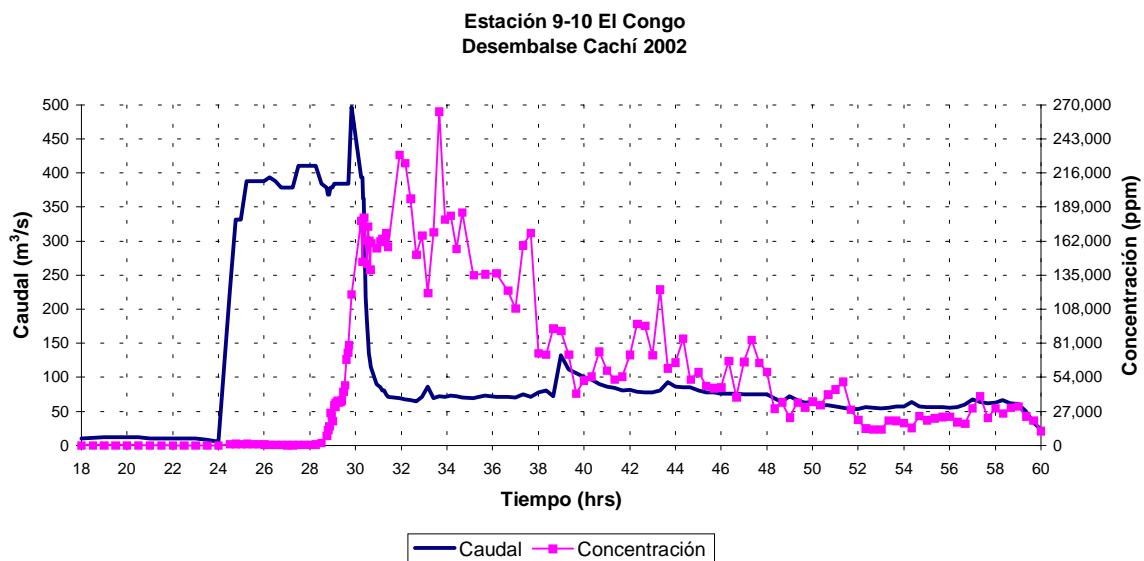


Figura 5.-Vaciado del Embalse de Cachí, 1992

SEDIMENTACIÓN DEL EMBALSE

La Figura 6 muestra una planta del embalse. Como se observa, una gran parte del embalse útil se encuentra en una zona plana aguas arriba, en donde de forma natural el río ha formado ramificaciones o trenzas. Esta zona se encuentra en su gran mayoría entre las cotas 570 y 577 msnm. A su vez, es la parte del embalse en la que el flujo disminuye su velocidad, y en donde con más certeza se depositarán los sedimentos que ingresen al embalse.

El cálculo de la forma en que se depositan los sedimentos a lo largo de los años de operación es bastante complicado, debido a la incertidumbre en cuanto al ingreso real de sedimentos, que como se expuso es muy variable año a año, y principalmente por la geometría del embalse, en el cual los flujos serán tridimensionales, y por lo tanto muy difíciles de modelar o calcular. A

pesar de lo anterior, se aplicaron 4 tipos de cálculos para estimar como evolucionará el embalse, mediante los siguientes métodos:

- Método semi-empíricos de Brune-USBR (Schwarz 1995)
- Método unidimensional HEC-6 del Corps of Engineers (Jiménez 1993)
- Método bidimensional RESP (Lovoll 1995)
- Método tridimensional SSIIM (Lovoll 1995, Olsen 1994)

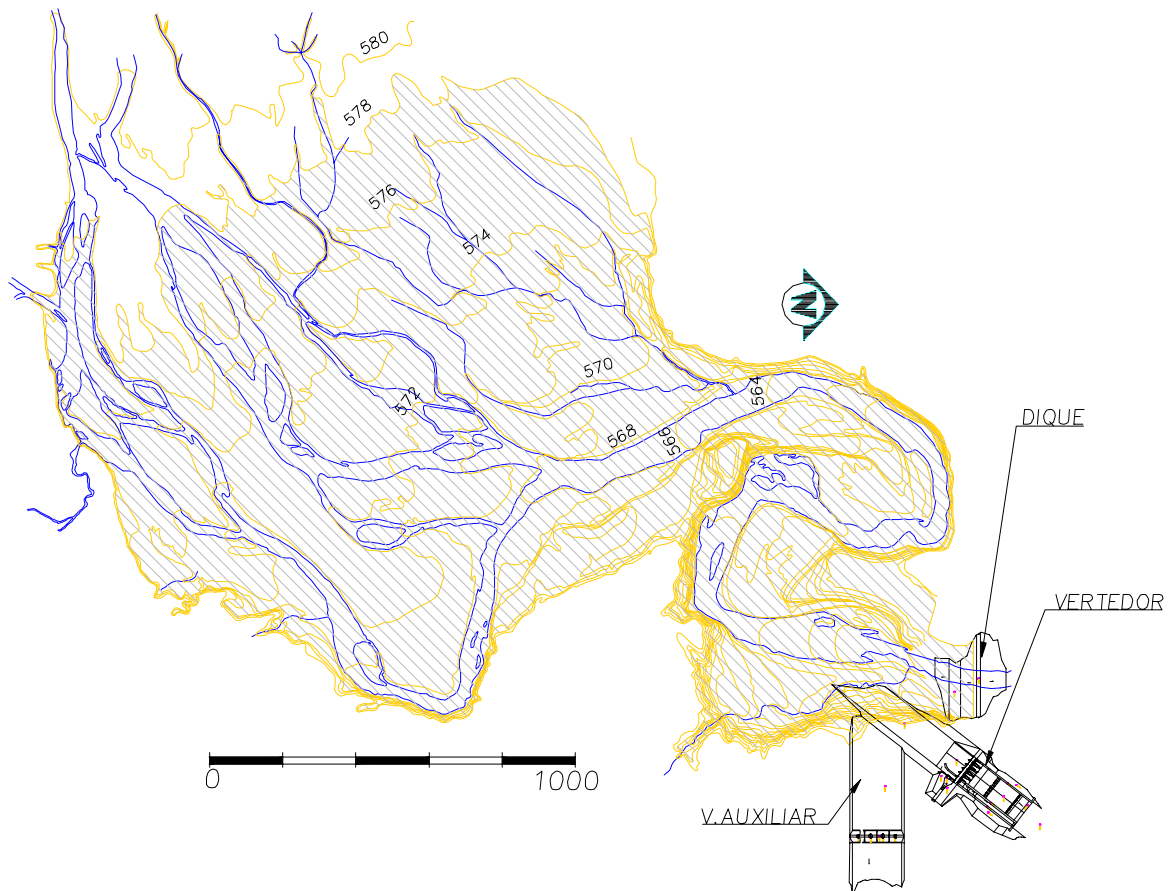


Figura 6.-Embalse del P.H. Angostura

De los procedimientos anteriores vale la pena destacar el modelo tridimensional SSIIM, desarrollado por Olsen (1994) del Instituto Tecnológico de Noruega. Este resuelve las ecuaciones de Navier Stokes en tres dimensiones sobre una malla estructurada, utilizando el modelo k-epsilon para representar las viscosidades turbulentas. La discretización de los términos convectivos se realiza mediante volúmenes de control junto con esquema de ley de potencia o “upwind” de segundo orden. El método SIMPLE se utiliza para la corrección de la presión. La solución es implícita. De este modelo se obtiene el campo de velocidades. Luego las velocidades se utilizan para resolver la ecuación de convección-difusión para cada una de las fracciones o tamaños de los sedimentos considerados. De esta forma se puede obtener la eficiencia de atrape y el patrón de deposición de los sedimentos.

Para el caso del embalse de Angostura se utilizó una malla de 54 x 9 x 11, para un total de 5000 celdas (ver Figura 7). Debido a la gran cantidad de cálculos requeridos en un modelo de este tipo, y al largo período de tiempo que se deseaba simular (30 o 40 años), se realizaron varias simplificaciones:

- Se mantuvo un ingreso constante de sedimentos año a año.
- El hidrograma de caudales y sedimentos se simplificó a un solo caudal de 350 m³/s, correspondiente a una avenida con período de retorno de un poco menos de 1 año, pero que representa de forma general el patrón de flujo en avenidas. La descarga de sedimentos correspondiente es de 1000 kg/s (1078 ppm).
- Se supuso un nivel constante del agua. El efecto de la operación del embalse o de las limpiezas anuales no se simula. El efecto de las mismas en la zona de aguas arriba del embalse se considera pequeño.
- No se simuló la erosión debido a los vaciados o cambios en el nivel.
- Densidad de los depósitos constante en el tiempo, con un valor de 1351.5 kg/m³.
- Granulometría constante a lo largo del tiempo y representada por tres tamaños: arenas (0.13 mm y 30%), limos (0.02 mm y 37%) y arcillas (0.002 mm y 27%).
- Incrementos de tiempo grandes, de 1.4 años. Esta es una simplificación importante, por lo cual se desarrolló una rutina de deposición acelerada que se comenta adelante.

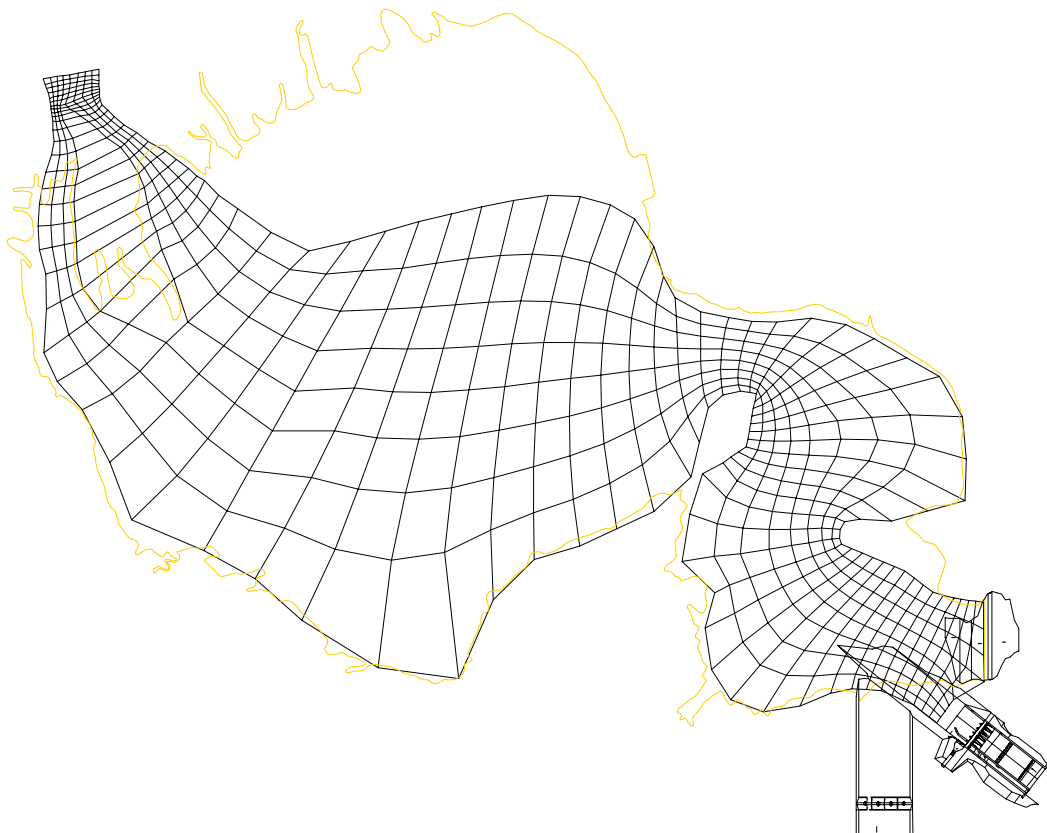


Figura 7.- Malla de Cálculo, modelo SSIM

La rutina de deposición acelerada escala la deposición de acuerdo a un volumen de deposición establecido para el incremento de tiempo utilizado. La rutina “escala” los cambios en el fondo por un factor entre 1000 y 1000 000 según el incremento de tiempo. Si este escalamiento llena

alguna parte del embalse a un nivel superior que el nivel máximo del agua o a un nivel máximo de especificado los sedimentos depositados son desplazados a las celdas vecinas. Este procedimiento no se aplica a las zonas en las que se presenta erosión.

La Figura 8 muestra los cambios en la eficiencia de atrape y el volumen efectivo remanente del embalse, mientras que la Figura 9 muestra el patrón de velocidades y reducción en el tamaño del embalse.

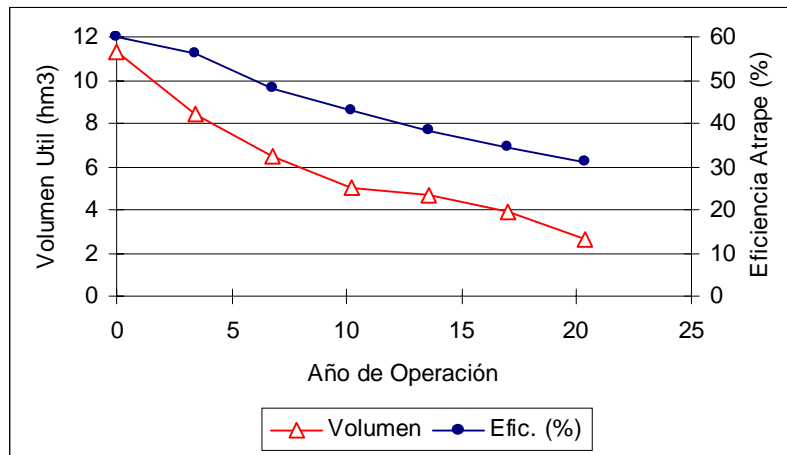


Figura 8.- Variación del volumen útil y eficiencia de atrape, modelo SSIIM

Con diferencias lógicas por las diferentes metodologías, estos cálculos indican que si no se realizan limpiezas en el embalse, ni se opera de forma especial, el volumen útil se perderá en un período de alrededor de 20 años. La Fig. 10 muestra, para los diferentes métodos utilizados, la variación del volumen útil, bajo la suposición de un arrastre anual de 1.5 millones de toneladas, valor que es apenas un 48% del promedio calculado para todo el registro, de 3.1 millones de toneladas, aunque similar al promedio que resulta de excluir los años 67 al 70, que son muy superiores al promedio.

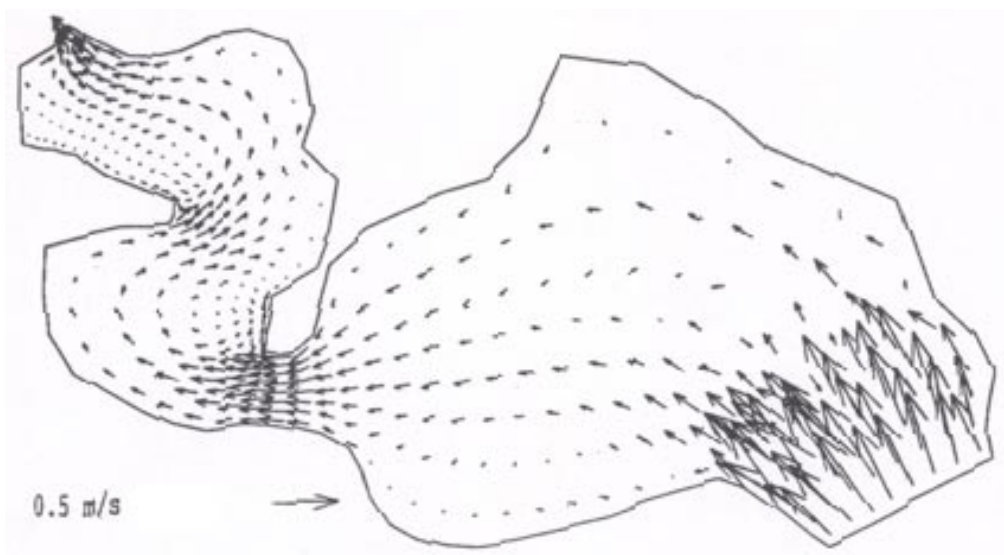


Figura 9a.- Velocidad superficial, modelación con SSIIM, Condición Inicial

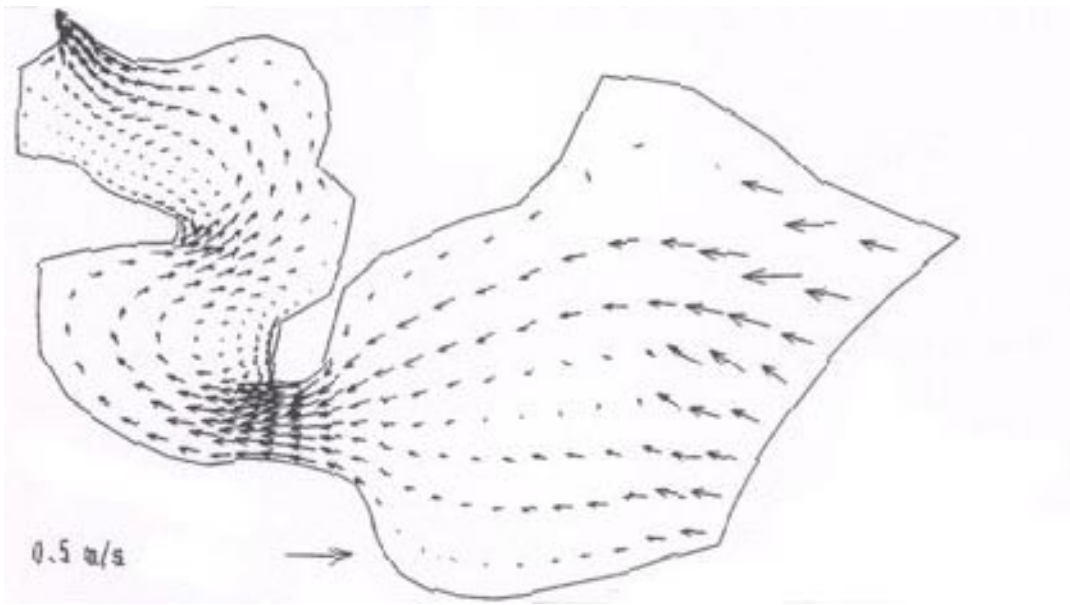


Figura 9b.- Velocidad superficial, modelación con SSIM, Condición luego de 3.4 años

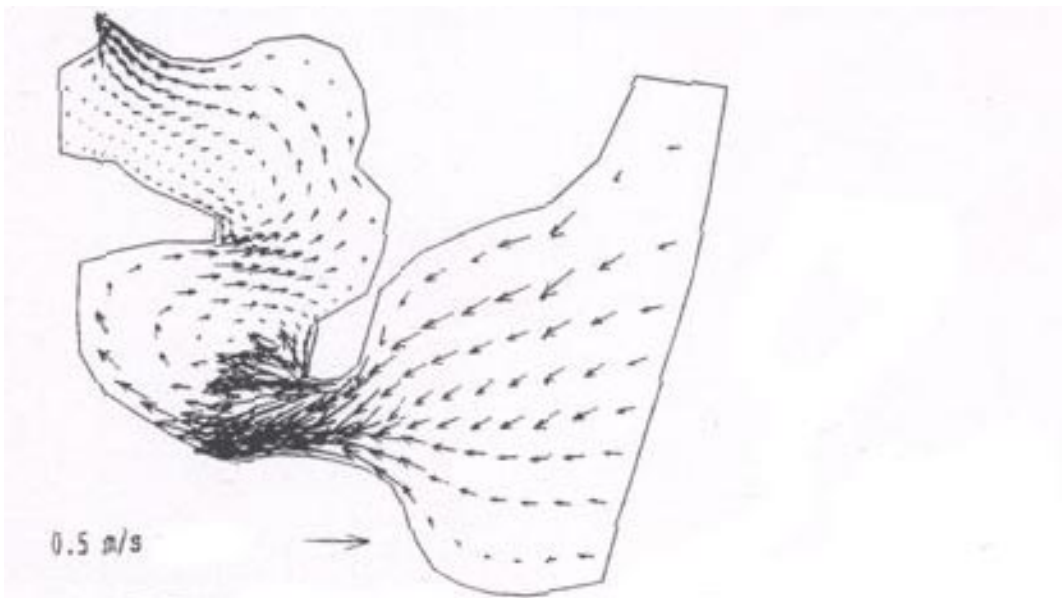


Figura 9c.- Velocidad superficial, modelación con SSIM, Condición luego de 6.8 años

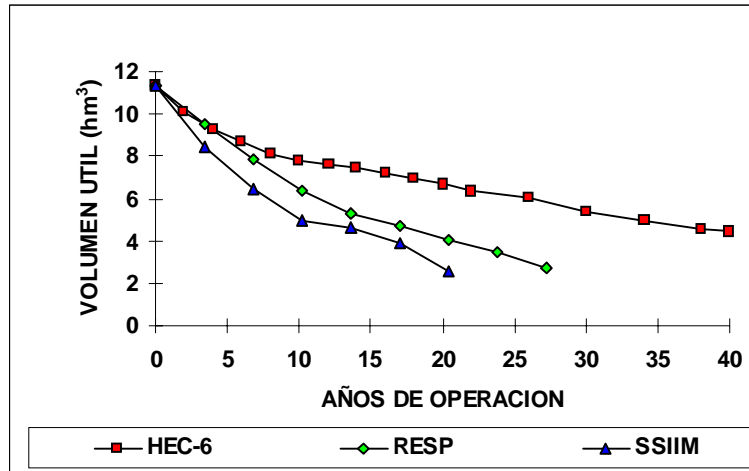


Figura 10.-Variación del Volumen Util

OPERACIÓN DEL EMBALSE

Se propusieron tres políticas de operación que deberán seguirse con el fin de minimizar el impacto de la sedimentación en el embalse:

- a) operación a niveles bajos durante la época húmeda,
- b) vaciado y limpieza del embalse, y
- c) establecimiento de un sistema de monitoreo continuo de la evolución de la sedimentación en el embalse.

El objetivo de la operación a niveles bajos en la época húmeda es minimizar la deposición de sedimentos en el volumen útil del embalse, entre las cotas 577 y 570 msnm, puesto que cuando se opera en estas cotas, las deposiciones ocurrirán en la zona aguas arriba del embalse, muy ancha y de poca profundidad. En esta zona las limpiezas anuales mediante el vaciado del embalse no serán efectivas para arrastrar los sedimentos que se depositen.

En la Figura 11 se muestra la curva acumulada de arrastre de sedimentos en suspensión versus caudales líquidos, para un año típico. Se observa en la figura que los caudales menores a 90 m³/s son responsables de menos del 6% de los sedimentos arrastrados; entre 90 y 110 m³/s se arrastran otro 11% adicional, y el intervalo entre 110 y 160 m³/s, responde a un 20% adicional¹. Se propone entonces la siguiente política de operación del embalse, dependiendo del caudal de ingreso al embalse mostrada en la Tabla 1.

¹ Estos números son calculados con la hidrología del año 81-82, año considerado similar a un “año promedio”.

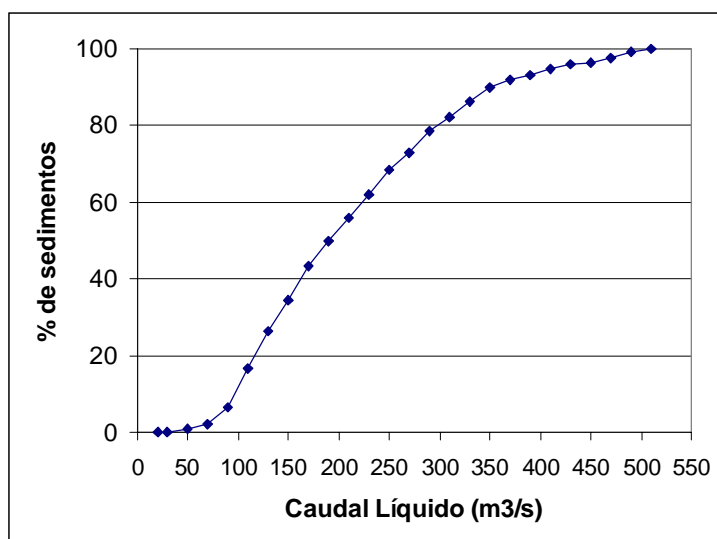


Figura 11.-Curva Acumulada de Sedimentos en Suspensión

Tabla 1.- Política de Operación

Caudal Natural (m³/s)	Nivel Máx. de Operación (msnm)	Volumen útil (millones m³)
<90	577	11.0
90<Q<110	575	9.0
110<Q<160	573	3.5
Q>160	571	1.0

Según estimaciones, con esta política de operación se logra una disminución del 50% en la deposición de sedimentos en el volumen útil del embalse, su vida útil se extenderá por lo menos 30 años. Con esta operación, la deposición de sedimentos continuará en el volumen útil durante unos 10 a 15 años a un ritmo más o menos constante. Mientras tanto, el volumen muerto disminuirá rápidamente y eso ocasionará menor eficiencia de atrape en el embalse. Cierta evacuación de sedimentos ocurrirá durante los vaciados de limpieza, que se lleven a cabo en sincronía con las limpiezas de Cachí. Luego de cierto tiempo, será necesario hacer una limpieza anual adicional en Angostura, para proteger la toma contra la acumulación excesiva de sedimentos. Estos vaciados se discuten en el siguiente apartado.

La principal deposición de sedimentos ocurrirá bajo el nivel 573-74 msnm. Luego de unos 15 a 20 años puede ser necesario aumentar los niveles de operación de la Tabla 1 para caudales entre 90 y 160 m³/s, para asegurarse el volumen requerido de regulación diaria.

Tanto por el problema de los vaciados de limpieza de Cachí, como por la necesidad de realizar limpiezas adicionales, en el diseño del P.H. Angostura se tuvo la precaución de dejar previstas dos compuertas de limpieza, de 4 m de ancho por 5.5 m de altura, que se ubican junto a la toma de aguas, con su umbral a la cota 552 msnm. Esta elevación es 13 m menos que el umbral de la toma de aguas, que se encuentra a la cota 565 msnm, ver Figura 12.



Figura 12.-Compuertas de descargas de fondo. A la derecha, la toma de aguas

La experiencia en Cachí, como de muchos otros embalses, ha mostrado que el vaciado ha sido particularmente útil en embalses pequeños², en donde es factible vaciar y llenar el embalse en unos pocos días sin pérdida excesiva de generación.

Para tratar de estimar la efectividad de la limpieza mediante las compuertas de fondo, se empleó un modelo semi-empírico de erosión retrogresiva cuya teoría se encuentra en detalle en Fan & Morris, 1992. Los cálculos se realizaron suponiendo que el embalse se ha sedimentado por completo, hasta la elevación del umbral de los vertedores. Se supuso además que la limpieza se realiza con un caudal en el río de 150 m³/s, y que la erosión retrogresiva abre un cauce de unos 50 m de anchura. Los cálculos indican que luego de unas 40 horas de limpieza, el cauce de erosión se extiende unos 2 km aguas arriba, y la cantidad erosionada excede las 400 000 toneladas. Estas estimaciones indican que es factible movilizar cantidades apreciables durante el vaciado y limpieza del embalse, siempre y cuando en el río corran caudales importantes del orden de 150 m³/s o más.

Como conclusión, se recomendó la realización de dos vaciados de limpieza al año. El primero de ellos debe coincidir con la limpieza de Cachí en el mes de octubre, y otro que se puede programar en el mes de diciembre, cuando aun hay caudales superiores a 100 m³/s en el río.

SISTEMA DE MEDICIÓN Y CONTROL

La última medida importante para el control de la sedimentación en el P.H. Angostura es un sistema de seguimiento y medición que ya existía para el P.H. Cachí, pero que se ha intensificado desde la puesta en marcha de Angostura. Para cumplir con esta medida se montó un sistema de control cuyos objetivos son:

² Fan, J., & Morris, G.L., (1992), "Reservoir sedimentation II: reservoir desiltation and long-term storage capacity", Jour. of Hyd. Engrg., vol 118, no 3, March

- Determinar la pérdida de volumen útil.
- Identificar los sitios donde la concentración de sedimentos es mayor.
- Establecer si la evolución del volumen útil se encuentra dentro de lo planificado.
- Proponer medidas correctivas si fuera el caso.

Por consideraciones de generación eléctrica, los vaciados de los embalses se programan de viernes a domingo; tanto para la que se realiza sincrónicamente con Cachí, como para la que se ejecuta individualmente en diciembre de cada año. Por tratarse de un embalse mucho más pequeño que el de Cachí el proceso de vaciado tarda alrededor de un día, desde que se inicia hasta que llega al escurrimiento libre. Se comienza abatiendo el embalse desde la cota máxima de 577.00 msnm (embalse completamente lleno) hasta conseguir la 552.0 msnm (río escurriendo libremente) aproximadamente con una duración de 23 horas, esto normalmente durante un viernes. Posteriormente se deja al río corriendo libremente por un tiempo que oscila entre día y medio a dos días, procurando que sea sábado y domingo.

El sitio de muestreo que se utiliza para identificar la producción del embalse Angostura es la estación “9-03 Angostura” ubicada inmediatamente después del puente del mismo nombre y a solo 1.3 km aguas abajo de la presa. Para el año 2002, el muestreo se inició el viernes 11 de octubre a las 19:45 horas y se finalizó el domingo 13 a las 14:20 horas. Dicho muestreo permitió establecer claramente dos llegadas fuertes de sedimento: una cerca de la hora 25 (1:00 a.m. del sábado) y la otra por la 33 (9:00 a.m.). La primera corresponde a la descarga por la apertura de compuertas de fondo del vertedor de Angostura (de corta duración, 5 a 6 hrs), con un desfase de entre 4 y 6 horas entre el caudal y la concentración; mientras que la segunda se relaciona con lo desalojado de la presa Cachí con una duración mayor que la primera (alrededor de 10 hrs). Posteriormente se mantiene una concentración que oscila entre las 20,000 y 10,000 ppm correspondiente a la fase de disminución que tiene un descenso muy lento.

La carga final que se registró, una vez cuantificados todos los muestreos, fue 1,068,424 ton. En comparación, en el año 2000 la carga total fue de 329,000 ton y en el 2001 de 662,000 ton, lo cual evidencia el aumento que se ha venido dando en la cantidad desalojada.

Estación 9-03 Angostura
 Desembalse Cachí - Angostura
 Oct 2002

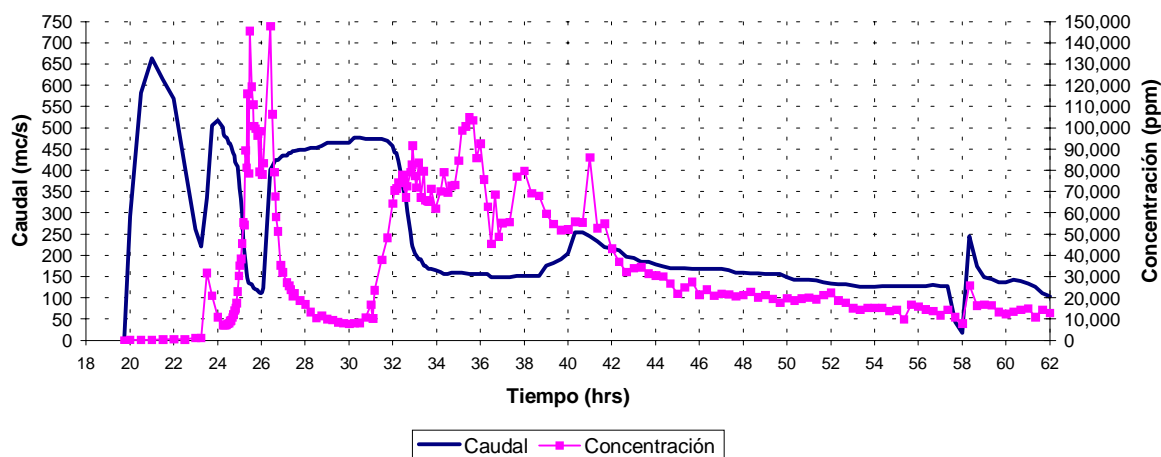


Figura 13.-Caudales y concentraciones en Est. Angostura durante desembalse del 2002

El monitoreo del embalse se basa fundamentalmente en campañas de sondeo a realizar antes y después de cada desembalse y, si se presentara un evento de gran magnitud (caudales entrantes al embalse mayores a 1500 m³/s) después de éste. Dichas campañas consisten en pasar un ecosonda montado en un bote que recorre el espejo del agua del embalse; con esto se obtiene una nube de puntos x, y, z debidamente referenciados (gracias a que el ecosonda trabaja conectado con un GPS) que representan el fondo del embalse, posteriormente, en la oficina se elabora un modelo tridimensional que permite calcular el volumen del embalse asociado a cada campaña. Finalmente, se compara la variación de los volúmenes y se establece como se encuentra dicha variación con lo planificado originalmente.

A la fecha se han realizado 9 sondeos en las siguientes fechas: diciembre 2000, abril 2001, setiembre 2001, octubre 2001, diciembre 2001, mayo 2002, setiembre 2002 y octubre 2002. Para el caso de setiembre 2001 se dio una condición especial debido a que se cambia de tecnología, de una combinación de papel y digital a totalmente digital; pero, durante este paso se cometen una serie de errores por lo que esta campaña arroja valores sobre-estimados y debe desecharse.

Con cada campaña de sondeos se modeló la topografía interna del embalse obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 2.

La columna de la extrema derecha es la variación del volumen entre el primer sondeo de diciembre 2000 y el último de octubre 2002. La cota máxima con el embalse totalmente lleno es 577.00 msnm, la cual es difícil de sostener durante todo el tiempo que dura la campaña del sondeo (aproximadamente dos días), razón por la cual el volumen para esa elevación se estimó para las campañas de mayo, setiembre y octubre 2002; no obstante, si se comparan los volúmenes para la 576.00 se observa que a la fecha se ha dado una pérdida del 4.4% con respecto a lo medido en diciembre 2000. La variación en el volumen se ilustra también en la Fig. 14.

Cuadro 2.- Volumen (en millones de m³) vs. Elevación en sondeos

Elevación (msnm)	Fecha del sondeo								Variac. (%)
	Dic-00	Abr-01	Sep-01	Oct-01	Dic-01	May-02	Set-02	Oct-02	
550	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
552	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	-95.1
554	0.06	0.08	0.07	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	-51.0
556	0.14	0.16	0.14	0.13	0.13	0.13	0.11	0.10	-27.4
558	0.26	0.32	0.26	0.24	0.24	0.24	0.20	0.20	-25.2
560	0.56	0.67	0.57	0.52	0.50	0.51	0.40	0.41	-27.3
562	1.06	1.22	1.12	1.04	1.02	1.04	0.86	0.86	-19.5
564	1.79	1.98	1.90	1.81	1.76	1.81	1.57	1.59	-10.9
566	2.69	2.92	2.91	2.77	2.67	2.74	2.45	2.51	-6.8
568	3.91	4.17	4.34	4.02	3.87	3.92	3.55	3.65	-6.7
570	5.67	5.96	6.36	5.83	5.59	5.60	5.12	5.20	-8.2
572	8.17	8.51	9.04	8.38	8.01	8.04	7.45	7.56	-7.4
574	11.53	11.94	12.45	11.74	11.22	11.29	10.65	10.79	-6.4
576	15.57	15.65	16.43	15.64	15.16	15.07	14.67	14.86	-4.6
577	17.22					16.65	16.26	16.47	-4.4

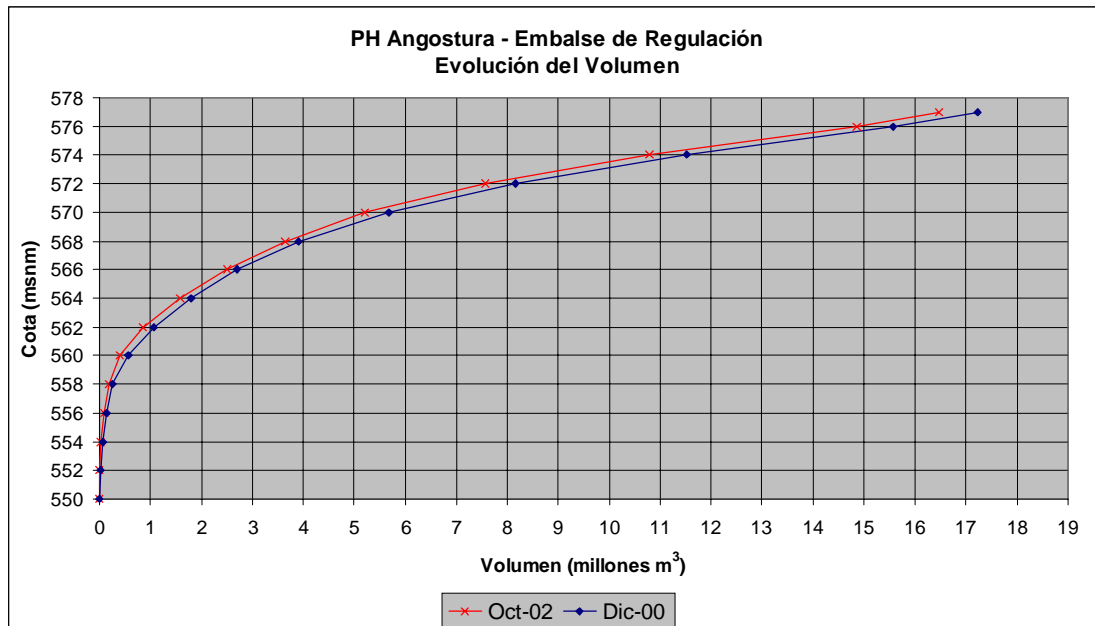


Figura 14.-Curvas de volumen versus elevación

En la Figura 15 se muestra una vista aérea del embalse durante el vaciado de octubre del año 2001, en donde se indican las zonas en las cuales han empezado a depositarse los sedimentos.



Figura 15.- Vista aguas abajo Embalse Angostura, octubre 2001

CONCLUSIONES

Es claro que la fisiografía del embalse de Angostura, de poca profundidad y muy ancho en su parte aguas arriba es sumamente desfavorable con relación a la acumulación de sedimentos.

Esto contrasta con el comportamiento del embalse de Cachí, situado aguas arriba. Desde su entrada en operación en 1966 hasta la última medición de 1993, su volumen útil disminuyó apenas de 54 Hm^3 a 48 Hm^3 (11%) gracias a la efectividad de las descargas de fondo. Por otra parte, Angostura en 2 años de operación ha perdido el 4.6% del volumen total. La pérdida del volumen útil comparando el sondeo de octubre 2002 con el de diciembre 2000 es del 2.5% y la del volumen muerto 2.1% (total 4.6%). El porcentaje de pérdida mayor se da en el volumen útil, lo que concuerda con lo modelado durante los estudios y con lo observado.

De acuerdo con los resultados obtenidos hasta ahora, el volumen del embalse Angostura evoluciona satisfactoriamente. No obstante, conociendo el comportamiento hidrológico de la cuenca, que puede ser influenciado por fenómenos meteorológicos productores de grandes avenidas (frentes fríos, vaguadas, etc.) y que estas acarrear grandes cantidades de sedimentos, se recomienda seguir fielmente la norma de operación que indica que para caudales mayores que $160 \text{ m}^3/\text{s}$ el nivel máximo debe ser 571 msnm, porque de esta forma se garantiza que la cola del embalse se encuentra vacía evitándose así la colmatación por sedimentos. De no observarse esta política se corre el riesgo de que con una creciente se pierda buena parte del volumen útil del embalse, ya que la limpieza de esa zona es sumamente difícil.

Con relación al uso de un modelo hidrodinámico tri-dimensional SSIIM para predecir el patrón de sedimentación de un embalse, vale la pena destacar que una de las principales limitaciones es que la simulación se hizo bajo la suposición de flujo permanente entre largos intervalos de tiempo. Esto causa cierta deposición sobre el nivel del agua, lo que requirió usar un algoritmo eurístico muy grueso para redistribuir dichos sedimentos. Actualmente, el modelo SSIIM

permite el cálculo del flujo no permanente, lo que junto con la capacidad de procesamiento disponible permite calcular miles de intervalos de tiempo para una simulación.

La segunda aproximación importante es que se supuso un nivel constante del agua y por lo tanto la erosión durante niveles inferiores de operación no se modeló. Actualmente están en desarrollo algoritmos de “wetting/drying”, con los cuales se pueden modelar los cambios en los niveles del agua, y en los que la malla se mueve horizontalmente incluyendo o eliminando celdas en dicha dirección. Se utilizan también mallas no-estructuradas, en las que el número total de celdas varía durante el cálculo (Olsen 2003). Otro aspecto en el cual se está investigando es en el de las condiciones de frontera para los sedimentos.

Finalmente, se requiere la comprobación de estos modelos contra mediciones en un buen número de casos, antes de que se pueda decir que un modelo de este tipo es suficientemente confiable para efectos de la predicción a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB Hydroconsult, (1995), *Sedimentation and Erosion Processes related to the H.E. Projects Angostura, Guayabo and Siquirres*, Part 1, AB Hydroconsult, Uppsala, Sweden

Fan, J., & Morris, G.L., (1992), “Reservoir sedimentation II: reservoir desiltation and long-term storage capacity”, *Jour. of Hyd. Engrg.*, vol 118, no 3, March.

Jiménez O., et. al., (1993), *Informe preliminar sobre la Sedimentación en el Embalse del P.H. Angostura*, Instituto Costarricense de Electricidad.

Lovoll, A., (1994), *Calculation of water and sediment flow in the Angostura Reservoir, Costa Rica*, University of Trondheim, Norway

Olsen, N.R., (1994), “SSIIM-A three dimensional numerical model for simulation of water and sediment flow”, *Hydrosoft-94*, Porto Carras, Greece.

Olsen, N. R. B., (2003) "3D CFD Modeling of a Self-Forming Meandering Channel", *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, No. 5, May

Rodríguez, A., y **Jansson, M.**, (1992), *Estudios Sedimentológicos en el Embalse de Cachí, Costa Rica*, ICE

Rodríguez, C., (2001), *Informe sobre sedimentos Proyecto Hidroeléctrico Reventazón*, ICE.