

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA  
XI CONGRESO CHILENO

SEDIMENTACION EN EL EMBALSE COGOTI

Alejandro López A. (1)  
Luis Arrau del C. (2)  
Omar Núñez E. (3)

RESUMEN

Se presentan los resultados de las mediciones efectuadas en el embalse Cogotí (IV Región), tendientes a determinar parámetros de interés referentes a la sedimentación producida en dicho embalse durante un periodo de 50 años de operación. En particular se determinó la capacidad de retención del embalse, el volumen de sedimento depositado, la variación de la curva de embalse y el peso específico de los sedimentos. Estos resultados se comparan con metodologías de aplicación frecuente. Adicionalmente se estimó la probable vida útil del embalse y la tasa de erosión de la cuenca.

- (1) Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- (2) Ingeniero Civil, Dirección de Riego, M.O.P. Profesor Departamento de Ingeniería Civil.
- (3) Ingeniero Civil. Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias.

## 1. Introducción

El fenómeno de sedimentación en embalses está directamente relacionado con su vida útil, parámetro de gran relevancia para decidir el proyecto y la construcción. Lo crucial de este problema, ha llevado a la formulación de metodologías empíricas y teóricas para abordarlo. Sin embargo, debido a la complejidad del fenómeno, que limita su formulación teórica, y a la insuficiente información de terreno, no ha sido posible generalizar los modelos empíricos y teóricos propuestos. Por lo tanto, todo esfuerzo destinado a obtener datos de terreno es de gran utilidad, sobre todo si la información corresponde a un embalse cuyo nivel ha tenido una fuerte disminución o se ha vaciado totalmente, de manera que se puede medir con precisión sus niveles de embancamiento. La sequía que afectó al país durante los años 1989 y 1990, en particular a la IV Región, significó la disminución notoria de los niveles normales de los embalses de la zona, situación que llevó al Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile a formular un programa de investigación en los embalses Cogotí, Paloma y Recoleta, estudio al cual concurren la Dirección General de Aguas y la Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas. En el presente trabajo se da a conocer el estudio efectuado en el embalse Cogotí y los principales resultados derivados de las mediciones efectuadas.

## 2. Antecedentes generales relativos a sedimentación en embalses

La sedimentación de un embalse es un fenómeno complicado, que depende de numerosas variables cuyo conocimiento no siempre está disponible o es de poca confiabilidad. Las variables más importantes que intervienen son el gasto sólido y el gasto líquido afluentes al embalse, los cuales varían en el tiempo y sus magnitudes son difíciles de predecir. Además, generalmente no se cuenta con registros, o bien estos no son lo suficientemente largos, completos y confiables .

El problema ha sido abordado por dos caminos. Uno teórico y otro empírico. En el primero, se trata de formular modelos basados en ecuaciones de movimiento y de continuidad del gasto líquido y sólido. Sin embargo, para formular un modelo adecuado se requiere

contar con extensa y buena información, que permita definir las características de los cauces afluentes y del embalse, y las características de los sedimentos, además de un conveniente conocimiento del transporte sólido de fondo y en suspensión, lo que no siempre es así. Simons (1982) da a conocer algunos de los modelos elaborados. El camino alternativo es la formulación de metodologías empíricas para cuantificar algunos aspectos del fenómeno, como ser la eficiencia de retención del embalse, la cantidad y distribución de los sedimentos en él depositados y el peso específico de los depósitos. Estos métodos se fundamentan en los antecedentes recogidos de observaciones directas efectuadas en embalses en operación. Churchill (1940) y Brune (1953), citados por Simons (1982), sobre la base de observaciones efectuadas en numerosos embalses han propuesto procedimientos para determinar la capacidad de retención de un embalse. En cuanto a la determinación del volumen de sedimento depositado y acumulado en un periodo dado y su distribución, concepto asociado a la curva de embalse, se han desarrollado también modelos empíricos y teóricos. Entre los modelos teóricos y semiteóricos cabe citar, entre otros, el desarrollado por Matyas y Rothenburg (1986) y el propuesto por Lara (Benitez 1984), siendo éste último muy difundido. El procedimiento que sigue este modelo, es diferenciar el fenómeno según las características propias del embalse, ya que afirma existe una razonable relación entre la altura del embalse y el volumen de sedimento que se deposite, debiendo distinguirse cuatro tipos de embalses, según sea su forma. Con este método se determina la distribución en vertical del sedimento realmente depositado y no su distribución en planta.

Por supuesto, la metodología que permite entregar resultados más confiables, para un embalse cualquiera, es la que se apoya en mediciones directas realizadas en dicho embalse. Para analizar e interpretar las mediciones efectuadas existen varios métodos, ampliamente descritos por Claude y Chartier (1977), entre los cuales cabe consignar el método de Kolmogorov y los llamados métodos de la altura media, general y derivada del método general. Son éstos los que se aplicarán en la interpretación de los datos recogidos en el embalse Cogotí.

Otro parámetro importante de obtener es el peso específico de los sedimentos depositados. En efecto, es evidente que éste variará al estar sometido a cargas que dependerán de la operación del embalse, y al aporte de sólidos afluentes. En Vanoni (1962), Simons (1982) se proponen relaciones para determinar el peso específico de los sedimentos depositados en un embalse.

Finalmente, cabe señalar que en Chile se ha desarrollado, según el conocimiento de los autores de este trabajo, un sólo estudio con mediciones directas, y fue el llevado a cabo por Benitez (1984) en el embalse de la Central Rapel.

### 3. Sedimentación en el embalse Cogotí

#### 3.1. Descripción de la zona

El embalse Cogotí está ubicado en la cuenca del río Limarí, la cual tiene su nacimiento en la cordillera de Los Andes entre los paralelos 30° 30' y 31° 15' Sur. El área drenada es de 11.927 km<sup>2</sup> y, administrativamente, pertenece a la provincia de Limarí. Desde el punto de vista hidrográfico, en la provincia se distinguen cuatro subcuencas de interés, correspondientes al río Hurtado, Río Grande, Huatulame, y afluentes ubicados aguas abajo de los embalses Paloma y Recoleta. La subcuenca del río Huatulame está formada por los ríos Huatulame, Cogotí, Pama y Combarbalá. El Cogotí nace en la Cordillera de Los Andes, y muere en el embalse Cogotí. El Combarbalá nace en un cordón de cerros pre-cordilleranos y es afluente del Pama. El Pama nace en quebradas que se originan en los cerros Llanpagüi y Placeta, y después de recibir los aportes del Combarbalá, muere en el embalse Cogotí. Estos tres ríos, Cogotí, Pama y Combarbalá aportan entonces sus caudales al embalse Cogotí, caudales que se caracterizan por provenir de cuencas principalmente pluviales. Las aguas efluentes del embalse constituyen el río llamado Huatulame, que desemboca en el Río Grande. Las estaciones de control fluviométrico en la cuenca afluente al embalse son: Cogotí en Fraguitas (estación limnigráfica), Cogotí en entrada Embalse (limnigráfica y además con control sedimentométrico), Cogotí 18 (limnimétrica), Combarbalá en Ramadillas (limnimétrica), Pama en entrada de embalse (limnigráfica). Los antecedentes recogidos por estas estaciones no son continuas en todas ellas y el

control sedimentométrico en Cogotí en embalse es de corta extensión. En general, la cuenca del embalse Cogotí, se caracteriza por estar flanqueada por altos cerros que contribuye a caracterizar el clima de la región, el cual es más bien árido, con escasa vegetación. La existencia de canales de riego en las zonas altas, contribuye a que el régimen de escurrimiento de los afluentes no es natural en la época de primavera-verano, situación que afecta levemente el cálculo de la producción de sedimentos de la cuenca a partir de la información del embalse.

### **3.2. Antecedentes del embalse.**

El embalse Cogotí está constituido por un muro de 160m. de longitud y 82.7 m. de altura máxima construido de rock fill o enrocado y con una cortina de hormigón en el talud de aguas arriba. El muro tiene un talud de 1.25/1 por aguas arriba y 1.5/1 por aguas abajo. El embalse fue diseñado para una capacidad de 150 millones de m<sup>3</sup> provenientes de una cuenca de 1450 Km<sup>2</sup> de superficie. Cuenta con un vertedero de 158 m de longitud, diseñado para un caudal de 5000 m<sup>3</sup>/s. El embalse es administrado por una Sociedad de Canalistas y entró en servicio en los años 30. Como antecedente de su operación, se contó con estadísticas de volúmenes embalsados al final de cada mes desde Mayo de 1953 hasta Febrero de 1992, datos proporcionados por la Dirección de Riego y los propios canalistas. Es un embalse de regulación multianual, que en promedio acumula en un año y entrega en tres.

## **4. Mediciones realizadas**

### **4.1. Objetivos y alcances de la campaña de terreno**

La campaña de terreno tuvo como objetivo principal recopilar datos y antecedentes en relación al sedimento depositado en el embalse. Para ello, se ejecutaron las siguientes actividades: levantamiento topográfico en la zona del embalse y en las proximidades de los ríos afluentes a éste, levantamiento aerofotogramétrico del embalse, definición de puntos de apoyo para la restitución aerofotogramétrica y muestreo de los sedimentos depositados en el embalse y en el cauce de los ríos afluentes .

#### **4.2. Mediciones efectuadas**

Los trabajos de terreno realizados fueron los siguientes:

- a) Vuelo aerofotogramétrico. Su objetivo fue obtener una cubierta fotográfica que permitiera generar planos a escala 1:500 con curvas de nivel separadas a 1 m. el vuelo se programó para obtener fotos a escala 1:20.000, obteniéndose un total de 12 fotogramas.
- b) Materialización de puntos de apoyo. La definición y materialización de puntos de apoyo al vuelo, fue una de las actividades que mayor tiempo de ejecución demandó, debido a la particular topografía de la zona que dificultó el acceso a sectores donde debían ubicarse los puntos de apoyo. Estos puntos de apoyo permitieron confeccionar el plano que representa el actual estado del embalse, a escala 1:4000 con curvas de nivel cada 5 metros.
- c) Levantamiento topográfico. Se efectuó un levantamiento topográfico consistente en perfiles transversales en los ríos Pama y Cogotí. En el embalse se levantaron algunos perfiles, en la cola y sector medio (perfiles 4 y 5), no pudiendo hacerlo cerca del muro, ya que en esta zona el terreno se presentaba en un estado pantanoso. En el brazo del Cogotí se levantaron 7 perfiles (6 al 12) y 7 en el Pama (14 al 20). En la Fig.1 se muestra una planta con la ubicación de los perfiles, incluyendo otros levantado en el río Pama, como también la posición de los pozos excavados en dichos perfiles.
- d) Muestreos de sedimentos. En los perfiles transversales levantados, se excavaron pozos (43 en total), desde los cuales se extrajeron muestras de sedimentos por capas que representarían distintos estratos de depositación en el perfil, para determinar su granulometría y densidad en el laboratorio. Para este último objetivo, las muestras fueron extraídas desde las paredes de los pozos, tratando de no ocasionarles mayores perturbaciones. Interesante resulta consignar que en general el terreno se presentó muy estable, salvo en la cola del embalse en el sector de la llegada del río Cogotí, en donde los estratos fueron arenosos, lo cual complicó la excavación.

## 5. Procesamiento de la información y resultados obtenidos

### 5.1. Generalidades

La información topográfica, aerofotogramétrica y sedimentológica obtenida de las mediciones descritas en el punto anterior, se procesó para determinar el volumen de sedimento depositado durante el tiempo en operación del embalse, las propiedades del sedimento depositado y la variación de la curva de embalse, es decir su capacidad actual.

### 5.2. Depositación de los sedimentos en el embalse

La cuantificación del volumen sedimentado se obtuvo a partir de la información proporcionada por los levantamientos topográficos y aerofotogramétricos, aplicando los métodos descritos por Claude y Chartier (1977) ya citados.

En la tabla 5.1 se presentan los resultados obtenidos a partir de los perfiles transversales del levantamiento topográfico.

Tabla 5.1.

#### Volumen de Sedimentación según Levantamiento topográfico

Método	Volumen (m <sup>3</sup> )
Kolmogorov	4.278.088
Altura Media	6.798.765
General	5.163.839

Con la información aerofotogramétrica, se confeccionó un plano a escala 1:4000 (similar a la escala del plano original) con curvas de nivel cada 5 metros. Para el cálculo del volumen de sedimento depositado se aplicaron los 3 métodos anteriores a los perfiles transversales obtenidos de este plano, además de cubicar la capacidad actual del embalse y compararla con la original, tomando como cota máxima la del umbral del vertedero de rebase (650 msnm).

En la Tabla 5.2 se presentan los resultados obtenidos, considerando tres zonas en el embalse: zona ligada al río Cogoti, zona del río Pama y zona Muro.

Tabla 5.2.

Volumen de Sedimentación. (Del Levantamiento aerofotogramétrico)

Método	Volumen (m <sup>3</sup> ) rio Cogoti	Volumen(m <sup>3</sup> ) rio Pama	Volumen(m <sup>3</sup> ) muro	Volumen Total (m <sup>3</sup> )
Kolmogorov	4.240.892	23.908284	2.698.921	30.848.097
Alt.Media	5.719.134	21.154707	2.565.365	29.439.206
M. General	5.019.768	25.516087	2.520133	33.055.988
Cubicación Total:	.....			23.604.000

### 5.3. Propiedades de los sedimentos depositados

A los sedimentos muestreados en los diferentes pozos excavados, se le determinó su granulometría y peso específico. En la Figura 2 se muestra la distribución granulométrica correspondiente a muestreos superficiales de los diferentes pozos; dicha figura confirma el hecho que el tamaño del sedimento depositado disminuye hacia el muro. Esto no se observa con el sedimento no superficial, en donde la distribución granulométrica resultó ser aleatoria, lo cual podría explicarse por las características de operación del embalse, ya que sus niveles tiene gran variación, incluso con vaciamiento total. En cuanto al sedimento depositado, éste está constituido principalmente por arena hacia la cola del embalse con aumento de la cantidad de sedimento cohesivo hacia el muro.

El peso específico del sedimento se determinó en laboratorio procurando alterar lo mínimo la muestra recogida in-situ. Los resultados obtenidos entregan valores que van entre un mínimo de 1.01 y un máximo de 1.66 (t/m<sup>3</sup>). Considerando el total de valores que abarcan muestras de todas las capas, se decidió adoptar un valor medio igual a 1.23 (t/m<sup>3</sup>).

### 5.4. Distribución sedimento depositado: Determinación curva de embalse

Uno de los antecedentes de mayor interés en el estudio, es determinar la variación que ha tenido la curva de embalse. Como se mencionara anteriormente, esta curva se puede determinar sea por contar con antecedentes de terreno actuales o bien aplicando metodologías apropiadas, tales como el método de Lara.



Dado que se cuenta con el plano aerofotogramétrico actual y el plano topográfico inicial, fue posible determinar las correspondientes curvas de embalse, es decir la relación entre la profundidad y la capacidad del embalse. Como nivel de referencia superior, se consideró la cota de vertimiento, (650 msnm). En La Figura 3 se presentan las curvas de embalse original y la actual. La capacidad original del embalse a la cota de vertimiento era de 142.000.000 m<sup>3</sup> mientras que actualmente es de 118.396.000 m<sup>3</sup>. Esto significa que la capacidad del embalse se ha reducido al 83% durante los 50 años de operación.

## **6. Interpretación de resultados**

### **6.1. Generalidades**

En el punto anterior se presentaron los resultados obtenidos de las mediciones directas efectuadas, las que permitieron determinar el volumen de sedimento depositado, sus propiedades y distribución en el embalse. En este punto se precisarán los alcances de dichos resultados teniendo en cuenta también los que se obtienen al aplicar metodologías indirectas de evaluación de dichos parámetros. Obviamente la interpretación de los resultados es básicamente válida para este embalse. Para generalizar estos alcances a otros embalses de esta u otra región será conveniente contar con los resultados correspondientes a los embalses Paloma y Recoleta, aún en procesamiento.

### **6.2. Volumen de depositación del sedimento en el embalse**

En las tablas 5.1 y 5.2 del punto 5.2 se muestran los resultados correspondientes al volumen de sedimento depositado durante el periodo de 50 años de operación. Comparando los valores que allí se indican es evidente que los correspondientes al análisis directo del levantamiento topográfico no son representativos, lo cual era de esperar puesto que este levantamiento es incompleto por no contar con información de la parte del embalse próxima al muro, zona imposible de levantar por estar en condiciones bastante pantanosa. Distinto es el caso de los resultados presentados en la Tabla 5.2, provenientes del levantamiento aerofotogramétrico el cual, por haber sido realizado

con el embalse vacío, representa la totalidad de la superficie de éste. Estos resultados son de gran confiabilidad y sin duda representan la realidad del proceso de sedimentación. De los valores indicados en dicha Tabla, se adoptará como resultado final el correspondiente a la cubicación total del plano aerofotogramétrico. De esta forma se tiene que la depositación total en los 50 años ha sido de 23.604.000 m<sup>3</sup> de sedimento.

Conociendo este valor, se intentó validar algún modelo teórico existente (Matyus et al, 1986) sin mayor éxito. Del mismo modo, no existiendo en esta cuenca controles sedimentométricos, (sólo existen datos unos pocos años en el río Cogotí), no se consideró conveniente hacer estimaciones de gasto sólido por métodos empíricos sin antes completar el análisis de los resultados correspondientes a los embalses Paloma y Recoleta, en cuyas cuencas hay estadísticas sedimentométricas.

Adicionalmente, y puesto que se conoce el volumen del embalse y los volúmenes afluentes anuales aportados por los ríos Cogotí(50.310.720) y Pama (24.027.840), se determinó la eficiencia de atrape del embalse aplicando las curvas de Brune, resultando ser de 100%. Similar resultado se obtuvo al aplicar el método de Churchill.

### 6.3. Propiedades de los sedimentos

Sin duda, el valor del peso específico del sedimento depositado es un parámetro importante de determinar. Como se indicara en el punto 5.3, el peso específico varió entre 1,03 y 1,66 (t/m<sup>3</sup>) en las diferentes muestras analizadas, las que provienen del estrato superficial hasta estratos a profundidades del orden de 2.00 m. De acuerdo a los resultados, se adoptó como valor representativo del peso específico 1,23 Ton/m<sup>3</sup>.

Este resultado se comparó con la conocida y utilizada fórmula propuesta por Lane y Koelzer (Vanoni 1962), de la cual se obtiene para un embalse en operación 50 años los valores siguientes del peso específico:

- embalse siempre lleno	:	$\gamma = 1,153$	Ton/m <sup>3</sup>
- embalse moderadamente vaciado	:	$\gamma = 1,227$	Ton/m <sup>3</sup>
- embalse extremadamente vaciado	:	$\gamma = 1,285$	Ton/m <sup>3</sup>

Teniendo en cuenta que la operación del embalse está dentro de lo que puede considerarse vaciamiento moderado y extremo, hay buena coincidencia entre el valor medio determinado directamente y el entregado por la relación de Lane y Koelzer, lo cual posibilita aplicar esta relación en otros embalses con un conveniente grado de confiabilidad, considerando además que Benítez (1984) encontró en Rapel aceptables concordancias.

#### 6.4. Determinación de la curva de embalse y estimación de la vida útil

##### 6.4.1. Curva de embalse

En el punto 5.4 se obtuvo la curva de embalse a partir de los antecedentes recopilados con el embalse vacío. A continuación se verificará la aplicabilidad del método de Lara a este embalse.

La aplicación de este método requiere primeramente definir el tipo de embalse, de acuerdo a la clasificación establecida por Lara según la relación entre profundidad del embalse y volumen, definida por la pendiente (m) de la recta que define la función entre ambos parámetros (Tabla 6.1).

Tabla 6.1.

Clasificación de los embalses		
Tipo	Clasificación	m
I	Llanura, Plano	3,5 - 4,5
II	Llanura de pie de cordillera a precordillera	2,5 - 3,5
III	Cerros, colinas	1,5 - 2,5
IV	Cañón, Angostura	1,0 - 1,5

Para el embalse Cogotí  $m = 3,9$  (Fig. 4) con lo cual éste resultó ser embalse tipo I. Definido el tipo de embalse, se determina la altura de sedimento en el muro apoyándose en curvas representativas de cada tipo de embalse y en seguida se obtiene la distribución del sedimento aplicando los llamados métodos "reducción de áreas" o "incremento de áreas", según corresponda. En la figura 5 se muestran los resultados. Se aprecia que la curva obtenida por esta metodología es similar a la determinada por cubicación directa de la situación actual en el embalse, lo que permite aportar un antecedente para validar esta metodología.

#### 6.4.2. Vida útil del embalse

Teniendo en cuenta la variación de la curva de embalse, en 50 años, que ha significado disminuir la capacidad inicial al 83%, puede hacerse una estimación de la vida útil de éste, aceptando un patrón de sedimentación igual al valor medio de sedimentación anual, dado por el volumen acumulado en los 50 años 23.604.000 m<sup>3</sup>, dividido por ese tiempo. Con esto y aplicando una relación lineal del tipo

$$C_T = C_0 - v \cdot T$$

donde

$C_T$  = capacidad del embalse al año T

$C_0$  = capacidad inicial del embalse = 142.000.000 m<sup>3</sup>

v = valor medio de sedimentación = 472.080 m<sup>3</sup>

T = año considerado

Con estos valores se ha obtenido la Tabla N° 6.2 siguiente.

Tabla 6.2

#### Variación de la capacidad del embalse

Años	Capacidad	Porcentaje
0	142.000.000	100%
50	118.396.000	83%
100	94.792.000	66,8%
150	71.188.000	50%
200	47.584.000	33,5%
226	353.309.920	25%
250	23.980.000	16,9%
270	14.538.000	10,2%

De acuerdo a esto, puede esperarse que el embalse no reducirá su capacidad en un 50% de la inicial antes de un siglo de operación.

#### 6.5. Tasa de erosión de la cuenca

Finalmente, otro interesante parámetro que es posible determinar con los resultados obtenidos es la erosión media de la cuenca, la que resultó ser de 0,3 mm/año con el régimen histórico de escurrimientos. Este valor puede tenerse presente cuando se aplique a esta cuenca u otras similares, relaciones empíricas recomendadas en la literatura.

## **7. Conclusiones.**

El estudio realizado permite destacar los siguientes aspectos de interés:

- a) Conformar una gran confiabilidad en los levantamientos aerofotogramétricos, para la determinación de los volúmenes de sedimento depositados.
- b) Aportar antecedentes de terreno que permiten tener un marco de referencia respecto del grado de confiabilidad de metodologías de uso frecuente para la estimación de parámetros característicos de sedimentación en embalse.
- c) Definir sobre la base de lo observado, un periodo de vida útil del embalse.
- d) Determinar la erosión media producida en la cuenca durante el periodo de 50 años.

## **8. Bibliografía**

- Benitez A. (1984) Estimación de la sedimentación en el embalse Central Rapel. División Estudios Hidrológicos. ENDESA.
- Claude J. y Chartier R. (1977) Mesure de L'Envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie. Campagne de 1975. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol vol XIV N° 1.
- Matyas E.L. y Rothenburg L. (1986) Characteristics of sediment profiles in reservoirs. Journal of Hydrology vol. 87 N° 1/2 Netherlands.
- Simons, Li y Asoc. (1982) Engineering Analysis of Fluvial Systems. Fort Collins, Colorado U.S.A.
- Vanoni V. (1962) Curso de Sedimentación. Universidad de Chile.

## **Reconocimientos**

Este estudio ha sido financiado por el Departamento Técnico de Investigación (D.T.I.) de la Universidad de Chile (Proyecto I 3093/9012), la Dirección General de Aguas y Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas. La Asociación de Canalistas del embalse Cogotí facilitó el desarrollo del estudio en terreno. A todas estas entidades se les agradece su colaboración.

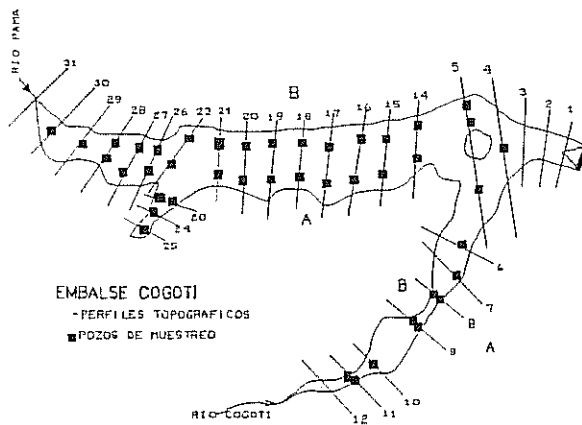


FIGURA 1.

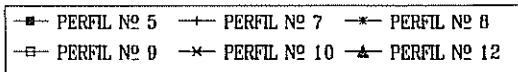
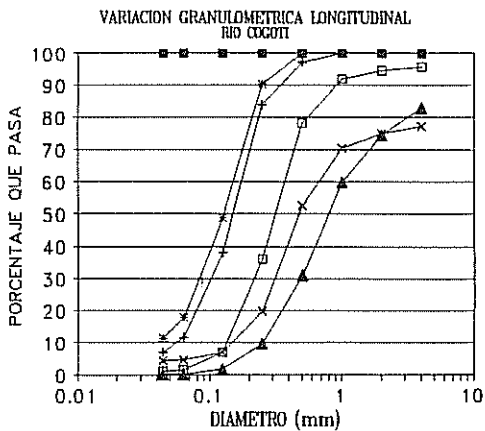


FIGURA 2.

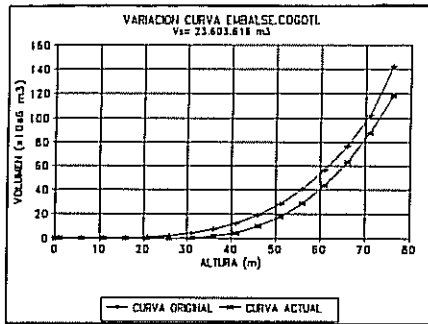


FIGURA 3.

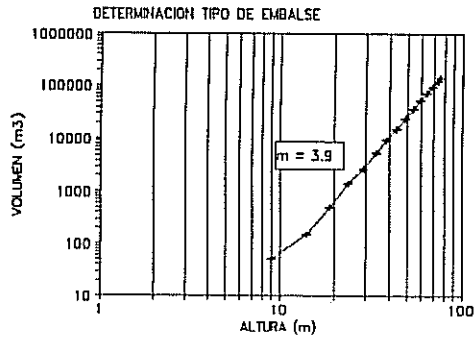


FIGURA 4.

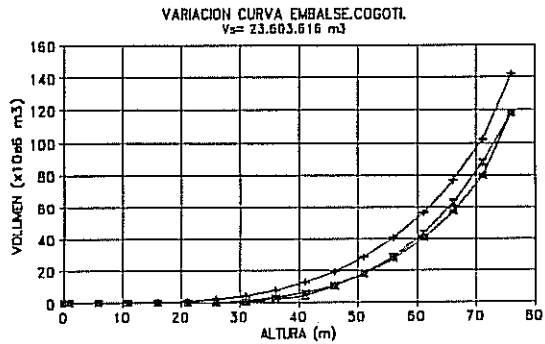


FIGURA 5.