

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FUNDO DO RIO TORATA - PERU

Norvin Plumieer Requena Sánchez^{1*}; Paulo Ponce Arroio Junior²; Frederico Fabio Mauad³

Resumen

Este trabajo presenta los resultados de transporte de sedimentos de fondo realizados con los métodos de Meyer-Peter & Müller (1948) y Einstein (1950). Para el cálculo de los sedimentos transportados fueron utilizados los resultados de las mediciones de flujos de ingreso al reservorio Torata, obtenidos en los periodos de lluvias que corresponde a los meses de enero a abril para los años 2004 y 2005. Para la utilización de la metodología utilizada en este trabajo, se realizaron calicatas, en el tramo de ingreso al reservorio Torata, con el fin de determinar las características físicas del material transportado, asimismo, a partir de las características del material del lecho y las condiciones hidráulicas en cada sección se establecieron condiciones de transporte. En el período 2004 el volumen de sedimentos de arrastre de fondo ingresados al reservorio Torata se estima en el orden de 19,500 – 25,000 m³, mientras que en el año 2005 se halla entre los 13,000 – 15,000 m³.

Palabras -Claves – Transporte de sedimento, reservorio.

BED LOAD TRANSPORT IN TORATA RIVER - PERU

Abstract

This paper presents the results of bed load transport using Meyer-Peter & Müller method (1948) and Einstein Method (1950). The sediment transport was calculated based on information from measurements of water and sediment discharges of Torata Reservoir, obtained in the rainy period of 2004 and 2005 (from January to April). The samplings were realized in the upper part of the reservoir, in order to determine the physical properties of sediments, as well the characteristics of the bed load and the hydraulic conditions in each section were established from transport conditions. The results indicated that the quantity of transported bed load was about 19,500 to 25,000 m³ in 2004, and 13,000 to 15,000 m³ in 2005.

Keywords – Sediment transport, reservoir.

¹ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. Av. Trabalhador São Carlense, 400, Cep: 13566-590, Tel: (+55) 16 3373 8255. São Carlos-SP. E-mail: norvin@sc.usp.br

² Doctorando do Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. Av. Trabalhador São Carlense, 400, Cep: 13566-590, Tel: (+55) 16 3373 8255. São Carlos-SP. E-mail: pauloarroio@sc.usp.br

³ Professor Doutor do Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. Av. Trabalhador São Carlense, 400, 13566-590, Tel: (+55) 16 3373 8255. São Carlos-SP. E-mail: mauadffm@sc.usp.br

INTRODUCCION

Todos los cursos de agua naturales presentan la propiedad de arrastrar sedimentos y el volumen de este material depende de la región que es erosionada. La construcción de una presa y la formación de su represa implica modificaciones en la condiciones naturales del curso de agua a partir de la reducción en la velocidad de flujo y, consecuentemente la capacidad de transporte de sedimentos por el río, favoreciendo su disposición en los embalses que con el paso del tiempo, van perdiendo su capacidad de almacenar agua.

Existen diversos problemas que son ocasionados por la disposición de sedimento en el lecho de los ríos, lagunas, represas. La erosión, el transporte y la disposición de sedimentos son procesos naturales que pueden sufrir desequilibrios con la acción del hombre. El corte de vegetación, el manejo inadecuado de suelo y la ocupación humana acelerada cerca de los márgenes de ríos son algunos de los factores que perjudican al medio ambiente. Los costos para dragar el lecho y/o fondo de un río, laguna o represa son elevados, por ello se recomienda monitoreamiento sedimentométricos para tomar medidas preventivas.

Este estudio presenta el caso del río Torata, que forma un pequeño embalse de 12.5 hectáreas de área localizado en el zona central de la cuenca del río Moquegua, ocupando principalmente la parte superior y media de la cuenca del río Torata. El río en estudio esta aproximadamente a 3420 metros sobre el nivel del mar, en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, dentro del departamento de Moquegua al Sur del Perú.

El objetivo de este trabajo fue estimar la cantidad de sedimentos de arrastre de fondo ingresado al reservorio Torata, para obtener información y evaluar, dentro de los principales métodos de cálculo de transporte de sedimentos en ríos, los que mejor se encuadren del caso de estudio; los trabajos de campo se realizaron en los meses de Enero – Abril en los años 2004 y 2005.

MATERIAIS Y MÉTODOS

Área de estudio

El embalse de Torata se ubicada en la zona central de la cuenca del río Moquegua, ocupando principalmente la parte superior y media de la cuenca del río Torata, uno de sus principales formadores, geográficamente se localiza en 17°01'13''S y 70°41'06''O.

El embalse posé aproximadamente 3.0km de extensión y una área de aproximadamente 12.5 has y tiene capacidad de almacenar 1.5 millones de metros cúbicos, la presa tiene una longitud de cresta de 400 m, y altura de 130 m, y fue construido para desviar el río en un tramo de 4.0 kilómetros y sirve para regularizar y contener avenidas, permitiendo el almacenamiento de agua a niveles controlados, para poder transvasar hacia aguas abajo en tierras irrigables.

Así como en la cuenca del río Torata, el trayecto del río también presenta material parental de origen diverso, predominando los materiales residuales a partir de rocas volcánicas (andesitas) y de rocas intrusivas (granodiorita, sienita, etc.). En menor extensión se encuentran materiales coluvio-aluviales y aluviales en las pequeñas terrazas cercanas a los ríos. Para una mejor ilustración del río Torata, se presenta la figura 1.



Figura 1 – Imágenes en la zona conocida como “cola del reservorio” (a) Época de lluvia (b) Época seca.

Métodos de estimación indirecta de arrastre de fondo

Fueron analizados dos métodos de estimación indirecta de arrastre de fondo: Método Meyer-Peter & Müller (1948) y Einstein (1950), cuya breve descripción se presenta a continuación:

Método de Meyer Peter y Müller (1948)

La fórmula de Meyer-Peter y Müller (1948), para el cálculo de descarga de sedimentos por arrastre de fondo, fue desarrollado a partir de experimentos con partículas de arena de tamaño uniforme, partículas de arena de diferentes tamaños, grava natural, lignito y barita. Se basa en los siguientes supuestos.

- a) La pendiente de la línea de energía es una característica de interacción entre el movimiento sólido y líquido de un flujo de transporte de sedimentos. Una cierta parte de la energía se consume para el transporte de sólidos y la energía restante para el movimiento líquido.
- b) Los mismos fenómenos gobiernan el transporte de sedimentos y el inicio del movimiento.

Para la aplicación se requiere el conocimiento de los siguientes parámetros: peso específico de los sedimentos, diámetros característicos del material de fondo, la pendiente de la línea de energía, el caudal de flujo y la forma de la sección transversal del canal. La fórmula empírica original de Meyer-Peter & Müller, en el sistema métrico, válida para arenas y gravas con diámetros entre 0.4 a 30mm, en el siguiente (Carvalho, 2008, Vanoni, 1977, Sheppard, 1960, Stevens & Yang, 1989)

$$\gamma_s \cdot \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2} \cdot \rho \cdot S = 0.047 \cdot \gamma_s' \cdot D_m + \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} \cdot q_{sa}^{2/3} \quad (1)$$

En la cual,

$$K_s = \frac{1}{n_s} \quad (2)$$

$$K_r = \frac{26}{(D_{90})^{1/6}} \quad (3)$$

$$\gamma_s' = \gamma_s - 1 \quad (4)$$

Donde:

$\lambda_s =$ Peso específico del agua igual a 1.0 t.m^{-3}

$Q_s =$ parte de la descarga líquida que influye en el lecho, en l.s^{-1}

$Q =$ parte de la descarga líquida que influye en el lecho, en l.s^{-1}

$K_s =$ coeficiente de rugosidad del lecho de Strickler, que es igual el inverso del coeficiente de rugosidad de Manning η_s

$K_r =$ coeficiente de rugosidad de la partícula en $\text{m}^{1/3}.\text{s}^{-1}$

$D_{90} =$ diámetro de la partícula donde el 90% de sedimento de lecho son más finos, en m

$\rho =$ profundidad media, en m

$S =$ gradiente de energía o pendiente de la línea de energía, en m.m^{-1}

$\gamma'_s =$ peso específico del sedimento sumergido, igual a 1.65 t.m^{-3} para el cuarzo

$\gamma_s =$ peso específico del sedimento, igual a 2.65 t.m^{-3}

$D_m =$ diámetro medio de la composición del lecho, en m

$g =$ aceleración de la gravedad igual a 9.815 m.s^{-2}

$q_{sa} =$ gasto sólido del lecho, en t.s^{-1} por m de longitud

$\eta =$ número de fracciones granulométricas del sedimento de lecho

$\eta_s =$ coeficiente de rugosidad de Manning

Método de Einstein (1950)

Einstein (1950) desarrolló un método para estimar la descarga del material de fondo, para diferentes caudales, a partir de los datos de la sección transversal y de muestras de material de fondo, en un tramo seleccionado del río, con flujo uniforme, sobre la base en el concepto de remoción, definida por Einstein (1950) como la fracción de tiempo durante el cual, en cualquier lugar, la fuerza de sustentación instantánea excede el peso de la partícula, es decir, la probabilidad de la relación entre el peso efectivo de la partícula y la fuerza de sustentación instantánea sea menor que 1.

Einstein (1950) supone además que el espesor de la capa inferior es dos veces mayor el diámetro representativo de las partículas del material de fondo y que dentro de esta capa, que es la fuente del material en suspensión, es imposible la existencia de material en suspensión. Su método ha servido de base para diversos investigadores que utilizan sus conceptos para el desarrollo de otros métodos de cálculo de transporte de sedimentos.

La función de carga de fondo de Einstein (1950) es expresada en Simons e Senturk (1977), por la siguiente ecuación:

$$\phi_* = \frac{i_B \cdot q_b}{i_B \cdot g \cdot \rho_s} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g \cdot D^3}} \quad (5)$$

Donde:

ϕ_* :intensidad de transporte de carga de fondo por unidad de longitud para una fracción de partícula individual, o función de tasa de transporte, que es una medida adimensional del transporte de fondo e independiente del tamaño de la corriente. Si ϕ_* es igual en dos flujos diferentes, las dos tasas de transporte de carga de fondo son dinámicamente semejantes.

La descripción detallada de la metodología de aplicación del método de Einstein (1950) se encuentra en Simons y Senturk (1977).

Selección de los puntos o secciones de estudio

Los puntos de estudio se ubicaron en el tramo inmediatamente aguas arriba del reservorio Torata, en la zona conocida como “cola del reservorio”. Para el año 2004, fueron seleccionadas 3 secciones. De todas estas secciones, se obtuvieron las características geométricas como las características hidráulicas del cauce, para los cálculos correspondientes. Para el año 2005, fueron seleccionadas 4 secciones, estas se tomaron en tramos donde el sedimento cambiaba de aspecto, es decir, en donde se podía observar un cambio apreciable en la granulometría. Esto fue corroborado con los ensayos granulométricos posteriores.

Calicatas de material de fondo de lecho

Las dimensiones de las calicatas tuvo como forma promedio de 1.0x1.0 m y profundidad mínima de 1.0 m. El material extraído fue mezclado, uniformizado y cuarteado, tomándose una cantidad de aproximadamente 30 Kg.

Estudio de la Armadura de Lecho

Para el estudio de la armadura de lecho utilizamos una malla con dimensiones de 1.0 x 1.0 m, dividida en cuadrángulos de 0.10 m preparada especialmente (Figura 2). La ubicación de áreas para el estudio con la malla, se determinó sobre las secciones en estudio de acuerdo a las características del material del lecho y la representatividad del mismo respecto al material de cauce inundable.

Los datos de las características de la armadura de lecho, también fueron empleados para evaluar las condiciones hidráulicas de cada una de las secciones, como el coeficiente de rugosidad, velocidad de corte y pendiente así como otros parámetros para los cálculos de sedimentos de fondo, tanto para el método de Meyer-Peter y Müller como para el de Einstein.



Figura 2 – Armadura en el lecho del río Torata.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

De los ensayos realizados en el laboratorio, se obtuvieron las curvas granulométricas para las diferentes secciones del río Torata, ellos se muestran en la figura 3 y tabla 1.

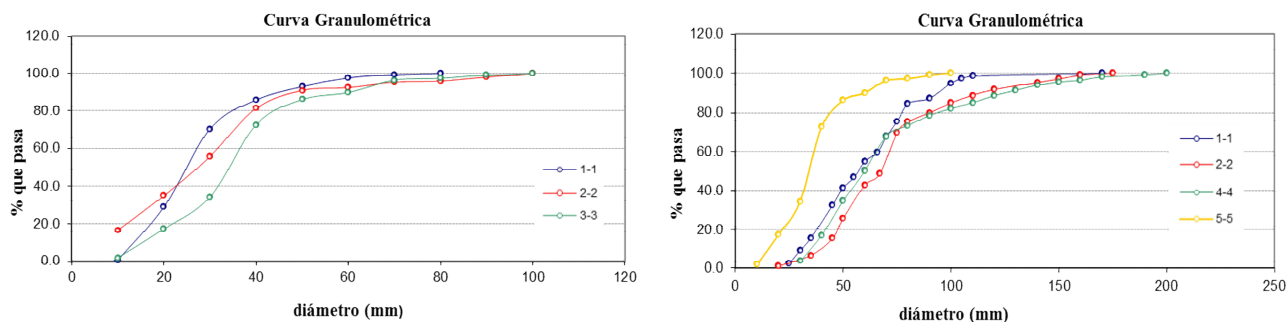


Figura 3 – Curvas Granulométrica (a) año 2004 (b) año 2005

Tabla 1 – Resultados para las secciones estudiadas

Sección	D medido (mm)	S (m/m)	Área (m ²) para tirante = 0.5 m
1 - 2004	45.53	0.042	9.35
2	57.15	0.042	0.92
3	58.27	0.042	1.93
1 - 2005	105.4	0.022	1.72
2	100.7	0.025	2.43
4	114.9	0.030	1.92
5	60.0	0.040	1.84

Con las características de las secciones donde se realizaron calicatas y toma de muestras, se obtiene los parámetros, como el coeficiente de rugosidad, velocidad de corte y pendiente, entre otros parámetros que son utilizados para los cálculos de sedimentos de fondo, tanto para el método de Meyer-Peter y Müller como para el de Einstein.

Al desarrollar la fórmula de los métodos mencionados, se obtiene la relación Caudal Sólido vs. Caudal Líquido, con el cual se procede a calcular la cantidad de sedimentos de fondo para cada caudal horario. El total de sedimento de fondo transportado en el período en estudio, se obtiene como la sumatoria de las cantidades horarias respectivas.

Las representaciones graficas de los cálculos realizados por el método de Meyer-Peter y Müller, para los periodos Enero-Abril 2004 y 2005, se muestran en las figuras 4 y 5

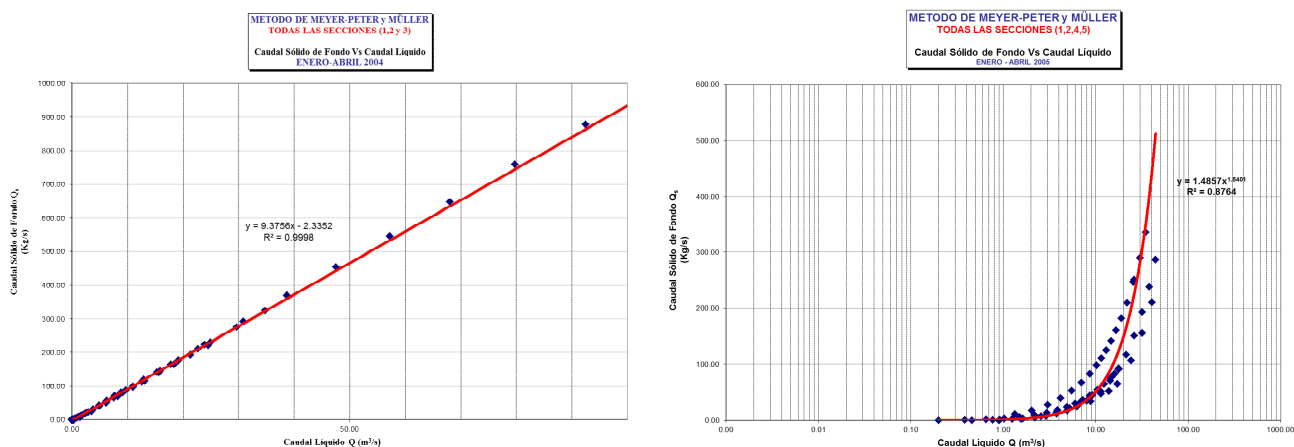


Figura 4 – Curvas para el método de Meyer-Peter y Müller (a) año 2004 (b) año 2005

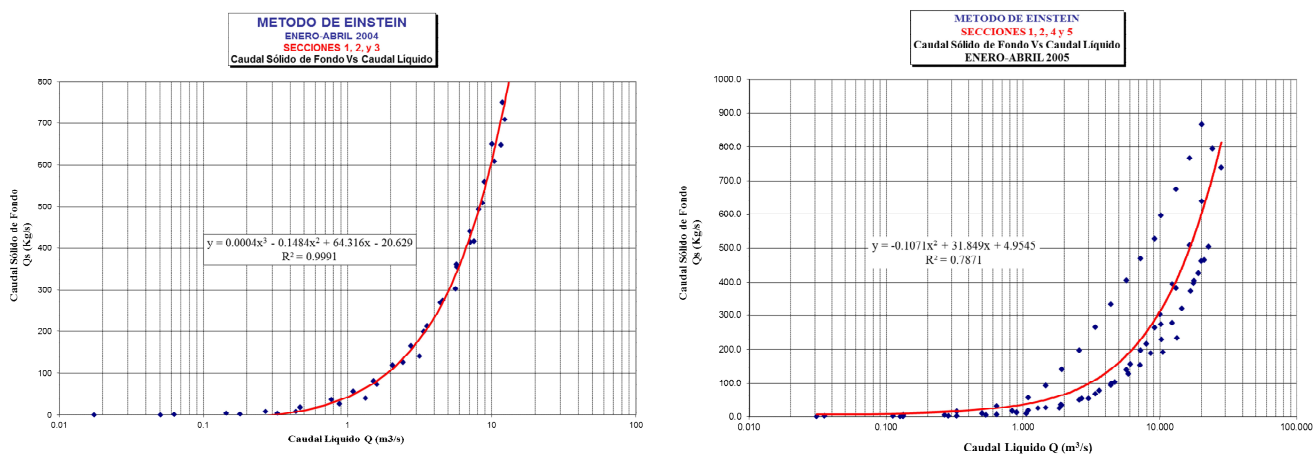


Figura 5 – Curvas para el método de Einstein (a) año 2004 (b) año 2005

La interpretación de las diferentes curvas para cada método, da como resultado la cantidad de sedimento transportado por el fondo o lecho del río, consecuentemente transportado hacia el fondo de la represa. En la tabla 2 se puede apreciar las cantidades de sedimentos transportados estimados por cada método.

Tabla 2 – Resultados de los métodos aplicados

Año	Meyer-Peter y Müller (m³)	Einstein (m³)	V. de agua ingresado (MM³)*	V. Asumido de Sedimento (m³)
2004	195000	25000	9.2	23000
2005	15000	13000	7.57	14000
Total	210000	38000	18.77	-----

* Volumen de agua medido en la estación hidrométrica Arondaya en millones de metros cúbicos (MM3)

** Datos extraídos de

De la tabla 2 se aprecia que la cantidad de volumen de sedimento de fondo transportado en el año 2005 es menor en comparación para el año 2004, esto es resultado de que en el año 2004 se realizaron dragados en la “cola del reservorio” y que por ello pudo ser influenciado, ya que los sedimentos ocuparon el espacio generado por el dragado.

CONCLUSIONES

Los volúmenes de material transportado en este estudio, corresponden a estimaciones de la capacidad máxima potencial de transporte de fondo, aplicando metodologías que se basan en concepciones actuales sobre la ocurrencia de fenómeno del transporte y que tienen bases teóricas y experimentales similares, aplicables a ríos de características como es el río Torata.

En el período 2004 el volumen de sedimentos de arrastre de fondo ingresados al reservorio Torata se estima en el orden de 19,500 – 25,000 m³, mientras que en el año 2005 se halla entre los 13,000 – 15,000 m³. Los métodos aplicados fueron satisfactorios en la aplicación para el río Torata.

Se concluye que la remoción de sedimentos es una actividad que debería hacerse cada año, para así incrementar la vida útil de las represas. En los años monitoreados, se constató que cuando ocurrió la extracción de sedimentos de la “cola del reservorio” el porcentaje de reducción de sedimentos transportados por el río disminuye en 37%.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen al Patronato de la Universidad Nacional de Ingeniería/Perú, a la empresa Southern Perú, en especial a la Gerencia de Recursos Hídricos de la Unidad Operativa Cujone, al Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq y a la Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP.

REFERENCIAS

- CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. – 2ª Ed., ver., atual. e ampliada. – Rio de Janeiro: Interciência, 599p.
- LIMA, L. R. (2008), Dragagem, Transporte e disposição final de sedimentos de leito de rio: Estudo de caso na Calha do Rio Tiete – Fase II. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, POLI – USP, São Paulo 2008.
- SCAPIN, J.; PAIVA, J.B.; BELING, F. (2007). Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um pequeno Rio Urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 12 n. 4 Oct/dec, pp. 05–21.
- SIMONS, D. B. & SENTURK, F. (1977), “*Sediment Transport Technology*”. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
- SOUTHERN (2005). Gerencia de Recursos Hídricos en Unidad Operativa de Cujone: Informe técnico sobre el estudio de sedimentos de fondo del río Torata. Moquegua – Perú, 17 p.
- SHEPPARD, J.R. (1960). *Investigation of Meyer-Peter and Muller formulas*. US Bureau of Reclamation. Denver, Colorado.
- STEVENS, H. H; YANG, C. T. (1989). *Summary and use of selected fluvial sediment discharge formulas*. US Geological Survey. Denver, Colorado.
- VANONI, V.A. (1977). *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers. New York.