

## COLMATACIÓN DE LOS EMBALSES DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA DEL NOROESTE ARGENTINO APLICACIÓN DE NUEVAS METODOLOGÍAS BATIMÉTRICAS

### SEDIMENT YIELDS IN HYDROELECTRIC POWER DAMS IN THE ARGENTINE NORTHWEST. APPLICATION OF NEW BATIMETRIC METHODOLOGIES

Mosa, Sergio G.<sup>1</sup>, Núñez, Virgilio<sup>2</sup> y Boso, Miguel A.<sup>3</sup>

#### Resumen

Los relevamientos batimétricos de los embalses con fines hidroeléctricos proporcionan el conocimiento de la variación de su capacidad y la reconstrucción de las curvas de áreas-volúmenes, información necesaria para una adecuada planificación de sus operaciones. Asimismo, el estudio de las características granulométricas de los sedimentos acumulados aporta información del mecanismo de colmatación que están sufriendo los embalses.

Las nuevas tecnologías disponibles para el registro de posiciones espaciales con mayor precisión, representan un nuevo escenario y un reto para la aplicación de mejores metodologías en los levantamientos batimétricos con destino al conocimiento de la tasa de colmatación de los embalses hidroeléctricos.

Se analizan las metodologías utilizadas antiguamente para los levantamientos batimétricos basadas en la realización de transectas transversales al espejo de agua de los embalses y se comparan con una nueva propuesta metodológica introducida por los autores en el año 2005; ésta se basa en la realización de un registro muy denso de posiciones espaciales y de la profundidad (x, y, z) en forma de espiral para cada embalse. Dichos datos son completados con la línea de costa obtenida de la banda del infrarrojo cercano de una imagen satelital actualizada, cuya cota de máximo embalsado es conocida para la fecha correspondiente. Todos los datos planialtimétricos son usados para la generación de los Modelos Digitales de Profundidad – MDP - de los embalses. La información obtenida para cada batimetría fue comparada con la planimetría original de cada embalse y de los anteriores levantamientos para determinar los espesores de sedimentos depositados. En laboratorio se procesaron las muestras colectadas con una draga de fondo para determinar las fracciones granulométricas de los sedimentos. Se han relevado los embalses de El Cadillal y Escaba en la Provincia de Tucumán, los de Cabra Corral y El Tunal en Salta y el de Río Hondo en Santiago del Estero. Estos resultados contrastaron fuertemente con los cálculos de sedimentación obtenidos en forma secuencial a partir del cierre de cada embalse siendo muy inferiores a los calculados previamente. El Cadillal tuvo una reducción del 36,8 % de su volumen original, Escaba posee una colmatación del 20,9 %, mientras que Cabra Corral está colmatado un 15,6 %. El Tunal tiene una colmatación del 24,0 % y el embalse de Río Hondo tiene una reducción de su capacidad original del 13,0 %.

Esta información nos da una idea de los procesos erosivos que ocurren en las cuencas hídricas de cabecera y de la importancia de sus efectos negativos, especialmente sobre la vida útil de los embalses.

**Palabras clave:** embalses, colmatación, batimetrías, Noroeste, Argentina

#### Abstract

The batimetric reports of reservoirs with hydroelectric power purposes provide the knowledge of the variation of its capacity and the reconstruction of the curve of areas - volumes, necessary information for the normal planning of its operations. Likewise, the study of the granulometric characteristics of the accumulated sediments contributes information of the filling mechanism that the reservoirs are suffering. The new available technology for the registry of space positions more accurately, represents a new scenario and a challenge for the application of better methodologies in the batimetric studies aimed to the knowledge of the filling rate of sediments in hydroelectric dams. The traditional methodologies used for the batimetric studies based on transects across of the dams are formerly analyzed, and they are compared with a new methodological proposal introduced by the authors in 2005; this is based on a very dense registry of space positions and on the depth (x, and, z) in spiral shape in each reservoir. Such data is completed with the coastline obtained from near infrared band of an updated satellite image, which level of maximum dammed is well-known for the corresponding date. All data are used for the generation of the Digital Models of Depth – MDP - of the dams. This obtained information was compared with the original mapping of every dam to determine the thicknesses of the deposited sediment. In the laboratory the dredged samples were processed to determine the granulometric fractions of the sediments. The reservoirs El Cadillal and Escaba in Tucumán Province, Cabra Corral and El Tunal in Salta Province and Rio Hondo in Santiago del Estero Province have been relieved. These results strongly contrast with the calculations obtained of sedimentation in sequential time from the

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo, Universidad Nacional de Salta, Buenos Aires 177, 4400 - Salta - Argentina  
e-mail: sermosa@unsa.edu.ar

<sup>2</sup> Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo, Universidad Nacional de Salta, e-mail: nunezv@unsa.edu.ar

<sup>3</sup> Cátedra de Petrología II, Universidad Nacional de Salta, e-mail: mboso@unsa.edu.ar

*Artículo recibido el 15 de octubre de 2008*

*Artículo aceptado el 30 de abril de 2009*

closing of each reservoir, being more inferior than the previously calculated. El Cadillal had a reduction of 36,8 % of its original volume, Escaba has a filling of 20,92 %, Cabra Corral is filled of 15,6 %. El Tunal has a filling of 24,0 % and Río Hondo dam has a reduction of its original capacity of 13,0 %. This information gives an idea of the erosive processes that happen in the water basins and of the importance of its negative effects, especially on the useful life of each reservoir.

**Key words:** dams, sediment yields, Northwest, Argentine

## INTRODUCCIÓN

La importancia que reviste el tratamiento racional de las cuencas hídricas como unidad de manejo y sus efectos en los proyectos de obras hidráulicas, ha evidenciado la necesidad de incorporar nuevas técnicas que analicen y solucionen los inconvenientes causados por la degradación de dichas cuencas (Lopes, 1993; Morris y Fan, 1997; Bigarella y Mazuchowski, 1985; Silva, 2007).

Los relevamientos batimétricos de los embalses con fines hidroeléctricos constituyen un material de gran valor para evaluar los efectos erosivos que se están produciendo en las cuencas de aporte y proporcionan el conocimiento necesario para la adecuada planificación de sus operaciones como la

limpieza de descargadores de fondo, la estimación actual del volumen del embalse, la reconstrucción de las curvas de áreas-volumenes y el tiempo estimado para su total colmatación.

Asimismo, el estudio de las características granulométricas de los sedimentos acumulados aporta información del mecanismo de colmatación que están sufriendo (Carvalho, 1994, 2000).

Existen en el Noroeste Argentino un total de cinco embalses construidos para generación de energía eléctrica, además de otros usos complementarios, como regulación de caudales, riego, agua potable y turismo. Estos son los embalses de Río Hondo en Santiago del Estero, El Cadillal y Escaba en la Provincia de Tucumán (Figura 1) y los de Cabra Corral y El Tunal en la Provincia de Salta (Figura 2).

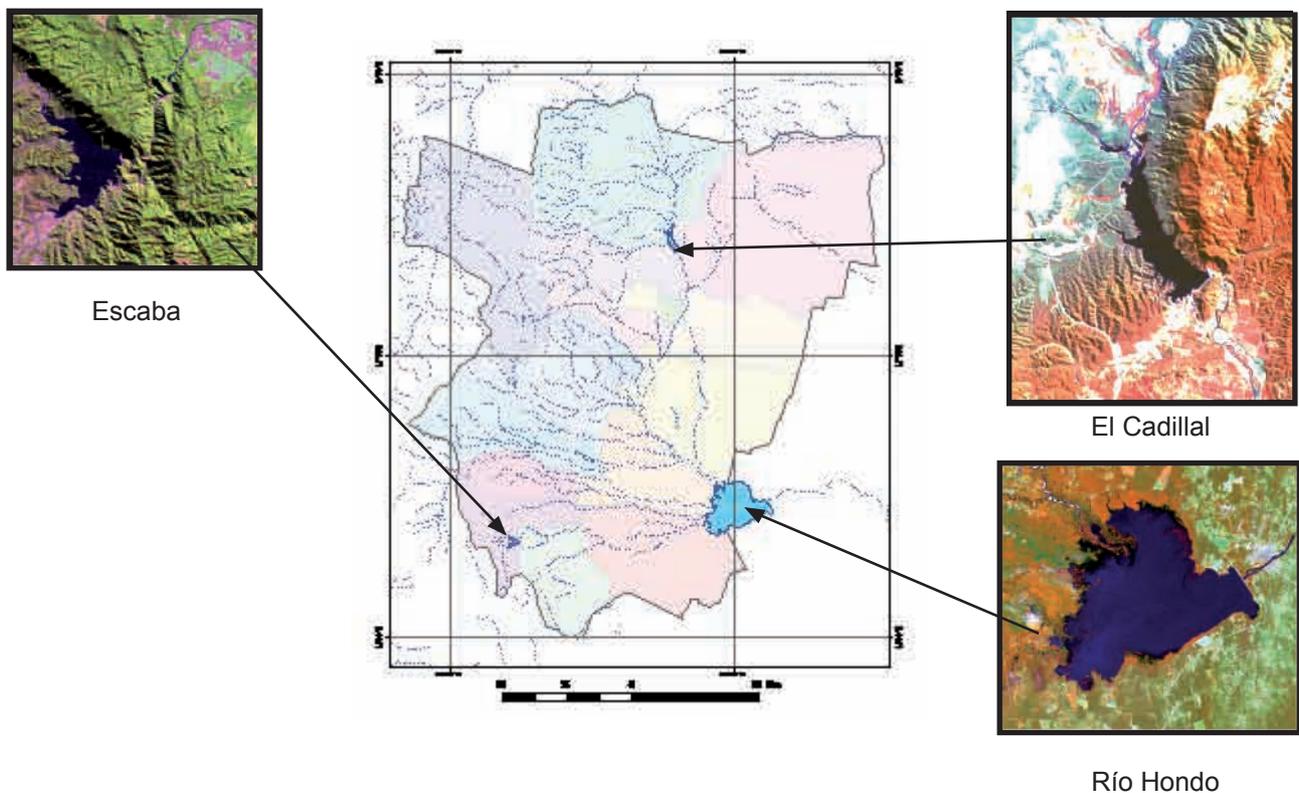


Figura 1. Ubicación de los embalses de Escaba, Cadillal y Río Hondo.

El dique de Río Hondo se encuentra ubicado sobre el río Dulce a aproximadamente 4 km aguas arriba de la localidad de Termas de Río Hondo, en el límite de las Provincias de Tucumán y Santiago del Estero, sitio de la confluencia del arroyo Matazambí y los ríos Salí, Chico, Gastona y Marapa. Su cuenca abarca una superficie de aproximadamente 19.625 km<sup>2</sup>. Las obras de construcción del dique se iniciaron en 1958, pero la puesta en funcionamiento de esta obra hidráulica se produjo el primero de enero de 1968 (Sec. Amb. y Des. Sustent de la Nación, 2006).

El embalse de El Cadillal se encuentra ubicado sobre el río Salí, aproximadamente a unos 21 km al norte de la ciudad de San Miguel de Tucumán. La obra fue inaugurada en 1966. Su cuenca posee una superficie de aproximadamente 4.700 km<sup>2</sup>, recibiendo además aportes de los ríos Vipos, Candelaria y Tala (Sec. Amb. y Des. Sustent de la Nación, 2006).

El embalse de Escaba se ubica en la confluencia de los ríos Singuil y Chavarría, a unos 130 km al sur de la ciudad de San Miguel de Tucumán y a 24 km al oeste de la localidad de Alberdi. La obra fue inaugurada en

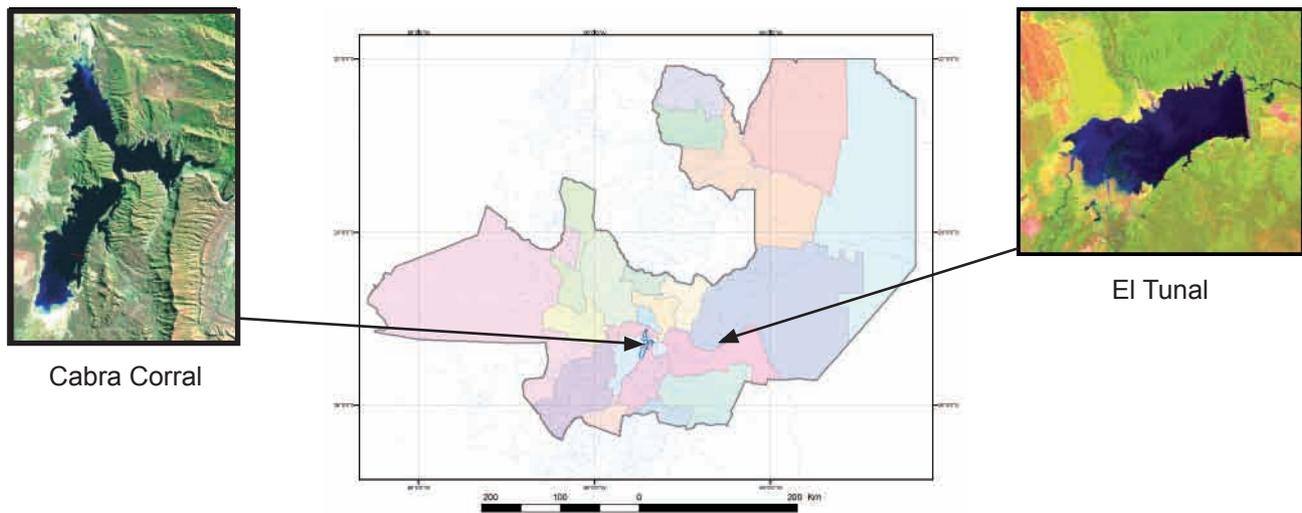


Figura 2. Ubicación de los embalses de Cabra Corral y El Tunal.

1949. Posee una cuenca de aproximadamente 900 km<sup>2</sup> de superficie, recibiendo además aportes de los arroyos El Chorro y Mora (Sec. Amb. y Des. Sustent de la Nación, 2006).

El embalse de Cabra Corral se encuentra ubicado en la confluencia de los ríos Guachipas, Rosario y Arenales, a unos 60 km al sur de la ciudad de Salta. La obra fue inaugurada en 1973. Su cuenca cubre

una superficie de 31.900 km<sup>2</sup> (Sec. Amb. y Des. Sustent de la Nación, 2006).

La presa de El Tunal está situada sobre el río Juramento, a aproximadamente a 200 km al sudeste de la ciudad de Salta. Este embalse regula la cuenca media del río Juramento, la que posee una superficie de 6.320 km<sup>2</sup>. Además desembocan directamente en el embalse los ríos Medina y San Ignacio (Sec. Amb. y Des. Sustent de la Nación, 2006).

Tabla 1. Condiciones iniciales de los embalses estudiados.

Embalse	Potencia generadora instalada MW	Fecha de cierre	Cota de máximo embalse (m.s.n.m.)	Volumen Útil inicial (hm <sup>3</sup> )	Superficie inicial (ha)
Río Hondo	17,5	Enero de 1968	274	1.658,0	29.563,3
El Cadillal	13,6	Febrero de 1966	607,50	287,2	1.229,2
Escaba	24,0	Septiembre de 1949	630	140,8	539,0
Cabra Corral	102,0	Julio de 1973	1.037	3.297,0	12.244,9
El Tunal	10,4	Julio de 1991	474	221,3	3.277,9

## METODOLOGÍA

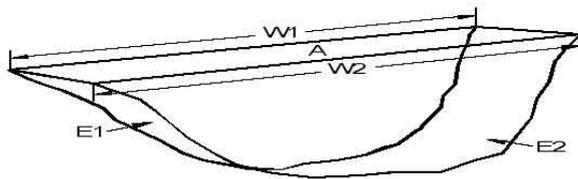
### La antigua metodología

Tradicionalmente los estudios batimétricos (Agua y Energía, 1976-1991 y EVARSA, 1993-1996) se realizaban registrando las posiciones y profundidades sobre una serie de transectas trasversales al cuerpo de agua, sobre puntos fijos preestablecidos en la costa de los embalses. A partir de dichas transectas se registraba el perfil del fondo a intervalos regulares utilizando algún sistema para la ubicación del punto (por ejemplo: estaciones totales, teodolitos,

distanciómetros) y una ecosonda u otro equipamiento para medir la profundidad (Núñez, 2006).

Los puntos de inicio y fin de las transectas tenían coordenadas conocidas, en un sistema de referencia determinado; esto, con el objeto de utilizar los mismos puntos cada vez que se realizara una nueva batimetría.

Una vez obtenidos los datos a campo, se utilizaba la ecuación de Eakin (Palmieri, *et al.* 2001) para el cálculo del volumen contenido entre las superficies (perfiles) de dos transectas consecutivas.



## Ecuación de Eakin

$$V = \sum \frac{A}{3} * \left( \frac{E1 + E2}{W1 + W2} + \frac{E1}{W1} + \frac{E2}{W2} \right)$$

donde:

**V**, volumen parcial entre las transectas consideradas;

**A**, es el área entre pares de transectas;

**W1, W2,.....Wn**, es la longitud de cada transecta batimétrica; y,

**E1, E2,.....En**, es la superficie del perfil batimétrico para cada transecta.

Calculados los volúmenes parciales, se procedía a realizar la sumatoria de los mismos para obtener el volumen total del embalse; también se calculaba la superficie del espejo de agua como la sumatoria de las áreas parciales.

El método de Eakin adolece del siguiente inconveniente: serían necesarias un sinnúmero de transectas para disponer de un modelo adecuado del fondo del embalse, sobre todo en embalses irregulares como por ejemplo el Cabra Corral (Figura 2). Por otra parte, si las transectas se encuentran muy distantes, no había registro de la situación del fondo del embalse entre aquellas. Tampoco se disponía de una línea de costa completa para todo el embalse, sino solo de algunos puntos sobre las transectas – próximos al inicio y final de cada una - registrados el día del levantamiento. Debe tenerse en cuenta que el método de Eakin se utilizaba debido a la inexistencia de equipamientos alternativos y la carencia de algoritmos con potencia de cálculo; inclusive, las mediciones de longitudes y áreas se realizaban con instrumental analógico, planímetros y curvímetros.

También sobre los datos colectados en las transectas se realizaba la comparación de las profundidades entre levantamientos batimétricos de diferentes fechas y de la situación inicial del embalse, pero eran solo para los sitios representados por los perfiles y los mismos se extrapolaban a todo el embalse.

### La nueva metodología

#### Modelo Digital de Profundidades

Para los embalses del noroeste argentino, los autores utilizaron por primera vez un software específico (IDRISI KILIMANJARO®) para la generación de Modelos Digitales de Profundidades – MDP – por interpolación de los datos batimétricos.

Para la interpolación de los datos batimétricos de campo se utilizó el método de la red irregular de triángulos TIN (*Triangulated Irregular Network*) – conocido también como *The Delaunay Triangulation* - para generar un modelo MDP en formato raster

con una resolución de 10 metros, algoritmo provisto por los software IDRISI KILIMANJARO® y Arc Map 9®. A partir de dicho modelo digital se obtuvieron las curvas de nivel del fondo del embalse y los datos para los cálculos de las superficies ocupadas y los volúmenes almacenados cada 10 cm.

Alvarez *et al.* (1991) para el estudio de monitoreo batimétrico en el embalse de Vigía (Portugal), realizaron una evaluación de diferentes métodos de interpolación de datos puntuales para la generación del MDP. Los métodos evaluados fueron:

- IDW (*Inverse Distance Weighted*), la *inversa de la distancia ponderada* (cuadrático o cúbico), con diferente número de vecinos y con radios de diversas dimensiones;
- Spline, *mínima curvatura* con la opción de 12 vecinos;
- TIN (*Triangular Irregular Network*), red irregular de triángulos y,
- el comando TOPOGRID de Arc/Info.

Para la evaluación de los diferentes métodos y la elección del más adecuado, los autores realizaron una valoración cruzada sobre una muestra del 10 %. Calculadas las superficies (MDP) se compararon los valores obtenidos – superficies - con los valores reales de la grilla utilizada durante el levantamiento batimétrico. Implicó asimismo la comparación de diferentes parámetros estadísticos: coeficiente de correlación de Pearson, error medio, error porcentual absoluto medio y error cuadrático medio. También fueron comparados los parámetros estadísticos descriptivos: promedio, mediana, desvío estándar, mínimo y máximo.

Los resultados obtenidos revelan que los métodos que mejor representan el relieve de fondo corresponden a TOPOGRID y TIN, mientras que para la generación de las curvas de nivel resultaron más adecuados los métodos TOPOGRID y Spline, por su capacidad para suavizar los contornos dando un aspecto más natural. Considerando además otras fuentes bibliográficas, en la Tabla 2 se presenta la comparación de los métodos TIN y GRID.

**Tabla 2. Comparación de los métodos de interpolación TIN y GRID.**

	TIN	GRID
Ventajas	Habilidad para describir la superficie a diferentes niveles de resolución; Eficiencia en el almacenamiento de datos.	Fácil de guardar y manipular; Fácil integración con bases de datos raster; Suavizado de apariencia más natural.
Desventajas	En algunos casos requiere una inspección visual y control manual de la red.	No es posible usar grillas de diferentes tamaños que permita reflejar la complejidad del relieve.

Fuente: Environmental Systems Research Institute, Inc.

A partir de las consideraciones referidas en la Tabla 2 y teniendo en cuenta que el método de registro batimétrico propuesto (espirales o rulos) no es una grilla ortogonal, el interpolador que más se ajusta a dicha distribución espacial es la red de triángulos irregulares – TIN – por su capacidad para representar el relieve a partir de una grilla irregular. Este método también fue utilizado por los autores en otros embalses de la región (Mosa y Núñez, 2005e, 2006b) y por otros autores (Vilhena *et al.* 2003) para la generación de MDP de embalses.

En base a estos resultados el interpolador TIN fue el utilizaron los autores para el método batimétrico basado en los espirales o rulos propuesto como forma de registro de las posiciones espaciales y de profundidad para la generación del MDP (Figura 3).

relieve del vaso del embalse El Tunal por la falta de datos entre las transectas.

**Tabla 3. Diferencia entre métodos para el embalse de El Tunal, para las transectas 2 y 3. (Ver Fig. 4).**

DIFERENCIA ENTRE LOS MÉTODOS	Volumen (hm³)	Diferencia (hm³)	Proporción de la diferencia
Método de Eakin	17,9		
Método del Modelo Digital de Profundidades	17,0	0,9	5,4

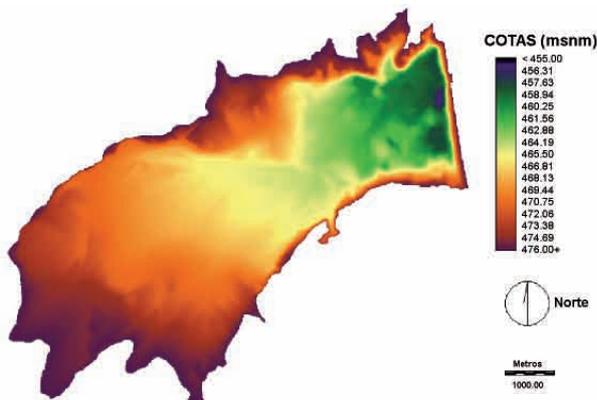


Figura 3. Modelo Digital de Profundidades (MDP) generado para el embalse El Tunal (Mosa y Núñez, 2005).

En el año 2005, los autores compararon también los métodos de Eakin y el MDP encontrando diferencias sustanciales entre ambos (Tabla 3). Dichas diferencias se deben a la pobre representación del

*El método de espirales o rulos*

Dadas las deficiencias observadas y evidentes en el método de las transectas (Eakin) para la estimación del volumen embalsado y las áreas ocupadas por cada plano de cota, se resolvió evaluar un nuevo método que permitiera el registro de posiciones y profundidades con una mejor distribución de los mismos en todo el espejo de agua y que resultase operativamente ejecutable a costos razonables. Además, con el método de espirales o rulos se pretende seguir las curvas de forma del valle embalsado con el objeto de registrar la mayor cantidad de variaciones en el relieve de fondo (Figura 4).

Por otra parte, la actual disponibilidad de equipamientos que permite el registro simultáneo y en tiempo real de la posición y la profundidad mediante la integración de GPS y ecosonda resuelve una serie de inconvenientes ya que se dispone de una gran cantidad de datos en formato digital con precisiones más que aceptables para los levantamientos batimétricos.

A diferencia del método de las transectas, los espirales o rulos permiten la comparación de la sedimentación en cualquier sitio del embalse ya que la interpolación genera un modelo cuasi continuo del fondo.

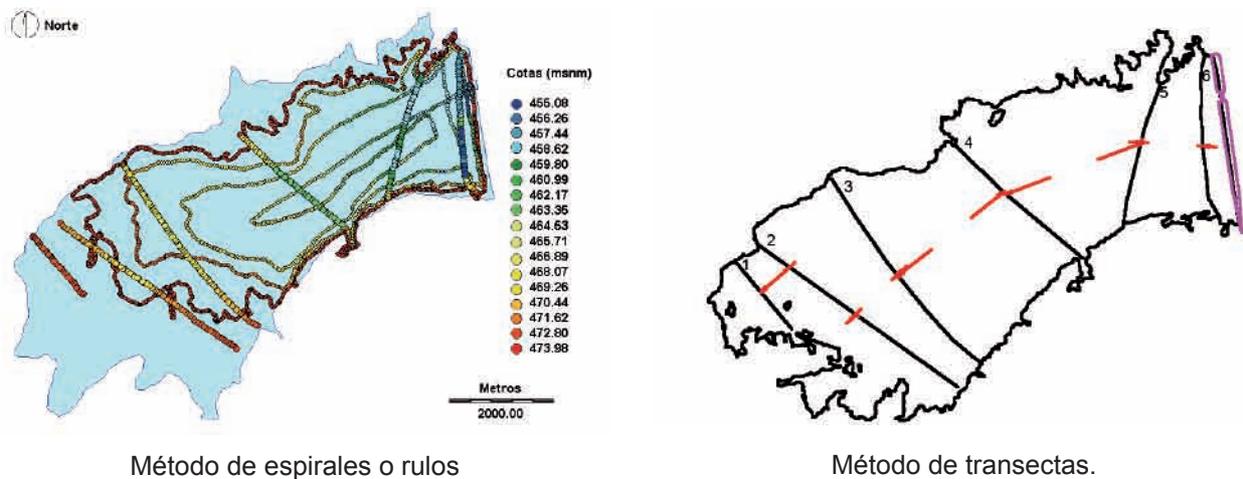


Figura 4. Comparación entre los métodos de transectas y rulos; a la derecha la distancias entre transectas establecidas para el embalse de El Tunal.

*El uso de la imagen satelital para el cierre del modelo*

Los autores utilizaron una imagen satelital georreferenciada para obtener la línea de ribera de los embalses para hacer el cierre de los MDP. Esta situación representa un avance significativo respecto a las formas tradicionales de cálculo. La información generada por la batimetría fue completada con el perillago obtenido de una imagen satelital actualizada, que provee la cota superior que

no estuvo relevada en los días de trabajo de campo. La ventaja de la utilización de los datos satelitales se basa en la información provista por la banda 4 de las imágenes satelitales LANDSAT 5 TM y 7 ETM+ utilizada; dicho canal radiométrico, correspondiente al primer infrarrojo cercano, permite un perfecto delineado de las costas (separación entre agua y tierra o vegetación), las que corresponden a una curva de nivel o cota precisa en función de la fecha de la imagen y de su resolución (Figura 5).

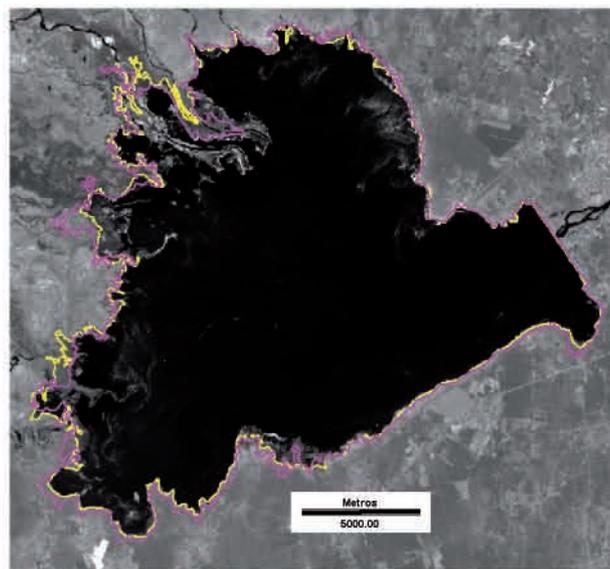


Figura 5. Superposición de la curva de 275 m.s.n.m. (en color magenta) tomada del levantamiento original del vaso del embalse de Río Hondo con la curva de 274,05 tomada de la imagen satelital LANDSAT 5 TM 230 079 - 25-MAY-2007-; de fondo se presenta el 1º infrarrojo cercano (banda 4). Obsérvese como la curva de 275 se superpone en varios sectores con la curva de 274,05 actual, debido al proceso de colmatación que sufre el embalse, principalmente en la formación de deltas en las áreas distales. Por este motivo, la cota 275 original no se utilizó para la estimación del volumen actual.

### Batimetría de los embalses

El equipo utilizado para el registro de las profundidades de cada embalse estuvo compuesto por una embarcación con motor fuera de borda, a la cual se le montó un ecosonda Navman Fish 4707 a 200 Khz de frecuencia, con transductor con haz de ultrasonido de 11° ajustada a diferentes profundidades y con una precisión de la medición del orden de 10 cm.

Para la ubicación espacial de las posiciones de registro batimétrico se usaron equipos GPS geodésicos marca GPSMAP 76CSx, con una precisión de hasta 0,03-0,05 m (en el 95 % de los casos) en planimetría en modo diferencial y que se caracteriza por el seguimiento y uso de 28 satélites en forma simultánea, determinando coordenadas, latitud, longitud, altitud, distancia entre puntos, rumbo de desplazamiento, velocidad y mapeo de puntos.

Para los análisis sedimentológicos las muestras fueron colectadas mediante una draga Eckman Birge de acero inoxidable y de 0,0625 m<sup>2</sup> (0,25 x 0,25 m) de superficie de boca.

Se trabajó en forma alternativa al antiguo modelo de levantamiento de transectas, realizando un levantamiento de posiciones espaciales y del fondo en forma de espiral o rulos de cada embalse para producir una grilla de puntos. Se registraron en forma simultánea los posicionamientos satelitales y las determinaciones ecográficas de la profundidad, cada 20 metros y a una velocidad constante de la embarcación de 1 nudo/hora (Figura 6).

Los planos topográficos (curvas de nivel) originales del estudio previo al llenado del vaso de cada embalse fueron vectorizados usando una tableta digitalizadora; dicha cartografía topográfica, fue considerada como la situación inicial. Cada entidad lineal fue caracterizada por su cota, como atributo, para la generación del MDP de la situación original. El MDP original fue obtenido con la misma metodología de interpolación (TIN) que permite trabajar también con contornos.

Para cada embalse, se obtuvieron un número variable de muestras de sedimentos situados a lo largo de cada transecta original de monitoreo de los embalses; la ubicación de las muestras fueron determinadas previamente por el organismo competente, el Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP) – Regional Norte. Luego de extraídas, se procedió a la eliminación de la materia orgánica de las muestras, utilizándose peróxido de hidrógeno a 20 volúmenes. Para separar las fracciones arenosas de la pelíticas se utilizó un tamiz de 230 micras. Las fracciones arenosas superiores a 0,062 mm se secaron en estufa y se pesaron a diez milésimas de gramos. Las fracciones pelíticas (partículas inferiores a 0,062 mm) se recogieron en probeta de 1.000 ml y se le agregó 50 ml de hexametáfosfato de sodio como electrolito peptizante, este se dejó actuar durante 24 hs; luego de este tiempo se procedió al retiro de la alícuota correspondiente a las fracciones arcillosas siguiendo la técnica del pipeteo según Krumbein y Pettijohn (1938). Con posterioridad se secaron en estufa y se pesaron, también a diez milésimas de gramo.

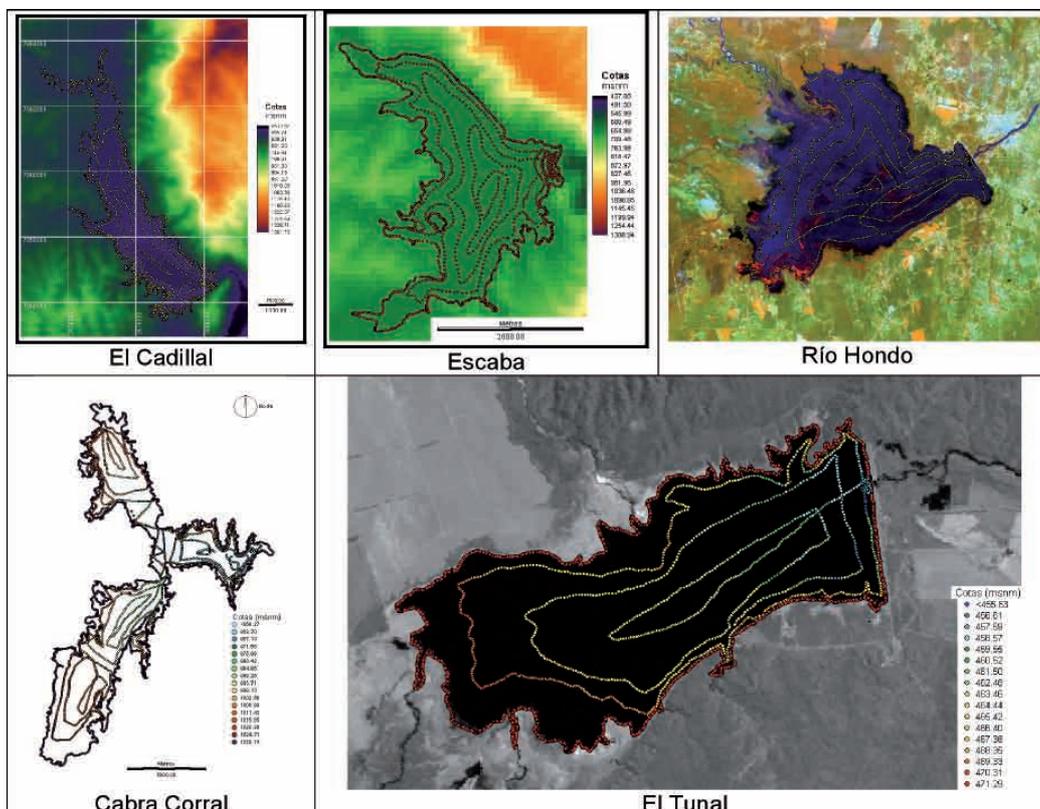


Figura 6. Navegación realizada en los distintos embalses.

En síntesis los pasos de la nueva metodología en la evaluación de los cálculos de los volúmenes de cada embalse, propuesta y desarrollada por los autores, se compone de los siguientes pasos:

- a. Georreferenciación de una imagen satelital a partir de puntos de campo, de coordenadas conocidas en un sistema de referencia determinado;
- b. Procesamiento de una banda del infrarrojo cercano (Ej. Banda 4 del satélite LANDSAT 5 TM o 7 ETM+) para obtener el perímetro del embalses en la fecha correspondiente a la imagen, dato de cota que se consulta a la empresa concesionaria de la presa;
- c. Programación de la navegación mediante la creación de rutas de navegación prefijadas que son incorporadas al GPS, con la correspondiente configuración, lo que permite repetir las mismas rutas en los diferentes levantamientos;
- d. Navegación de todo el espejo de agua, registrando las coordenadas y profundidades con intervalos regulares entre 10 y 40 m, según la resolución deseada (nivel del levantamiento y extensión del embalse). En el sector del descargador de fondo de la presa, se realiza un muestreo de detalle de las profundidades para conocer la colmatación en dicho sitio. Durante la etapa de campo se colectan también muestras de los sedimentos del fondo del embalse – en sitios preestablecidos – para su posterior análisis y presentación de resultados;
- e. Preprocesamiento y análisis de los datos colectados para la eliminación de puntos con posicionamiento dudoso o incorrecto y profundidades anómalas por comparación con las vecinas;
- f. Generación de un MDP - Modelo Digital de Profundidades – por interpolación y a partir de los datos de campo y del perímetro obtenido de la imagen satelital; la interpolación se obtiene utilizando el método TIN utilizando los software IDRISI KILIMANJARO® y Arc Map 9®. El MDP es generado con una resolución espacial de 10 m y con una resolución en profundidad de 10 cm;
- g. Cálculo de los volúmenes almacenados en el embalse para las cotas con equidistancia de 10 cm y de las superficies ocupadas por cada una de las cotas. Las cotas extremas consideradas son: la mínima como el nivel de base actual del embalse y, la máxima, al nivel superior por debajo del aliviadero; dicha cota corresponde al máximo nivel de generación de energía;
- h. Generación de las curvas de cota volumen y cota superficie para las situaciones original y actual. A partir de los datos de las cotas vs.

volumen y superficie, se obtienen la ecuaciones matemáticas mediante el software GRAPHER V 2.02® (con polinomios de grado 10) con un r de ajuste superior al 0,9999 %;

- i. Cálculo de las diferencias de volúmenes con respecto a la situación original y generación de la curva correspondiente.
- j. Comparación de diferentes perfiles (transectas) del embalse en las situaciones original y actual, para conocer la evolución de la sedimentación en diferentes sitios – pérdida de la capacidad de embalsar agua – que afecta a la generación de energía, la disponibilidad de agua para riego y a la vida útil del embalse.
- k. Análisis de las muestras de sedimentos, que fueran colectadas durante el levantamiento de campo, para determinar: contenido y porcentaje de humedad; contenido y porcentaje de materia orgánica; y, la granulometría - contenido y porcentaje de arena, contenido y porcentaje de limo y, contenido y porcentaje de arcilla. Con esta información, se preparan tablas que caracterizan los diferentes tipos de sedimentos y su distribución en el embalse.
- l. Preparación del informe final del estudio, con los resultados y las correspondientes recomendaciones. Como parte de los anexos se presenta un mapa topográfico – curvas de nivel –y el MDP del embalse.

## RESULTADOS

Las tareas desarrolladas posibilitaron reconocer la capacidad y superficie de cada embalse, la identificación de los espesores de sedimentos acumulados como así también donde se distribuyen. Por otra parte, el levantamiento más detallado efectuado en las proximidades de la presa, permitió establecer la relación entre el fondo del embalse y las obras de toma.

### **Cálculo del volumen actual, sedimentos acumulados y tasas de reducción de cada embalse**

En la Tabla 4 se puede apreciar el cálculo de las capacidades de los embalses, el volumen de los sedimentos acumulados y las tasas de reducción porcentual en volumen desde su inauguración.

Existe una gran variación en los cálculos en cuanto a la reducción de su volumen útil según las distintas batimetrías realizadas (Tabla 4). Secuencialmente hasta el año 2005, mostraban los embalses una progresiva colmatación en base a los cálculos realizados con la vieja metodología de estimación de cálculo mediante transectas, pero a partir de dicho momento y en virtud de las nuevas herramientas y metodologías propuestas y ejecutadas por los autores, los volúmenes embalsados se re-estimaron con estimaciones que hicieron que en todos los

casos, los mismos sean muy superiores a los estimados hasta ese momento; es decir que el proceso de sedimentación en los embalses era muy inferior a los estimados anteriormente.

**Tabla 4. Capacidad de los distintos embalses y las reducciones por sedimentación para diferentes años.**

<b>Embalse de Río Hondo</b>					
<b>Año</b>	<b>Volumen total (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen de sedimentos (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Aportes de sedimentos (hm<sup>3</sup>/año)</b>	<b>Reducción Volumen (%)</b>	<b>Reducción Anual Volumen (%)</b>
1968	1.658,0	---	---	---	---
1985	1.426,0	232,0	13,65	14,0	0,823
1992	1.287,0	371,0	19,86	22,4	1,198
1995	1.280,0	378,0	2,33	22,8	0,141
1997	1.272,3	385,7	3,85	23,3	0,232
2001	1.442,2	215,8	-42,48	13,0	-2,562
2003	1.334,9	323,1	53,66	19,5	3,236
2005*	1.468,4	189,6	5,12	11,4	0,309
2006*	1.460,0	198,0	8,42	11,9	0,508
2007*	1.443,1	214,9	16,88	13,0	1,018

<b>Embalse de El Cadillal</b>					
<b>Año</b>	<b>Volumen total (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen de sedimentos (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Aportes de sedimentos (hm<sup>3</sup>/año)</b>	<b>Reducción Volumen (%)</b>	<b>Reducción Anual Volumen (%)</b>
1966	302,0				
1976	284,0	18,0	1,80	6	0,600
1984	247,0	55,0	4,63	18,2	1,525
1988	241,0	61,0	1,50	20,2	0,500
1992	227,0	75,0	3,50	24,8	1,150
1995	223,0	79,0	1,33	26,2	0,467
1997	216,8	85,2	3,10	28,2	1,000
2001	192,0	110,0	6,20	36,4	2,050
2005*	190,9	111,1	2,85	36,8	0,944

<b>Embalse de Escaba</b>					
<b>Año</b>	<b>Volumen total (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen de sedimentos (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Aportes de sedimentos (hm<sup>3</sup>/año)</b>	<b>Reducción Volumen (%)</b>	<b>Reducción Anual Volumen (%)</b>
1949	144,2				
1979	134,1	10,1	0,34	7,0	0,233
1988	129,2	15,0	0,54	10,4	0,378
1992	127,7	16,5	0,38	11,4	0,260
1995	126,2	18,0	0,50	12,5	0,347
1997	115,1	29,1	5,55	20,2	3,850
2001	116,8	27,5	-0,41	19,0	-0,285
2005*	114,0	30,2	0,54	20,9	0,374

Embalse de Cabra Corral					
Año	Volumen total (hm <sup>3</sup> )	Volumen de sedimentos (hm <sup>3</sup> )	Aportes de sedimentos (hm <sup>3</sup> /año)	Reducción Volumen (%)	Reducción Anual Volumen (%)
1973	3.297,0	---			
1977	3.213,8	83,2	20,80	2,5	0,625
1983	3.148,7	148,3	10,85	4,5	0,333
1991	2.913,0	384,0	29,46	11,6	0,888
1995	2.900,0	397,0	3,25	12,0	0,100
2001	2.903,9	393,1	-0,65	11,9	-0,017
2005*	2.784,3	512,7	16,02	15,6	0,488

Embalse de El Tunal					
Año	Volumen total (hm <sup>3</sup> )	Volumen de sedimentos (hm <sup>3</sup> )	Aportes de sedimentos (hm <sup>3</sup> /año)	Reducción Volumen (%)	Reducción Anual Volumen (%)
1991	230,0	---			
1996	192,6	37,4	7,48	16,3	3,260
2001	156,8	73,2	7,16	31,8	3,100
2005*	174,9	55,1	3,94	24,0	1,711

\*Estimaciones a partir de la nueva metodología.

La reducción del volumen debido al aporte de los sedimentos tiene tasas anuales de reducción muy diferentes para cada embalse. Esta reducción está en relación directa a la cantidad de años de antigüedad del embalse, la capacidad de embalsar agua y los aportes anuales de sedimentos. Así puede observarse que las tasas de reducción anual de sus volúmenes varían entre 0,31 y 1,71 % (Tabla 4).

Esta discrepancia fue resuelta por el ORSEP-Regional Norte -, organismo competente en la fiscalización de los embalses en Argentina, estableciendo un nuevo punto de inicio en las estadísticas de embalsado a partir del uso de la nueva metodología propuesta por los autores, la que fue oficialmente adoptada por esta institución a partir de dicho momento.

### Morfología de los depósitos

Los efectos de la sedimentación aparecen con claridad en los planos batimétricos generados, pues los rasgos morfológicos de los antiguos valles fluviales han sido parcialmente borrados por los depósitos acumulados.

La acumulación de sedimentos de cada embalse se produce principalmente en el área de aporte de los ríos afluentes mediante la formación de deltas provocando una reducción de sus superficies y la que está directamente relacionada con la profundidad

de los valles; esta acumulación en estos sectores es principalmente por la fracción arena de los sedimentos arrastrados, y que está constituido por partículas de tamaño superiores a 62 micras. Los embalses construidos en valles profundos, como Cabra Corral y Escaba, tienen una menor reducción de sus superficies debido a que la mayor parte de los sedimentos acumulados quedan retenidos en el fondo de los valles fluviales los que son muy profundos. En cambio los embalses ubicados en áreas de pedemonte o en llanuras, como Río Hondo, El Cadillal y El Tunal, al ser en promedio menos profundos, los sedimentos acumulados en sus deltas, reducen en forma acelerada la pérdida de superficie del espejo del agua (Tabla 5).

La distribución actual de los sedimentos en cada embalse permite reconocer que el avance de los deltas produjo importantes modificaciones en las partes distales, comprobables al contrastar la planimetría original con la morfología actual. El crecimiento general de dichos deltas se produce en una franja coincidente con la dirección primitiva de la corriente (Fig. 5). Además, la pérdida de la capacidad de transporte de la corriente fluvial al cesar el régimen turbulento al llegar al embalse, también modificó el patrón de sedimentación también aguas arriba de las desembocaduras depositando los granos gruesos en el cauce antes de su ingreso al reservorio.

**Tabla 5. Reducción de las superficies en los distintos embalses.**

Embalse	Superficie original(ha)	Superficie actual(ha)	Reducción superficie (%)
Río Hondo	29.563,3	25.297,4	14,43
El Cadillal	1.229,2	990,6	19,41
Escaba	539,0	497,6	7,77
Cabra Corral	12.244,9	11.721,8	4,30
El Tunal	3.277,9	2.748,3	16,15

La morfología de los depósitos en el sector medio de cada embalse se caracteriza por achatar el relieve preexistente y conformar una superficie de sedimentación de suave pendiente, homogéneamente distribuida y que está constituido por partículas de tamaño inferiores a 62 micras que representan a limos gruesos.

La fracción granulométrica predominante en el sector proximal a los diques de cada embalse, está conformada a su vez por sedimentos menores a 32 micras, que representan a limos finos y arcillas. Estos depósitos finos cubren el fondo de los valles fluviales, sin llegar a ocupar aún la zona de taludes.

#### La erosión a nivel de cuenca

La evaluación de los depósitos acumulados en los embalses estudiados es el resultado final de la degradación ocurrida en las cuencas de alimentación.

En la Tabla 6 se puede observar el grado de aporte de sedimentos provenientes de sus cuencas para cada embalse. Este aporte, medido como unidad de volumen por superficie y tiempo ( $m^3/ha/año$ ), indica claramente que cuatro de los cinco embalses estudiados reciben, en promedio, la misma cantidad de sedimentos, unos 0,5-0,6  $m^3/ha$  anuales, salvo el embalse de Río Hondo que recibe un aporte menor de sedimentos.

La explicación de dicha diferencia radica en que el embalse de Río Hondo, tiene dos de sus cinco afluentes, regulados aguas arriba; el río Salí por el embalse de El Cadillal, y el río Marapa por el embalse de Escaba, mientras que el resto de sus ríos afluentes (Gastona, Chico y Matazambi), poseen pequeñas cuencas imbríferas; ambos embalses retienen el 74,2 % de los sedimentos que recibiría este embalse sino estuvieran construidos aguas arriba de su cuenca. En cambio, el resto de los embalses no poseen este tipo de regulación, recibiendo por ello, una mayor cantidad de sedimentos.

**Tabla 6. Estimación del aporte de sedimentos desde las cuencas imbríferas en cada embalse y tiempo remanente hasta su total colmatación.**

Embalse	Superficie de la cuenca (ha)	Tiempo transcurrido desde su inauguración (años)	Aporte de sedimentos de la cuenca ( $m^3/ha/año$ )	Tiempo estimado para su total colmatación (años)
Río Hondo	1.962.500	39,4	0,389	303,2
El Cadillal	470.000	39,6	0,518	107,6
Escaba	90.000	56,0	0,599	267,9
Cabra Corral	3.190.000	31,8	0,505	204,1
El Tunal	632.000	13,8	0,531	57,6

En base a la tasa de reducción anual del volumen embalsado se puede proyectar el tiempo estimado para la total colmatación de cada embalse (última columna de la Tabla 6). Dicho tiempo se debe tomar sólo como una medida indicativa de la pérdida total de la capacidad de retención de agua, pero hay que contemplar que la vida útil de un embalse se considera en función del objetivo con el cual fue construido; si se considera que el fin es la producción de energía, la vida útil se reduce al momento en que

los sedimentos llegan a cubrir las bocas de toma de agua para las turbinas de generación y éste momento es considerablemente menor al estimado como vida útil final.

El proceso erosivo se produce en la totalidad de las cuencas imbríferas de los embalses, por lo tanto, todo estudio dirigido a controlar y atenuar sus efectos debe ser planeado integralmente, ya sea referido a los parámetros físicos como a los efectos antrópicos.

La construcción sistemática de obras que conduzcan al control de los procesos erosivos, con el propósito de incrementar la vida útil de cada embalse, las mismas deberán comprender las particularidades fisiográficas de cada cuenca de aporte y debe tener un orden de ejecución de las tareas; comenzando por la corrección de las cabeceras, luego las gargantas, cauces, bajadas y por último en la zona del cauce principal. Este tipo de trabajo, pueden comprender obras de arte como muros de piedra, fajnadas, empalizadas, gaviones y diques desarenadores. Estas modificaciones deberán tener como objetivo reducir la escorrentía superficial, inducir la infiltración, disminuir las pendientes e incrementar la rugosidad, todo lo cual llevará una mayor estabilidad de los suelos, con el consiguiente beneficio para el arraigo de la vegetación.

Además hay que tener en cuenta que estos sedimentos acumulados provienen de regiones donde la actividad agrícola es de tipo intensiva, siendo imprescindible evitar las pérdidas por erosión hídrica mediante la protección con vegetación de los drenajes principales y de la aplicación de técnicas y medidas para el manejo de los suelos. Dichas medidas deben involucrar a los productores, tanto agrícolas como ganaderos, mediante programas de concientización e incentivos por parte de organismos oficiales.

## REFERENCIAS

Alvarez M. A., Fernandes S., Mariano A. C., Pimenta M. T. y Verissimo M. R. 1991. *Monitorização batimétrica em albufeiras*. ESIG 2001. Sao Paulo, pp.1-11.

ARCMAP 9.3. ESRI Corporate, Redlands, CA, USA

Bigarella J. J. y Mazuchowski J. Z. 1985. *Visão integrada da problemática da erosão*. Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Maringá. Anais. Marília: ABGE, Vol 3, pp. 327-332.

Carvalho N. O. 1994. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais CRPM, ELETROBRAS, Brasil.

Carvalho N. O. 2000. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, Brasil.

Chaparría, V. E., Aguilar Herrando J., Serra Peris J. y Medina Folgado J. R. 1995. *Levantamientos y seguimientos topo-batimétricos en ingeniería de costas*. Ingeniería del Agua. Vol. 2 Num. Extraordinario. Laboratorio de Puertos y Costas E.T.S.I C.C.P. Valencia, España.

Environmental Systems Research Institute, Inc. [www.ian-ko.com/resources/triangulated\\_irregular\\_network.htm](http://www.ian-ko.com/resources/triangulated_irregular_network.htm)

GRAPHER v2.02. Alentum Software, Inc. Glen Allen, VA, USA

IDRISI KILIMANJARO v14.02. Clark Labs, Clark University, Worcester MA, USA

Krumbein W. C. y F. J. Pettijohn. 1938. *Manual of Sedimentary Petrography*. New York.

Lopes A. V. 1993. *Aplicação de métodos de previsão de assoreamento de reservatórios*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP,

Morris G. L. y Fan J. 1997. *Reservoir sedimentation handbook: desing and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. McGraw-Hill. New York.

Palmieri A., F. Shah y Dinar A. 2001. *Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams*. Journ. Environm. Manage. Vol 61 2, pp. 149-163

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 2006. [www.ambiente.gov.ar](http://www.ambiente.gov.ar)

Silva Alves da S. 2007. *Avaliação do assoreamento do Lago Bonsucesso, Jataí – GO*, Dissertação Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Geologia - Curitiba, Brasil.

Vilhena R. M., Roig H. L. y Meneses P. R. 2003. *Determinação do assoreamento de reservatório utilizando técnicas de geoprocessamento, o caso do reservatório de Funil – RJ*. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte-MG, CD-ROM, pp. 2649-2651.