

## XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA

### ABANICO DE MODELOS PARA PREDECIR LA SEDIMENTACION EN RESERVORIOS

Pablo Adrián Tarela  
Instituto Nacional del Agua (INA), Buenos Aires, Argentina ([ptarela@fi.uba.ar](mailto:ptarela@fi.uba.ar))

#### RESUMEN

Se presenta una visión general del proceso de sedimentación en reservorios y sus efectos ambientales. El objetivo del trabajo es describir brevemente las herramientas de cálculo disponibles para determinar el impacto del proceso de sedimentación. Se presentan los métodos empíricos tradicionales y algunas experiencias de campo y laboratorio. Luego se describe un conjunto de modelos matemáticos 1D, 2D y 3D. Se explican sus ventajas y desventajas.

Se concluye que el estado del conocimiento actual permite abordar esta problemática mediante la simulación numérica, preferentemente a través de modelos 1D o 2D. La aplicación de modelos 3D es todavía computacionalmente costosa, a la vez que requiere una gran base de datos. Los métodos empíricos resultan útiles en una evaluación preliminar.

#### ABSTRACT

A general view of the reservoir sedimentation process and their environmental effects is presented. The objective of the paper is to briefly describe the available calculation tools to assess the sedimentation impact. The traditional empirical methods and some laboratory and field experiences are presented. Then, a set of 1D, 2D and 3D mathematical models are described. Their advantages and disadvantages are explained.

As a conclusion, the state of the art allows to approach the problem through numerical simulation, preferably using 1D or 2D models. The application of 3D models is still computationally expensive, and a large amount of data is required. The empirical methods are useful in a preliminary evaluation.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Descripción general del proceso de sedimentación en reservorios

Un río es, esencialmente, un sistema que transporta agua, sedimentos y biomasa, de forma tal que, si se construye una presa en su curso, se produce un corte abrupto de la capacidad de transporte. El agua tiende a acumularse, los sedimentos a depositarse y la biomasa a transformarse.

En la zona donde el río vierte sus aguas al reservorio, denominada boca o cabecera, el incremento de la sección de flujo produce la disminución de la fuerza de arrastre ejercida sobre las partículas del lecho, de forma tal que el material grueso (arena) tiende a depositarse, formando un delta (ver figura 1). La forma y localización del delta depende de diversos factores: pendiente del valle, longitud del reservorio, tamaño y distribución del sedimento, forma del cauce, operación del reservorio, caudal líquido y sólido, etc. Además, el delta crece en ambas direcciones (aguas arriba y aguas abajo de la cabecera), y puede estar sumergido parcial o totalmente. Cuando el delta está superficialmente expuesto, se desarrollan uno a varios canales de flujo, dependiendo del nivel de embalse, el caudal entrante y las características del sedimento. En general, cuando aumenta el caudal se forma un solo canal, en lugar de diversos brazos (Sloff 1991). De todas formas, la predicción de estos procesos es extremadamente difícil.

En la parte del delta donde el río penetra en el reservorio tiene lugar un flujo de transición entre las condiciones netamente fluviales y las del reservorio, y la carga de fondo se acumula formando la cola del delta. La pendiente en esta zona es alrededor del 50 al 66% de la pendiente original, permaneciendo aproximadamente constante durante el crecimiento del delta (que, entonces, se eleva en capas paralelas). A una cierta distancia la cola se continúa abruptamente en el frente del delta, cuya pendiente es del orden de 6.5 veces la pendiente de la cola. A partir de experimentos, Schalchli (1987) concluye que (sin corrientes de turbidez) el frente se vuelve más empinado, hasta alcanzar cierto ángulo. Las variaciones estacionales fuertes en el nivel de embalse pueden ocasionar la formación de múltiples frentes. De todas formas, en la parte expuesta del delta tiene lugar la acción local de olas y la corriente litoral, que tienden a suavizarlos. A menudo, las áreas más elevadas se cubren de vegetación, previniendo la circulación de agua e incrementando la evapotranspiración.

La progresiva reducción de la turbulencia produce que las partículas más finas (limo y arcilla) se depositen aguas abajo del delta, incluso llegando hasta la presa, formando los depósitos de fondo (ver figura 1). Estos están más esparcidos por el reservorio, acumulándose en capas que tienden a consolidarse en el tiempo, debido a la acción de la sobrepresión ejercida por las capas superiores y la columna de agua, formando un fondo denso difícil de erosionar. El transporte del sedimento fino depende principalmente de la circulación de agua, que en el reservorio está manejada, mantenida y amplificada por el flujo entrante desde el río. Eventualmente, una concentración elevada de material fino es capaz de inducir el desarrollo de una corriente de turbidez, que puede alcanzar la presa y formar un depósito o lago de lodo en la zona del volumen muerto del reservorio (ver figura 1).

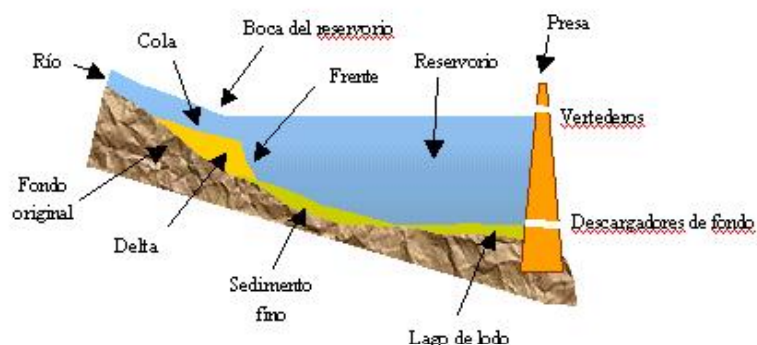


Figura 1 – Esquema del proceso de sedimentación en un reservorio.

## 1.2 Efectos sedimentológicos de la presencia de la presa

La construcción de la presa produce una drástica modificación del sistema preexistente, incluyendo tanto el balance hidrosedimentológico como el biológico. En particular, el proceso global de sedimentación en reservorios genera efectos directos de interés multidisciplinario: ingenieril, operacional, ambiental, económico, regulatorio y legal. Ellos requieren ser evaluados, predichos y manejados correctamente, con el fin de que el emprendimiento sea sustentable. Entre los principales efectos se tienen:

- Pérdida de capacidad de almacenamiento
- Acumulación de sedimentos aguas arriba del reservorio
- Menor capacidad de control de crecidas y niveles de agua en el río aguas
- Erosión y modificación del curso aguas abajo de la presa
- Afectación de las obras de ingeniería
- Modificación de la morfología de estuarios y deltas
- Impacto ambiental:
  - o *Modificación de la calidad de las aguas*
  - o *Acumulación de tóxicos en los sedimentos suspendidos y depositados*
  - o *Influencia sobre la eutroficación*
  - o *Influencia sobre la vida acuática*
  - o *Recreación*

El primero de los puntos señalados es de vital importancia desde el punto de vista ingenieril. A medida que las partículas se depositan en el fondo del embalse, el vaso hidráulico pierde volumen disponible para almacenamiento de agua a expensas de la ocupación por parte del sedimento. Este proceso ocasiona la colmatación progresiva del embalse, reduciendo la vida útil de la obra, cuyo cómputo es un parámetro de diseño primordial.

En general, la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua puede tener efectos económicos tanto de corto como de largo plazo. Hacia el año 1948, se estimó que, solamente en EE.UU., los daños anuales alcanzaban los \$ 50 millones (Graf 1983), con un volumen depositado del orden de los 1200 hm<sup>3</sup> a mediados de los años sesenta. A fines de esa década, teniendo en cuenta principalmente reservorios para generación de electricidad, la tasa media anual de sedimentación (medida en términos de la capacidad útil) se calculó en 1.71% para Japón, 1.16% en EE.UU., 0.57% en la India y 4.51% en China (Wada 1994). Para el año 1975, el análisis de más de mil reservorios en EE.UU. determinó una pérdida promedio anual del orden del 0.2% de la capacidad total (Graf 1984). En Brasil, donde el 95% de las presas está destinada a la generación de energía eléctrica, se estima una pérdida anual del 0.5% del volumen útil debido al ingreso de sedimento en los reservorios (Mendiondo 1998). Otras estimaciones indican una tasa de pérdida media anual de alrededor del 1% de la capacidad mundial instalada (Sloff 1997). En forma particular, algunos reservorios presentan una tasa de pérdida de capacidad mayor: el reservorio Sanmenxia en China pierde alrededor del 1.7% anualmente, el reservorio Sefid-Rud en Irán alrededor del 2% y el reservorio Welbedacht en Sudáfrica alrededor del 5%. La severidad del problema ha sido confirmada por un informe del Banco Mundial, que estima la pérdida de capacidad global en alrededor de 50.000 hm<sup>3</sup>, o su equivalente en costos de reemplazo, \$ 6.000 millones anuales (Fan y Springer 1993).

Si el reservorio es utilizado para generar hidroelectricidad, la disminución en la capacidad de almacenamiento puede ser medida directamente en términos de una reducción neta de potencia. En el caso en que el reservorio también sea utilizado para controlar crecidas, se puede incrementar la frecuencia y magnitud de los daños por crecidas, tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa, debido a la pérdida de volumen para alojar los excedentes. Además, el menor volumen disponible ocasiona que parte del agua que podría ser utilizada para riego se pierda por los vertederos, al no poder ser almacenada en las épocas de crecida del río.

Por otra parte, y referido al último de los puntos anteriormente enumerados, la calidad del agua en el embalse se ve afectada por la descarga de residuos orgánicos

biodegradables, nutrientes provenientes de aguas residuales, contaminantes provenientes de fuentes difusas (de origen agrícola), lluvia ácida (producida por contaminantes atmosféricos como  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) y tóxicos industriales o de uso en agricultura, entre otros (Jorgensen y Vollenweider 1989). En particular, el comportamiento hidrofóbico de químicos orgánicos y metales pesados produce la adsorción de estos elementos en los sedimentos cohesivos y materia orgánica que se encuentran suspendidos en la columna de agua. Estas partículas tienden a depositarse en el lecho, acumulando las sustancias tóxicas. Por lo tanto, el transporte de los agentes contaminantes mencionados está fuertemente ligado al comportamiento de los sedimentos en suspensión.

Además, debido a la construcción de la presa, el transporte de fondo es eliminado y la carga suspendida disminuye. Las erogaciones hacia aguas abajo de la presa están compuestas por fracciones más finas que las originales. La disminución en el suministro de limo y arcilla significa que el agua contiene menos nutrientes, afectando la vida acuática.

De lo anteriormente expresado se desprende que muchos de los problemas que aparecen por la construcción de la presa están ligados al proceso de sedimentación. Queda claro, entonces, que *la predicción del fenómeno* resulta ser de sumo interés para diferentes sectores. Esto ha llevado al desarrollo de distintas técnicas de cuantificación, de diverso grado de complejidad y precisión, un compendio de las cuales se cita a continuación.

## **2. ANTECEDENTES EN LA CUANTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

### **2.1 Métodos empíricos**

Los primeros métodos desarrollados para predecir la sedimentación en un reservorio han sido los empíricos, basados en datos de campo. Su precisión es baja, su aplicabilidad usualmente reducida (por ejemplo, para cierto tipo de reservorio) y sólo permiten obtener una primera aproximación para las primeras décadas de sedimentación. Su ventaja radica en que se pueden utilizar a partir de un conjunto mínimo de parámetros globales del reservorio.

La primera magnitud que contemplan los métodos empíricos es la eficiencia de atrape, definida como el porcentaje del sedimento entrante al reservorio que es retenido en el mismo. Depende principalmente de las características de la cuenca de aporte, la entrada de agua y sedimento, el almacenamiento del reservorio (dimensión, configuración, período de retención, etc.) y la descarga de agua y sedimento.

Los métodos más utilizados son los de *Brune* (1953) y *Churchil* (1948). Utilizando datos de 44 reservorios normalmente llenos, Brune obtuvo la relación mostrada en la figura 2. La eficiencia de atrape está dada en función del cociente entre la capacidad del reservorio y el caudal medio anual entrante. Para grandes reservorios, la eficiencia de atrape tiende a ser del 100%, esto es, todo el sedimento es retenido, mientras que para reservorios pequeños ocurre lo contrario, y el material tiende a pasar la barrera que forma la presa. De las curvas que envuelven a la media (central) la izquierda está asociada a sedimento grueso, y la derecha a sedimento fino. Se observa, entonces, la tendencia general a retener un mayor porcentaje de gruesos que de finos.

Churchill (1948) presentó las curvas mostradas en la figura 3, donde se cuantifica el porcentaje de sedimento entrante que atraviesa el reservorio, en función del índice de sedimentación. Este último se define como el cociente entre el período de retención (cociente entre la capacidad del reservorio y el caudal medio diario entrante al mismo) y la velocidad media a través del reservorio. Este método es más aplicable a reservorios de retención de limo o semisecos que el de Brune, y debe utilizarse para períodos superiores al año.

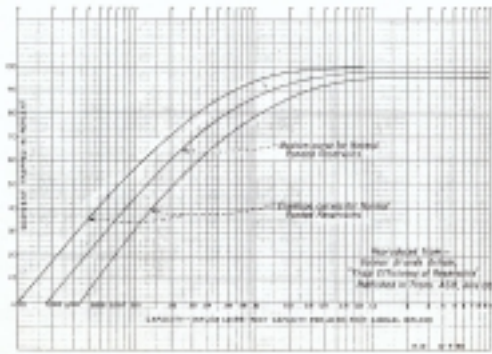


Figura 2 – Curva de atrape de sedimento de Brune.

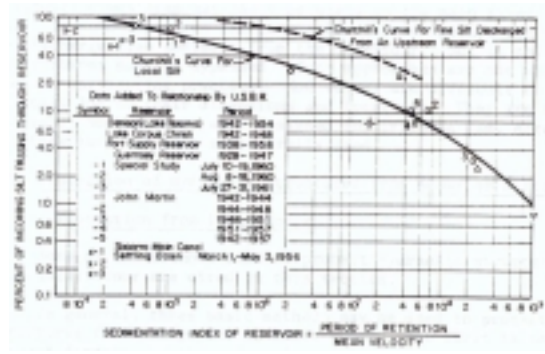


Figura 3 – Curva de sedimento pasante de Churchill.

Basado en datos de 15 reservorios, *Brown* (1944) produjo una serie de curvas en donde la eficiencia de atrape se da en función del cociente entre la capacidad de almacenamiento original y el área de la cuenca de aporte. Algo más contemporáneo, el trabajo de *Chen* utiliza el concepto de eficiencia de atrape en función del cociente entre el área de la cuenca y el caudal erogado, pero haciendo una discriminación por tamaño de grano (Graf 1984). Comparado con los métodos de Brune y Churchill indica que estos últimos tienden a subestimar la eficiencia de atrape para sedimento grueso y sobreestimarla para sedimento fino.

Además de los métodos gráficos existen fórmulas analíticas que permiten estimar la eficiencia de atrape y el volumen depositado. Por ejemplo, en el *método de Einstein* (1965) se determina la eficiencia de atrape en función de la profundidad local, la velocidad de caída de las partículas de un dado tamaño y algunos parámetros geométricos del reservorio. El *método de Buttlig y Shaw* (1973) relaciona la pérdida porcentual anual de capacidad con el cociente entre la capacidad y el área de la cuenca de captación. Se encontró una tendencia hacia una menor pérdida en los reservorios con menores valores de la relación capacidad-área de captación. La misma tendencia se observó para los reservorios más grandes y los más pequeños (Graf 1984). El *método de Rooseboom* (1975) permite calcular el volumen de sedimento depositado como función del tiempo. Está basado en datos de reservorios de EE.UU. y Sudáfrica. El *método de Gill* (1978) combina los resultados de Brown y Brune para obtener fórmulas analíticas para la eficiencia de atrape. Incluye el efecto de compactación del fondo, para lo cual emplea el *método empírico de Lane y Koelzer* (Borland 1971).

Por su parte, la predicción de la distribución de los depósitos mediante técnicas empíricas es un procedimiento inexacto. Cristofano (1953) y Borland y Miller (1958) desarrollaron el *método (geométrico) de incremento de área*, que establece que el volumen ocupado por sedimento se incrementa en capas horizontales sucesivas, cuyo espesor depende del volumen del material depositado y el área horizontal determinada por la curva topográfica de nivel correspondiente a la altura de la nueva capa. Los mismos autores produjeron el *método de reducción de área*, en este caso utilizando unos 30 reservorios de EE.UU. para obtener relaciones entre el porcentaje de material depositado y el porcentaje de profundidad, tal como presenta la figura 4. En general produce mejores resultados que el método anterior, aunque son de esperar desviaciones importantes respecto de las observaciones. No tiene en cuenta las características de los sedimentos ni los procesos físicos propios de cada reservorio, asumiendo que todos esos factores dependen de la geometría del mismo. Además, Schoklitsch (1961) propuso el *método geométrico progresivo* para determinar la forma de los depósitos dividiendo el reservorio en secciones que van desde la cola del embalse hasta la presa. En primer lugar determina la curva de remanso para la superficie libre, y luego distribuye los sedimentos anuales depositados haciendo una discriminación entre el material transportado en el fondo y en suspensión (ver figura 5).

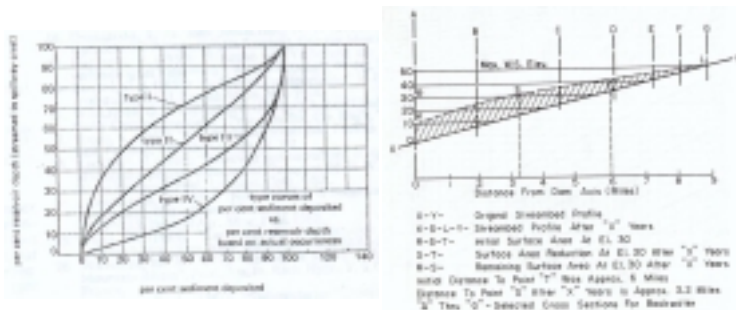


Figura 4 – Método empírico de reducción de área progresivo  
Curvas de Borland y Miller (izq.) y aplicación (der.)

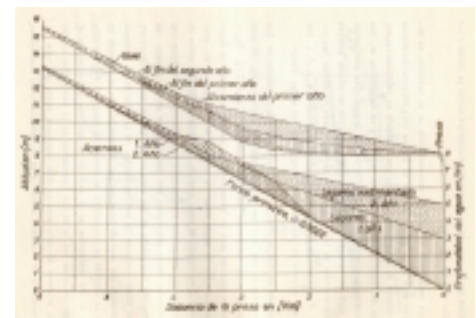


Figura 5 - Método geométrico de Schoklitsch

La aplicación de métodos matemáticos, como el de *regresión múltiple*, a colecciones de datos de distintos reservorios permitió establecer varias relaciones para cuantificar el proceso de sedimentación. Entre otros, Heinemann (1961) desarrolló una fórmula multilineal para cuantificar la profundidad porcentual llena de sedimentos, en función de cuatro parámetros, mientras que Flaxman (1966) obtuvo la tasa anual de sedimentación empleando análisis de regresión y trece variables (Graf 1984).

Respecto de la forma del delta, la pendiente de su parte superior se puede estimar a través de gráficos (Tarela 2000). En muchos casos la misma es aproximadamente la mitad de la pendiente original del río. La cota del punto de pivote entre la pendiente de la cola del delta y la del frente se puede estimar a partir del nivel normal de la superficie libre, o el nivel medio de operación, dependiendo del tipo de operación del reservorio. El límite aguas arriba del delta se estima como el punto donde el máximo nivel de la superficie libre intercepta el fondo original. Finalmente, la pendiente del frente del delta se estima como 6.5 veces la pendiente de la parte superior. El delta así esquematizado es de forma triangular, y su extensión se puede aproximar en el tiempo a partir del cómputo o medición del volumen de sedimento que ingresa al reservorio.

Los métodos empíricos se siguen utilizando en distintas etapas del estudio de la sedimentación en reservorios. En los años ochenta, Agua y Energía Eléctrica S.E. de Argentina determinaba la colmatación, en sus estudios de prefactibilidad, utilizando el método de Brune para determinar la eficiencia de atrape y el modelo de Lane y Koelzer para el efecto de compactación (Scartascini y Dalla Salda 1982). El mismo procedimiento se utilizó en el estudio sedimentológico del embalse Potrerillos en Argentina (Consortio Potrerillos 1978). Del mismo modo, el U.S. Bureau of Reclamation emplea las curvas de Brune y Churchill para determinar la eficiencia de atrape (Chen 1993). En los noventa, los métodos de Brune y Churchill se utilizaron para valorar el impacto de la sedimentación en la generación hidroeléctrica (Espinosa y Hervé 1996). Para predecir el comportamiento sedimentológico de un reservorio de llanura, Farias y Mattar (1996) también emplearon técnicas empíricas aplicadas a un modelo matemático ad-hoc.

Sin embargo, las limitaciones en la calidad y cantidad de los resultados que pueden proveer los métodos empíricos han hecho que, hoy en día, exista una marcada tendencia a ser reemplazados por los modelos matemáticos.

## 2.2 Estudios de campo y laboratorio

Schoklitsch (1937) realizó uno de los trabajos experimentales pioneros en el estudio de la formación de deltas. En una de sus experiencias señala que "...crece un depósito inicial o barra, cuyo frente empinado avanza aguas abajo como el delta en la desembocadura de un río...", y que el delta comienza a formarse "...donde la reducción de la pendiente hidráulica causada por el remanso se vuelve apreciable...". Estudios en canales de laboratorio más recientes muestran el desarrollo de deltas usando sedimento uniforme (Hotchkiss y Parker 1988, 1990) y mezclas de partículas finas y gruesas (Schalchli 1987). Graf (1983) presenta un detalle abarcador de estudios de laboratorio, aunque se debe aclarar que gran parte de ellos está publicado en informes internos de los distintos laboratorios (Sloff 1991). Cabe mencionar que los experimentos de laboratorio tienen limitaciones de escala. Por ejemplo, la relación de aspecto natural es, en general, irrealizable a escala de laboratorio. Además, aparece un límite inferior para el escalado de las partículas, donde los efectos cohesivos empiezan a ser significativos. Del mismo

modo, las partículas finas (limo fino y arcilla) son difíciles o imposibles de representar con otras de menor tamaño en un modelo físico.

Respecto de los estudios de campo, existe abundante material en la literatura técnica, pero nuevamente en informes no publicados. Por ejemplo, en la figura 6 se presenta un relevamiento mostrando el crecimiento hacia aguas arriba de la cola del delta (Schoklitsch 1961). Graf (1983) presenta un extenso listado de trabajos de campo orientados especialmente a relevar los patrones de deposición. En particular, resulta importante mencionar el trabajo sobre el lago Mead de Lara y Sanders (1970), posiblemente el más completo estudio de campo cuyo informe está disponible. La figura 7 muestra uno de los resultados de ese trabajo.

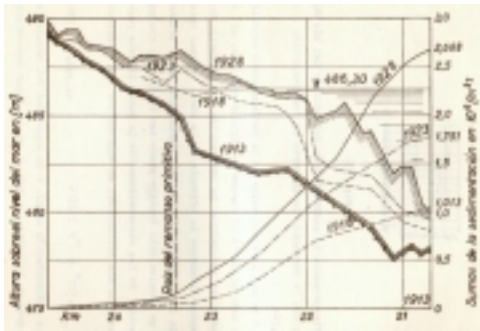


Figura 6 – Depósitos en el embalse del río Inn en Jettenbach (Austria).

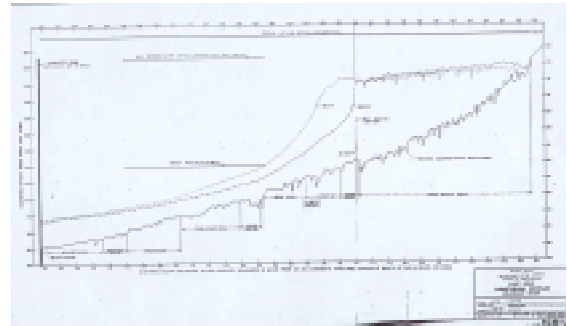


Figura 7 – Depósitos en el lago Mead (USA).

### 2.3 Modelos matemáticos 1D

Casi todos los modelos desarrollados para la predicción de la sedimentación en reservorios son unidimensionales (promediados en la sección transversal de flujo). Esta simplificación es a menudo justificada por el hecho de que, en general, la longitud del reservorio es mucho mayor que el ancho y la profundidad. Los modelos 1D representan el flujo a través de las ecuaciones básicas de conservación de la masa y la cantidad de movimiento de agua, y la masa de sedimento. Normalmente, dichas ecuaciones se resuelven numéricamente.

Uno de los primeros intentos por modelar el transporte y deposición de sedimento en reservorios es el método de paso analítico de Fowler (1957). La hipótesis principal del modelo es que el cociente entre las concentraciones de una dada fracción de tamaño de sedimento en una sección del reservorio y la sección inicial del río aguas arriba es una función del cociente entre las velocidades de corte en ambas secciones. Aplicaciones prácticas del modelo mostraron grandes discrepancias, volviéndolo cuestionable (Chen 1993). Yücel y Graf (1973) trabajaron dividiendo el problema en dos fases: en la primera se obtiene el perfil de la curva de remanso, sin considerar el transporte de sedimento, y en la segunda se determina la deposición debida al transporte de fondo en sucesivos tramos a lo largo del reservorio. Para esta última fase se utilizan fórmulas de transporte, como la de Schoklitsch, Meyer-Peter o Einstein. La aplicación de este modelo mostró similitudes cualitativas con casos reales, lo que llevó a sucesivas extensiones para incluir distribución de sedimentos, transporte total, consolidación y efectos geométricos (Graf 1983).

Probablemente, el modelo de dominio público más conocido para el presente problema es el HEC-6, cuya primer versión pública fue emitida en 1977. Fue desarrollado por Thomas en el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU (Thomas y Prasuhn 1977). Contempla el transporte total de material cohesivo y no cohesivo, incluyendo consolidación, armadura del fondo y distribución granulométrica de sedimentos de fondo. Graf (1983) señala que, aunque el autor escribió que “la performance actual es juzgada como satisfactoria”, no hay trabajos publicados o informes

disponibles donde esto se demuestre convincentemente. Otra crítica fue hecha por Croad (1986) al indicar que el esquema numérico utilizado no cumple el requerimiento de consistencia, causando errores del mismo orden de magnitud que la solución, y que, para la mayoría de las situaciones prácticas, exhibe inestabilidades (Sloff 1991).

Lopez (1978) esquematizó el sistema río-reservorio en tres zonas (fluvial, transición y reservorio). El transporte de sedimento se contabiliza como una función potencial de la velocidad local, corrigiendo el peso específico por compactación. Este modelo requiere un gran esfuerzo de calibración para lograr resultados precisos, y se han señalado que contiene un cierto número de problemas (Chen 1993). Chollet y Cunge (1980) utilizaron un esquema similar al de Yücel y Graf, empleando para el transporte total de sedimento las relaciones de Einstein y Engelund. A diferencia de la mayoría de los modelos, que utilizan para la resistencia de fondo las relaciones de Chezy o Manning, en este caso se utiliza un mecanismo de disipación de energía que contempla las formas de fondo y su evolución temporal.

Galappatti (1983) desarrolló un modelo 1D basándose en una solución asintótica para la ecuación de advección-difusión de la concentración de sedimento en suspensión. Para predecir la sedimentación en el reservorio Tarbela (Paquistán), Chao y Ahmad (1985) emplearon un modelo 1D que tiene en cuenta la capacidad potencial de la corriente para transportar las distintas fracciones cuando el diámetro medio no es representativo de la distribución presente. Cunge ha remarcado que, excepto para flujos en estado estacionario establecido por largos períodos, el transporte de material en suspensión está esencialmente fuera del equilibrio (Chen 1993). Por lo tanto, las hipótesis de transporte de sedimento en equilibrio, o aquellas que no permiten discriminar a la fase suspendida en forma separada, pueden constituir los mayores obstáculos en el desarrollo futuro de un código computacional. Por ejemplo, Han y He (1990) incluyen en su modelo 1D el efecto del transporte fuera del equilibrio, esto es, la adaptación de la concentración de sedimento a las condiciones del flujo. No obstante, la cadena de suposiciones que efectúan lleva a que los resultados no sean necesariamente superiores a los preexistentes. Un modelo similar, utilizando una aproximación de cuasi-no equilibrio, fue desarrollado por Chen (1988) y aplicado a evaluar los problemas de sedimentación en la presa Three Gorges Project sobre el río Yangtze, en China. Los resultados obtenidos son similares a los del modelo de Han y He. Holly y Rahuel (1990a,b) aplicaron un acoplamiento implícito entre los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos, modelando la evolución morfológica de ríos y reservorios.

Trabajos más recientes muestran que los modelos 1D son todavía aplicados. Por ejemplo, Chang y otros (1996) utilizan un modelo convencional para determinar el sucesivo paso de sedimento en una serie de presas sobre el río North Fork Feather (EE.UU.), y Basson y Tsehlo (1997) aplican su modelo de transporte de sedimento fuera del equilibrio en el reservorio Mohale (Lesoto), la cuarta presa de Africa por su tamaño.

## **2.4 Modelos matemáticos 2D**

Para problemas de transporte de sedimentos en general, existen dos tipos de modelos 2D. En los modelos 2D-H la descripción del flujo es integrada en la dirección vertical, por lo que se los emplea para cuerpos de agua poco profundos, donde las escalas horizontales del problema son las dominantes. Ziegler y Nisbet (1995) simularon el transporte de sedimento fino en el reservorio Watts Bar (EE.UU.), utilizando una versión 2D-H para la ecuación de transporte de sedimento.

Si la carga en suspensión domina el transporte, la estructura vertical resulta significativa y es aconsejable considerar una descripción promediada en la dirección lateral, dando lugar a los modelos 2D-V. De esta forma, los efectos de retardo debidos a la inercia de la mezcla turbulenta pueden ser representados en forma precisa. Además, la adaptación espacial y temporal de los perfiles de concentración de sedimento a condiciones variables puede ser cuantificada. En este tipo de modelos, los principales errores yacen en los coeficientes de difusión turbulenta y la tasa de intercambio de sedimento en el fondo, que debe especificarse como condición de contorno. Siddique (1991) desarrolló un modelo 2D considerando los efectos de la velocidad media de flujo, la velocidad de caída de las

partículas y la difusión turbulenta, para determinar el transporte de sedimento fuera del equilibrio, incluyendo limo y arcilla. El modelo consta de un submodelo de remanso (determina el perfil de la superficie libre y los parámetros hidráulicos en forma 1D), un submodelo de transporte de sedimento (resuelve una forma simplificada de la ecuación de advección-difusión 2D integrada en la dirección lateral) y un submodelo de evolución del fondo. Este modelo se aplicó para simular el crecimiento del delta en el reservorio Tarbela, observándose un acuerdo razonable con los datos relevados (ver figura 8).

Tarela (1999a, 2000) desarrolló un modelo 2D-V que resuelve los perfiles verticales de velocidad, presión y concentración de sedimento para los distintos tamaños de partícula. La comparación de las predicciones con los perfiles medidos por el Bureau of Reclamation de EEUU en el caso del reservorio de Lake Mead, sobre el río Colorado (Lara & Sanders, 1970), es muy satisfactoria (figura 9). Más aún, el modelo logra un muy buen acuerdo incluso en la distribución vertical de la gradación de sedimentos en los depósitos, superando al modelo *HEC-6* (figura 10). Aunque es operativo en computadoras PC, su costo computacional es 10 veces superior al modelo mencionado.

## 2.5 Modelos matemáticos 3D

La mayoría de los problemas de transporte de sedimento son evolutivos, por lo que aún los modelos morfológicos totalmente 3D son poco prácticos, tanto por su complejidad como por su alto costo computacional. De los pocos modelos que resuelven la ecuación de transporte de sedimento 3D, la gran mayoría se basa en una descripción hidrodinámica 2D-H, a partir de la cual se reconstruye en forma analítica el perfil vertical de velocidades. Este procedimiento fue utilizado por diferentes autores para simular diversos problemas (King 1985, McCarthy et al. 1986, Wang y Adefeff 1986).

Yoon y Kim (1995) presentaron un modelo cuasi-3D, en el cual se reconstruye el perfil vertical de velocidad a partir de la solución 2D-H de aguas poco profundas, y al cual le acoplaron la ecuación 3D de advección-difusión para la concentración de sedimento. El modelo fue aplicado al reservorio (poco profundo) Paldang, que abastece de agua para consumo a la ciudad de Seúl. Se obtuvo únicamente la concentración, que no fue contrastada con datos de campo.

A partir de un modelo hidrodinámico 3D, Olsen (1991) desarrolló un modelo 3D de transporte de sedimento y lo aplicó en el reservorio Mae Tian (Tailandia). El reservorio es extremadamente pequeño, con una extensión de 150 m y una profundidad media de 3 m. Los resultados de Olsen se limitan a los campos de velocidad y los perfiles de concentración en una situación estacionaria. Ninguno de ellos fue contrastado con datos de campo, ni se presenta análisis alguno respecto de los procesos de erosión y sedimentación presentes.

Nótese, entonces, que ninguno de los modelos presentados se refiere al problema específicamente estudiado en el presente trabajo, es decir, la evolución morfológica del lecho del reservorio.

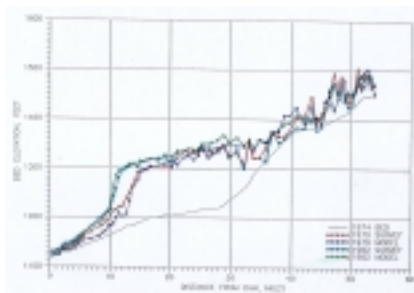


Figura 8 – Resultados del modelo 2D de Siddique en el reservorio Tarbela (Paquistán)

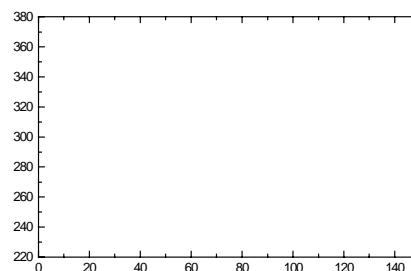


Figura 9 – Resultados del modelo 2D-V de Tarela en el lago Mead (USA)

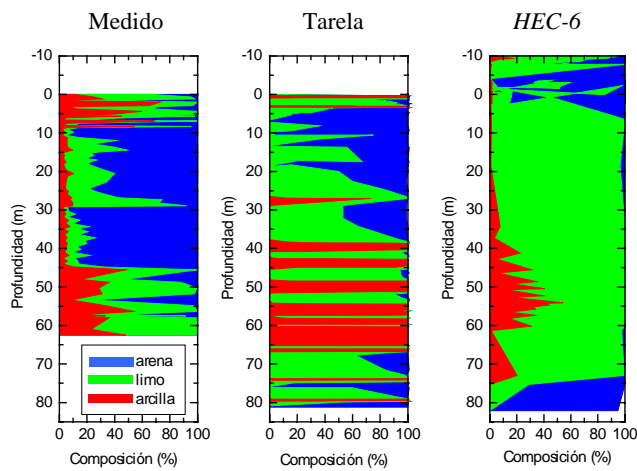


Figura 10 – Comparación entre la estratificación de los depósitos en el lago Mead (USA). Relevamientos (izquierda), modelo de Tarela (centro) y modelo HEC-6 (derecha)

### 3. CONCLUSIONES

El impacto ambiental del proceso de sedimentación requiere una adecuada cuantificación para lograr un manejo sustentable del sistema embalse.

Históricamente, los métodos más extensamente aplicados para determinar la sedimentación en embalses han sido los de base empírica. Su fácil implementación, la escasa cantidad de datos necesaria para hacerlos operativos y la rapidez en la obtención de resultados son sus principales ventajas. Se han aplicado incluso en proyectos recientes, aunque hoy en día se sabe que su sencillez se contrapone con la falta de precisión de sus predicciones. En realidad, sólo deberían emplearse como predictores preliminares.

La simulación de estos procesos físicos con modelos matemáticos puede entregar predicciones razonables, siempre y cuando existan datos de campo confiables, no sólo para la eventual calibración o verificación, sino también para el cálculo predictivo. Resulta interesante mencionar los resultados preliminares de un estudio sobre modelos de sedimentación llevado a cabo por un grupo de trabajo formado por personal de distintas agencias de EE.UU.. En el mismo se compararon 11 modelos, de los cuales 9 son 1D y los 2 restantes 2D. Entre las conclusiones principales se señala que todos los modelos analizados presentan dos limitaciones: son extremadamente dependientes de los datos, y su aplicabilidad está restringida a rangos de datos empleados en sus respectivos desarrollos (Fan 1993). En este sentido, el reciente modelo 2D-V desarrollado por el autor (Tarela 2000) minimiza el contenido de empirismo en virtud del conocimiento científico actual en la temática del transporte de sedimentos, mostrando muy buenos resultados predictivos y superando en performance al modelo 1D HEC-6.

Al presente parecen ser aún recomendables los modelos 1D o 2D, en lugar de los detallados y computacionalmente costosos modelos 3D.

### REFERENCIAS

Por cuestiones de espacio solo una selección de las referencias bibliográficas mencionadas en el texto es presentada aquí. La totalidad de ellas se encuentra en un trabajo del autor (Tarela 2000).

1. Andrade S., J., *Sedim. en embalses: una herramienta de planificación*, XVII Cng. Lat. de Hid., Guayaquil (1996).
2. Basson, G.R. and Tsehlo, T.C., *Mohale reservoir sedimentation*, 3rd Int. Conf. River Floods Hyd., (1997)
3. Borland, W.M. and Miller, C.R., *Distribution of sediments in large reservoirs*, Proc. ASCE **84**, HY2 (1958)
4. Borland, W.M., *Reservoir Sedimentation*, In: River Mechanics, vol. II, H.W. Shen (Ed.), Fort Collins (1971)

5. Brown, C.B., *Discussion of "sediment in reservoirs"*, by B.J. Witzig, Transactions ASCE vol. **109** (1944)
6. Brune, G.H., *Trap efficiency of reservoirs*, Am. Geophysical Union Transactions, vol. **34** No 3 pp. 407-418 (1953)
7. Cristofano, E.A., *Area increment method for distributing sediment in a reservoir*, U.S.B. of Reclamation (1953)
8. Chang, H.H., Harrison, L.L., Lee, W. and Tu, S., *Numerical modeling for sediment-pass-through reservoirs*, Journal of Hydraulic Engineering **122**, No. 7, pp. 381-388 (1996)
9. Chen, Y.H., *Development of a quasi-nonequilibrium reservoir sedimentation model, RESSED*, Second Seminar on Stream Sedimentation Models, Sedimentation Subcommittee, Int. Advisory Committee on Water Data, (1988)
10. Chen, Y.H., *Overview of modeling sediment in reservoirs*, In: Notes on Sediment Management in Reservoirs, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch (1993)
11. Cholley, J.P. and Cunge, J.A., *Simulation of unsteady flow in alluvial streams*, App. Math. Mod., vol. 4 (1980)
12. Churchill, M.A., *Discussion of "Analysis and use of reservoir sedimentation data" by L.C. Gottschalk*, Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Denver 1947, Proc. pp. 139-140 (1948)
13. Fan, S. and Springer, F.E., *Major sedimentation issues at the Federal Energy Regulatory Commission*, Notes on Sediment Management in Reservoirs, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch (1993)
14. Fan, S., *An interagency overview of selected sedimentation models*, In: Notes on Sediment Management in Reservoirs, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch (1993)
15. Fowler, L.C., *Determination of location and rate of growth of delta formation*, U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Division, Sediment memorandum No.6, Omaha (1957)
16. Galappatti, R., *A depth-integrated model for suspended sediment transport*, Delf Univ. Tech. Rep. No. 83-7 (1983)
17. Gill, M.N., *Analysis of reservoir sedimentation*, Water Power & Dam Construction **30**, No. 12, pp. 29-31 (1978)
18. Graf, W.H., *Storage losses in reservoirs*, Water Power & Dam Construction **36**, No. 4, pp. 37-40 (1984)
19. Graf, W.H., *The hydraulics of reservoir sedimentation*, Water Power & Dam Const. **35**, No. 4, pp. 45-52 (1983)
20. Han, Q. and He, M., *A mathematical model for reservoir sedimentation and fluvial processes*, Int. Journal of Sediment Res., IRTCES, vol. **5** No 2, pp. 43-84 (1990)
21. Hotchkiss, R. and Parker, G., *Laboratory modelling of reservoir sedimentation and sluicing: scale considerations*, International Conference Physical Modelling of Transport and Suspension, ASCE, pp. 14B-25-14B-30 (1990)
22. Jorgensen, S.E. and Vollenweider, R.A., *Problemas de lagos y reservorios*, Directrices para la gestión de lagos, vol 1, Comité Internacional de Ambientes Lacustres, PNUMA, Jorgensen and Vollenweider (Eds.), pp. 27-32 (1989)
23. Lara, J.M. and Sanders, J.I., *The 1963-64 Lake Mead Study*, U.S.B. of Recl., report REC-OCE-70-21 (1970)
24. Olsen, N.R.B., *A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in waterintakes*, Dissertation for the Dr. Ing. Degree, University of Trondheim, IVB-rapport B-2-1991-5 (1991)
25. Schoklitsch, A., *Legamos y acarreos*, Acta cuyana de ingeniería, volumen III, San Juan (1961)
26. Sloff, C.J., *Reservoir sedimentation: a literature survey*, Report No 91-2, Delf Univ. of Tech., Delft (1991)
27. Sloff, C.J., *Sedimentation in reservoirs*, Report No 97-1, Delf University of Technology, Delft (1997)
28. Tarela, P.A. and Menéndez, A.N., *A model to predict reservoir sedimentation*, Lakes & Reservoirs: Research and Management **4**, pp. 121-133 (1999)
29. Tarela, P.A. y Menéndez, A.N., *El destino de los contaminantes adsorbidos en los sedimentos dentro de un embalse*, Congreso Argentino de Mecánica Computacional MECOM'99, Mendoza (1999)

30. Tarela, P.A. y Menéndez, A.N., *Hydrosedimentologic model to predict reservoir sedimentation*, Computational Mechanics, New Trends and Applications, S. Idelsohn, E. Oñate and E. Dvorkin (Eds.), Barcelona (1998)
31. Tarela, P.A. y Spalletti, P.D., *Comparación de modelos matemáticos para sedimentación en embalses*, Informe INA LHA-S5-091-00 (2000)
32. Tarela, P.A., *Sedimentación en embalses: modelación matemática y simulación numérica*, Tesis de Doctorado en Ingeniería aprobada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (2000)
33. Thomas, W.A. and Prasuhn, A.L., *Mathematical modeling of scour and deposition*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, **103** No. HY8 pp. 851-863 (1977)
34. Yoon, T.H. and Kim, M.K., *Quasi-3D hydrodynamic model and its application to 3-D sediment transport model in a shallow reservoir*, Proc. HYDRA 2000, Thomas Telford (Ed.), vol. 4, pp. 237-241, London (1995)
35. Yücel, O. and Graf, W.H., *Bed-load deposition and delta formation – A mathematical model*, Lehigh Univ. (1973)
36. Ziegler, C. and Nisbet, B., *Fine-grained sediment transport in Pawtuxet river, Rhode Island*, Journal of Hydraulic Engineering **121**, No. 11, pp. 773-781 (1995)