

MODELACIÓN FÍSICA DEL COMPORTAMIENTO DEL SEDIMENTO A LA ENTRADA DE UN EMBALSE, CON EL FIN DE MANTENER EL EQUILIBRIO ECOLÓGICO

Gracia Sánchez Jesús

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Luna Bahena Juan César

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Ortiz Martínez Víctor M

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Osnaya Romero Javier

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Carrizosa Elizondo Eliseo

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Víctor Franco

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: Los trabajos realizados hasta el momento permiten concluir que de todo el material sólido que llega a la zona del embalse, en condiciones actuales (sin cortina), es el correspondiente a granulometrías entre 1.0 y 0.1 mm (Fig. 2), es el material que alcanza a llegar a la zona de aguas abajo de la cortina y por lo tanto es el material que habría que reponer en ese sitio. En este estudio se encuentra, a través de la modelación física, que el material grueso efectivamente se queda alojado, en una zona específica, en la entrada del embalse (delta), pero de manera “clasificada”, de donde podría ser extraído y trasladado hacia aguas abajo de la cortina, mediante procedimientos mecánicos, que en principio no parecen incosteables y que constituirían parte del mantenimiento de la obra. Respetando así el equilibrio ecológico de la región.

Palabras clave: Transporte de sedimentos, modelos físicos.

INTRODUCCIÓN

Al construir una presa se altera el flujo de sedimento, principalmente del más “grueso” (> 0.2 mm), pues se queda almacenado dentro del embalse, el cual en muchas ocasiones es muy importante para mantener el equilibrio ecológico de las zonas aguas abajo de la presa. El sedimento grueso normalmente se queda en la entrada del embalse, en la zona denominada “delta” (White, 2001). El sedimento “fino” (limos y arcillas, principalmente) normalmente alcanza a pasar a través del embalse sin mayor dificultad por la obra de toma y el vertedor. La tendencia actual para hacer viable la construcción de una presa, desde el punto de vista ecológico, es disminuir el impacto ambiental de la misma y mantener el flujo de sedimento (CFE, 2014a). Por esta razón es necesario conocer a detalle el comportamiento del sedimento grueso en la zona del delta, para plantear los trabajos

de ingeniería que permitan la extracción del sedimento y luego su eventual disposición aguas abajo de la presa.

Uno de los problemas más importantes en la construcción de una presa es la retención del sedimento en su interior. Esto principalmente porque puede alterar las condiciones naturales aguas abajo de otros ecosistemas como son manglares, lagunas, bocas de salida al mar entre otras varias. Es decir se puede producir una alteración ecológica importante que sin embargo puede corregirse de tomar las previsiones adecuadas. Esto conlleva a la necesidad de buscar soluciones a tal problemática. El objetivo de este trabajo es presentar la manera en que se ha abordado tal problemática para ofrecer una solución al problema de retención de sedimento grueso.

ANTECEDENTES

Tradicionalmente se sabe que al ser construida una presa, ésta causa el depósito de sedimento en su interior, ya que al disminuir la velocidad del agua el material sólido se deposita. Sin embargo hay que hacer varias precisiones:

- a) El material más grueso se deposita a la entrada del embalse (en la cola) formando un delta, y luego de acuerdo a su tamaño se distribuye en el interior del embalse. El mayor depósito dependerá de la cantidad de material que llega, de las características físicas de las corrientes, de la forma del embalse y de su operación.
- b) El material fino, generalmente, continúa viajando por el embalse en suspensión ocupando toda la sección transversal hasta llegar a la cortina y entonces sale por el vertedor o por la obra de toma. Este es el caso general, aunque en algunos casos se llegan a formar corrientes de densidad que hacen que el sedimento viaje por el fondo del embalse en forma concentrada, pero estos son

casos especiales.

c) Los datos anteriores implican que el sedimento fino en los embalses, no se deposita de manera importante y por lo tanto, no constituyen un problema en la pérdida de capacidad del embalse. De hecho, el material fino, al continuar hacia aguas abajo, como no se altera en cantidad, aunque si en su distribución en el tiempo, no altera de manera significativa a los ecosistemas que se encuentran aguas abajo y que dependen de él.

d) Ahora bien, un problema importante es el definir los límites entre el sedimento grueso y fino, lo cual no es sencillo y existen diferentes criterios. Conceptualmente las partículas de cuarzo, mayores de 0.1 mm son el material grueso y las menores a este tamaño y en particular los limos y arcillas serían el material fino.

e) Finalmente, un aspecto importante es la simulación numérica del sedimento. Normalmente en casos de deltas en zonas con muchas curvas, los modelos 1D y 2D no son suficientes ya que se trata de un fenómeno tridimensional. En la actualidad los modelos numéricos aún no han podido subsanar bien esta parte del cálculo, ya que sólo un modelo 3D con una buena representación del sedimento, es capaz de realizar un buen cálculo. Pero aún estos modelos deben ser calibrados con datos de prototipos o bien con datos de modelos físicos.

f) Se reconoce que el uso de un modelo físico de fondo móvil y distorsionado, ofrece resultados principalmente cualitativos, pero suficientes, en este caso, para indicar los sitios de depósito de los materiales gruesos, según su granulometría.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Fig. 1 se presenta un plano donde se muestra la ubicación del Proyecto Hidroeléctrico (P.H.). Como se puede observar, el río antes de desembocar al mar, pasa por zonas donde existen manglares y lagunas. El problema que se plantea es ¿cómo mantener el flujo de sedimento necesario para mantener el equilibrio ecológico de la zona baja?. En principio, se ha considerado que prácticamente todo el sedimento fino es susceptible de pasar por la obra de toma y el vertedor, pero no así el sedimento grueso.

Entonces el problema se transforma en ¿cómo pasar el sedimento grueso necesario en la parte baja?, para mantener el equilibrio ecológico. Esto implica definir ¿cuánto sedimento grueso se requiere y en qué sitios aguas abajo de la cortina debe ubicarse?.

La respuesta inmediata a la pregunta anterior podría ser: pasar todo el que pasaba antes de la construcción de la presa. Esto en principio es una solución inaceptable por la dificultad que implica, pero se pueden hacer algunas consideraciones importantes que pueden ayudar a resolver el problema.

En el caso del P.H. lo que se hizo fue medir el sedimento aguas abajo de la zona donde se ubicará la cortina. De dichos muestreos se obtuvo que en el cauce y la planicie el sedimento más grueso que se encontró osciló entre diámetros de 1.0 a 0.1 mm, aunque por supuesto la mayor parte del sedimento encontrado en esos sitios fue el fino (limos y arcillas). En la Fig. 2 se muestran, como ejemplo, dos curvas granulométricas de las mediciones de sedimento en sitios aguas abajo donde se construirá la cortina.

De las curvas mostradas en la Fig. 2 se deduce que la mayor parte del sedimento grueso que quedará retenido en el embalse, es decir el mayor a 1.0 mm, pues aún sin embalse no llega a la zona baja, por lo tanto solamente

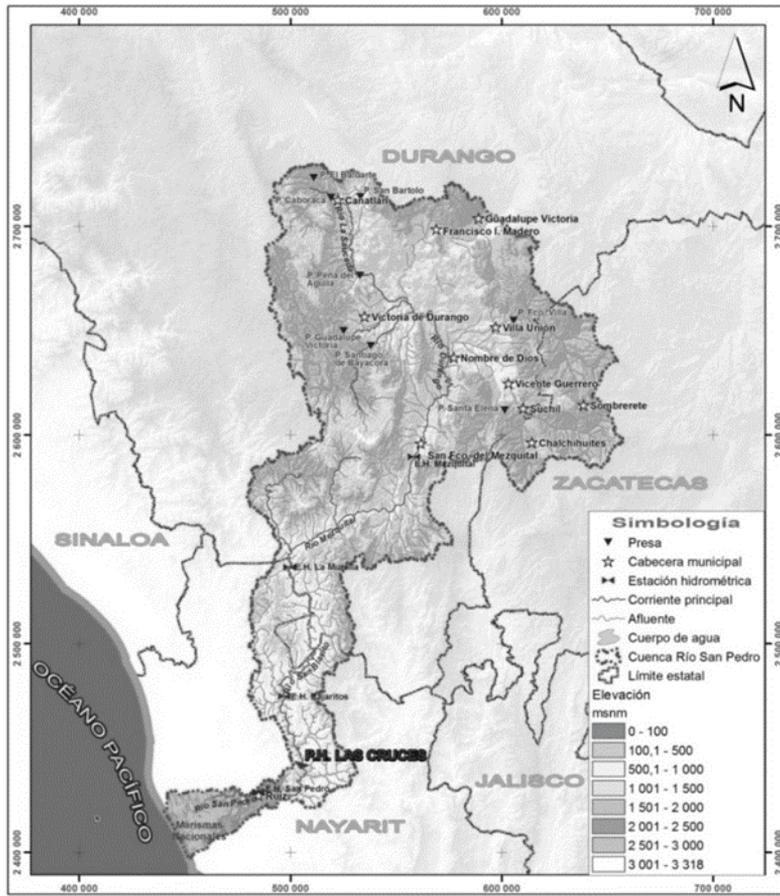


Figura 1.- Esquema general de la cuenca de aporte al P. H.

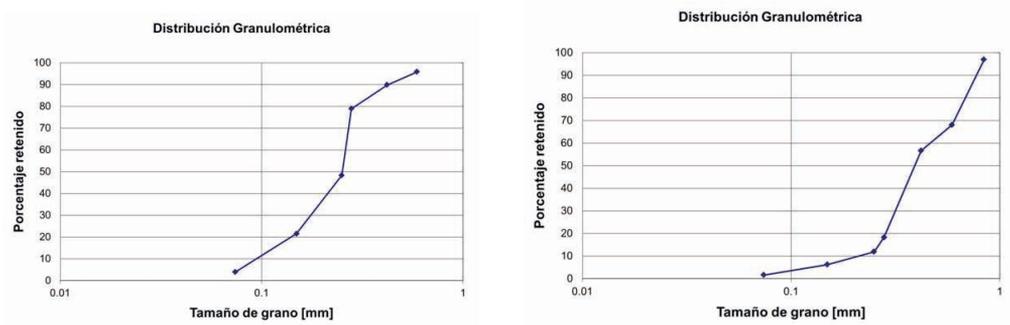


Figura 2.- Ejemplos de curvas granulométricas aguas abajo del sitio donde se ubicará el P.H. Las Cruces. (FLUVITECNO, 2012)

el correspondiente a los diámetros entre 1.0 y 0.1 mm será necesario reponerlos.

Ahora el problema a resolver es determinar dentro del embalse, en donde se depositarán los sedimentos con estas características, para que eventualmente puedan ser extraídos y trasladados a la parte baja de la cuenca donde, según las mediciones realizadas, deberán ser ubicados.

Es bien sabido que uno de los fenómenos más importantes de depósito en los embalses, es el delta que se forma a la entrada con material grueso. Existen diferentes criterios para cuantificar las características del delta en un embalse (p.e. White, 2001), sin embargo normalmente esos criterios sirven para determinar sus características y ubicación dentro del embalse, pero no ofrecen información sobre la distribución granulométrica del material en el delta. Es decir, se necesita saber en dónde se quedan las partículas de 1.0 y 0.1 mm en el delta del embalse.

Dado que no existe información bibliográfica, sobre la distribución granulométrica dentro del material depositado en el delta de un embalse, se procedió a realizar pruebas en un modelo físico para abordar el caso del P. H.

MODELACIÓN FÍSICA

El caso estudiado es el embalse del P.H. por lo cual se ha optado por revisar el comportamiento del sedimento grueso empleando un modelo físico de fondo móvil y distorsionado, para simular el comportamiento del material depositado en la entrada del embalse.

Se ha optado por la simulación física ya que en las modelaciones numéricas, aún existen efectos del sedimento que no son muy confiables en su representación (Olsen, 2012).

El modelo físico construido tiene escala horizontal de 1:135 y vertical de 1:22.5. En

la Fig. 3 se muestra la panorámica del modelo y en la Fig 4 una planta. El modelo permite manejar gastos máximos de 220 l/s y se alimenta con gastos característicos y material sólido con granulometrías conocidas. Una de las características particulares del cauce simulado es su sinuosidad, que altera mucho el comportamiento del sedimento y que es muy difícil de representar en los modelos numéricos

Se emplearon dos tipos de arena para simular el sedimento una denominada “Azul” con peso específico de 2650 kg/m^3 cuya distribución granulométrica se muestra en la Fig. 5. Se trata de arena obtenida en una mina y tiene una distribución extendida que muestra una parte importante de material con diámetros muy pequeños. La otra arena empleada es de origen volcánico con una densidad de 2350 kg/m^3 y una distribución granulométrica más uniforme (ver Fig. 5) la cual fue denominada como “Negra”.

Aquí conviene hacer una aclaración muy importante, las partículas gruesas más pequeñas en el modelo, son del orden de la magnitud de las partículas en el prototipo. Esto se debe a que no es posible escalar las partículas de menor diámetro del prototipo al modelo porque en rigor serían partículas de arcilla y estas no representan el comportamiento de las partículas de cuarzo más finas. Por ello el modelo es distorsionado y los resultados son cualitativos, sin embargo la aproximación es suficiente para obtener conclusiones prácticas. La práctica ingenieril indica que la ruta de trabajo es la de calibrar los modelos numéricos con los resultados físicos y luego extrapolar a las condiciones de prototipo.

Se hace notar que no existe información granulométrica de la entrada del embalse, sólo se puede hacer la suposición de que el diámetro medio es del orden de los 0.15 m (Fluviotecno, 2012). Por ello se supone que



Figura 3.- Modelo físico de la entrada al embalse del P.H. Las Cruces (entrada en la parte inferior, salida en la superior).



Figura 4.- Planta del modelo físico de la entrada al embalse del P.H. Las Cruces

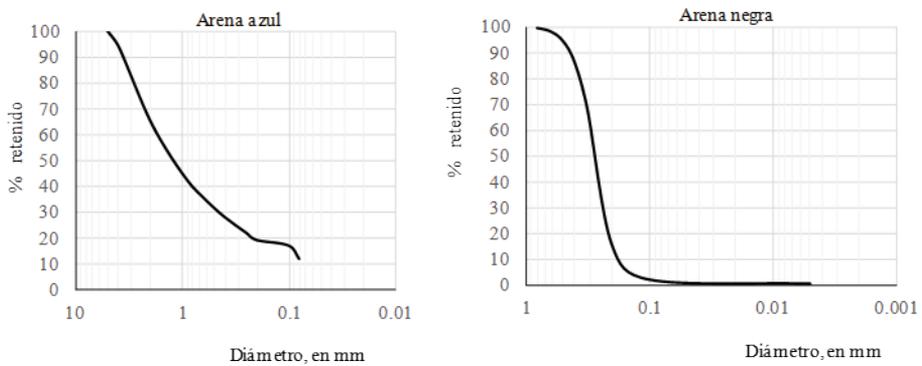


Figura 5.- Curvas granulométricas de las arenas empleadas en el modelo físico.

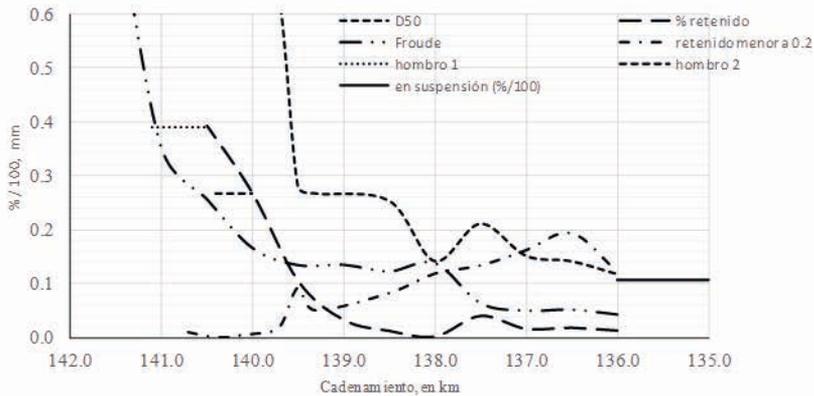


Figura 6.- Comportamiento de la arena Azul para un gasto constante de 2389 m³/s

solamente el 10% del material que llega hasta aguas abajo es el que se encuentra en 1.0 y 0.1 mm. Esto tiene una importancia sólo relativa pues se pretende extraer del embalse la mayor parte del sedimento en ese rango, lo cual se sabrá únicamente cuando el embalse empiece a operar. La información disponible permite estimar, a través de métodos empíricos que la entrada anual promedio al embalse es del orden del 1,000,000 m³ de sedimento, del cual sólo el 10% sería necesario trasladar hacia aguas abajo.

PRUEBAS REALIZADAS EN EL MODELO FÍSICO DEL DELTA DEL P.H LAS CRUCES

Se realizaron diferentes pruebas que consistieron en simular diferentes gastos con diferentes tipos de arena. Algunos resultados de las pruebas realizadas para la arena "Azul" se muestra en la Fig. 6 donde se grafican para los diferentes cadenamientos a la entrada del embalse los diámetros de las partículas depositadas, las cantidades y los números de Froude asociados al flujo en cada sección. Obsérvese que el depósito de material ocurre dentro del embalse antes del NAMO (Fig. 7).

El procedimiento experimental seguido en cada prueba fue el siguiente: una vez preparado el modelo físico, marcando las estaciones y estableciendo el gasto. Se procedió a medir tirantes y velocidades (con un Flow Track) en todas las secciones. Luego se sembró el material sólido a la entrada del modelo y se realizó la prueba manteniendo un tiempo aproximado de una hora, que corresponde a 28.4 h de prototipo. Al finalizar, se vaciaba el modelo lentamente para evitar el arrastre del material depositado y luego se procedió a obtener muestras en cada cadenamiento del material. Posteriormente se medía el volumen ubicado en cada sección y se procedía a secar, cribar y pesar el material recogido. Con esta información se procedió a elaborar las gráficas

que se muestran a continuación.

Respecto de la Fig. 6 las principales observaciones son las siguientes:

- 1) Las partículas entre 0.1 y 0.2 mm se encuentran entre los cadenamientos 139 al 136. Se estima que este rango es el representativo en prototipo de las partículas de 1.0 a 0.1 mm para un modelo distorsionado.
- 2) El depósito ocurre para Números de Froude de 0.05 y 0.15
- 3) La Mayor parte del material retenido ocurre antes del cadenamiento 139.5 que es donde se forma propiamente el hombro del delta (el punto más alto del depósito).
- 4) El hombro se forma principalmente con partículas de 0.25 mm y mayores (Fig. 8).
- 5) La cantidad de material que sale en suspensión se observó que es del orden del 10.6 %

Para la arena "Negra" los resultados se muestran en la Fig. 9 donde se grafican para los diferentes cadenamientos a la entrada del embalse los diámetros de las partículas depositadas, las cantidades y los números de Froude asociados al flujo en cada sección. Obsérvese que el depósito de material ocurre dentro del embalse antes del NAMO.

Notas respecto a la Fig. 9:

- 1) Las partículas entre 0.1 y 0.2 mm se encuentran entre los cadenamientos 139.5 al 136
- 2) El depósito ocurre para Números de Froude de 0.05 y 0.15 (igual que en el caso anterior)
- 3) La Mayor parte del material retenido ocurre antes del cadenamiento 139.5 que es donde se forma propiamente el hombro del delta (el punto más alto del depósito).



Figura 7.- Inicio de delta sección 141+500

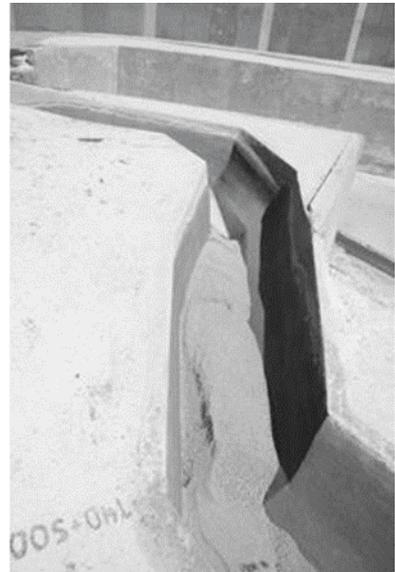


Figura 8.- Formación hombro 1 entre secciones 140+500 a 141+000

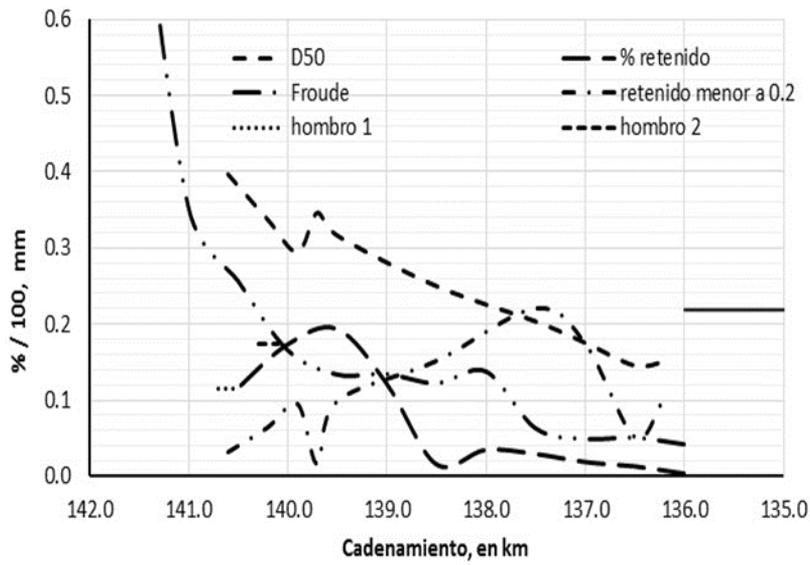


Figura 9.- Comportamiento de la arena Negra para un gasto cte. de 2180 m³/s

4) El hombro se forma principalmente con partículas de 0.25 mm y mayores.

5) La cantidad de material que sale en suspensión se observó que es del orden del 21.9 %

(Nótese que los resultados son muy similares a los del caso anterior)

Notas respecto a la Fig. 10:

1) Las partículas entre 0.1 y 0.2 mm se encuentran entre los cadenamientos 139.5 al 136

2) La Mayor parte del material retenido ocurre antes del cadenamiento 140.0 que es donde se forma propiamente el hombro del delta (el punto más alto del depósito).

3) El hombro se forma principalmente con partículas de 0.25 mm y mayores.

(Nótese que los resultados son muy similares a los de los casos anteriores)

En resumen, se puede concluir que independientemente de la arena empleada en el modelo las zonas de depósito del material entre 0.2 y 0.1 mm ocurre en los mismos sitios (Figs. 11 y 12). El depósito es máximo en la entrada del embalse (en el hombro) y luego decrece rápidamente, sin embargo, existe un depósito de partículas finas después del delta. Evidentemente su cantidad es mínima, pero logran depositarse en una zona bien definida, de donde podrán extraerse artificialmente los materiales para trasladarlos a la zona de aguas abajo del embalse. Este mismo resultado fue obtenido para la simulación de un hidrograma, por lo cual puede concluirse que en los sitios donde se alcancen Números de Froude en torno a 0.05 y 0.15 se presentará el depósito de las partículas de interés, aún en el prototipo y las zonas de depósito están bien definidas.

La conclusión más importante que se obtiene del resultado anterior es que el sitio donde las partículas de un determinado

diámetro se depositan está bien delimitada, así entonces es posible pensar que el modelo físico puede servir también para fijar esta zona usando una arena que tenga una distribución más uniforme y utilizando el número de Froude para caracterizar el sitio donde ocurre el depósito.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de un modelo físico de fondo móvil y distorsionado permite obtener información útil para determinar el comportamiento del sedimento grueso en la entrada de un embalse (delta) independientemente de la complejidad de su trayectoria en planta y de las características de sus secciones transversales. El uso de diferentes granulometrías con avenidas de diferentes características, permiten definir las principales zonas de depósito y su evolución para la futura extracción del sedimento, en función de su uso aguas abajo de la cortina para disminuir el impacto ambiental de la retención del sedimento grueso por la presencia de la presa.

En este trabajo se ha mostrado que es posible en algunos casos subsanar el problema de la retención de sedimento en un embalse, para evitar las consecuencias indeseables aguas abajo de la cortina. Normalmente estas consecuencias son de carácter principalmente ecológico. Las conclusiones más relevantes son:

a) El sedimento “fino” normalmente pasa por el embalse sin depositarse, si bien ocurre un mezclado que cambia un poco las concentraciones de salida, lo cual normalmente no tiene ningún efecto, porque la cantidad neta pasa sin depositarse en el embalse.

b) Un modelo físico de fondo móvil y distorsionado, es capaz de representar bien el depósito del material sólido “grueso” dentro del embalse, esto

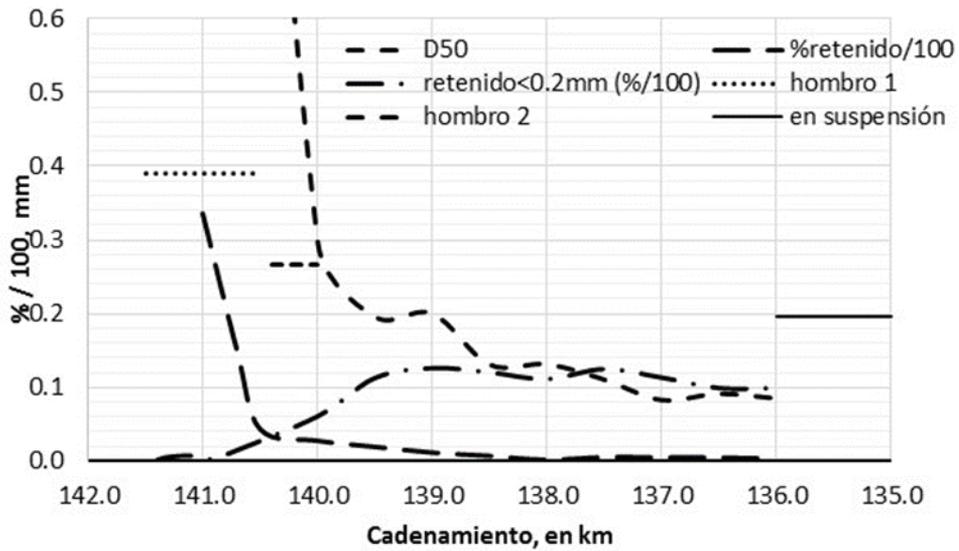


Figura 10.- Comportamiento de la arena Azul con el hidrograma de la Fig. 11.

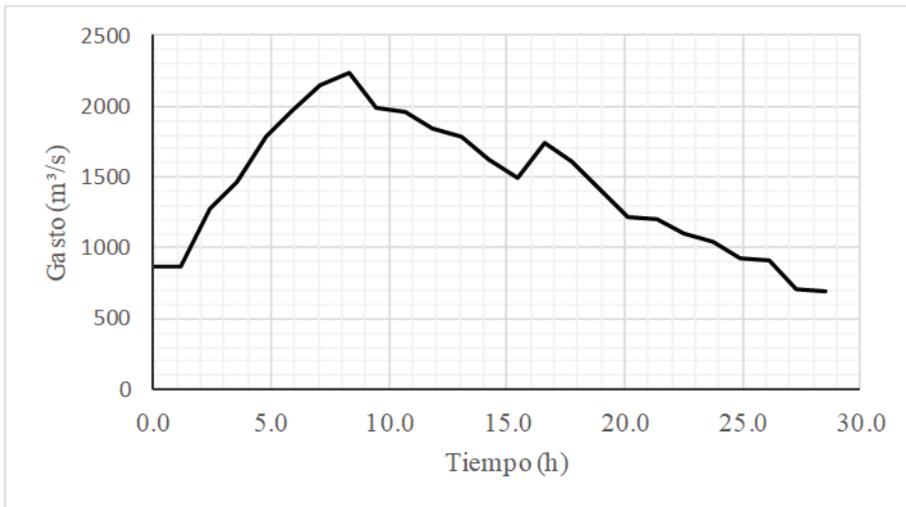


Figura 11.- Hidrograma simulado en el modelo físico.



Figura 11.- Depósito de sedimento fino aguas debajo del hombro 2 entre secciones 139+500 a 140+000

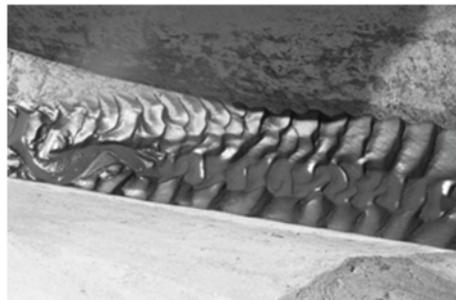


Figura 12.- Formación de dunas en el arrastre de fondo sección 139+000

en cuanto a la distribución de la granulometría e independientemente e irregularidad del cauce. En la actualidad los modelos numéricos aún no han podido subsanar bien esta parte del cálculo y sólo un modelo 3D con representación del sedimento es capaz de intentar tal cálculo. Pero aún estos modelos deben ser calibrados con datos de prototipos o bien con datos de modelos numéricos.

c) La conclusión, probablemente la más importante, desde el punto de vista ecológico, es que el sedimento grueso no es necesario trasladarlo, en su totalidad, hacia aguas abajo, ya que la parte de dicho material que llega a las zonas de interés es muy baja. Por supuesto esta no es una conclusión generalizable a todos los embalses, pero en el caso estudiado es una realidad que puede aprovecharse. En este caso en particular, el material entre 1.0 y 0.1 mm realmente es poco aguas abajo del embalse, pero no se puede negar su importancia en la integración de los perfiles de suelo.

Dentro de las principales recomendaciones, se encuentra la necesidad de simular el comportamiento del sedimento grueso y fino en los problemas de sedimentación en embalses, el primero porque es el que realmente disminuye la capacidad del embalse y el segundo, si bien no tiene mayor importancia en la pérdida de capacidad, si la tiene por sus repercusiones aguas abajo de los embalses.

Finalmente conviene apuntar que el paso de las partículas entre 1.0 y 0.1 mm de la entrada del embalse a la parte de aguas abajo de la cortina del P. H. Las Cruces, si bien no es sencillo, no representa ningún reto ingenieril inabordable, pues la cantidad estimada es del orden de los 200,000 m³ anuales en promedio, costo que debe poder ser incluido en el mantenimiento del embalse. Esta maniobra

puede hacerse con el dragado del material y luego el traslado en barcazas o camiones o bien por bombeo, o algún otro procedimiento. Nótese que además el sedimento que realmente llegue a la entrada del vaso será la cantidad real que se necesita en la parte baja del embalse, independientemente de los valores empleados en este trabajo

REFERENCIAS

CFEa (2014), Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Capítulo II, Descripción de las Obras, *Manifestación de impacto ambiental*, CFE, México

CFEb (2014), Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Cap. 9, Estudio de balance de sedimentos en los arroyos, ríos y escurrimientos que alimentan al río San Pedro aguas abajo de la ubicación propuesta de PCR, considerando las épocas del año (estiaje y lluvias), debiendo contemplar y reportar la presencia de fosas de retención y barreras físicas que pudieran generar el desvío del flujo hidrológico, con la finalidad de determinar el aporte real de sedimentos a Marismas Nacionales una vez en operación el proyecto, México

FLUVITECNO (2012), Caracterización del cauce y estudio fluviomorfológico del Río San Pedro, Nayarit, México, FLUVITECNO, S.A. DE C.V., *Informe Final, a la Comisión Nacional de Electricidad (CFE), a través de la Coordinación de Proyectos hidroeléctricos, Subgerencia de anteproyectos, del Centro de Anteproyectos del Pacífico Norte*, México

Olsen N R B (2012), Numerical Modelling and Hydraulics, *Third Edition*, Department of Hydraulic and Environmental Engineering and The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

White R (2001), Evacuation of sediments from reservoirs, *Thomas Telford Publishing*, London