

# Análisis de la tasa de sedimentos en suspensión en las descargas de aprovechamientos hidroeléctricos en altas montañas

A case analysis of suspended sediment loads flushed from hydropower reservoirs in highlands

**César Adolfo Alvarado Ancieta.** Ingeniero Civil, M.Sc., Projektleiter  
*Hydropower Development Engineering Division*  
*FICHTNER GmbH & Co. KG, Stuttgart, Germany, www.fichtner.de*  
*alvaradoc@fichtner.de, www.freewebs.com/alvarado-ancieta/*

**Resumen:** El curso natural de un río alcanza normalmente su estado de equilibrio morfológico cuando la tasa de flujo de sedimentos que ingresa es similar o tiene un balance promedio con la que egresa del tramo en estudio. La construcción de presas altera fundamentalmente este balance debido a los cambios en las condiciones hidráulicas, así como a que el mayor volumen o tasa de sedimentos se retiene y deposita en el embalse. Los cambios impuestos en el aporte de éstos a un tramo de un río o la extracción de los mismos pueden modificar significativamente la morfología total del mismo, causando efectos imprevisibles a largo plazo.

El problema de la sedimentación en un embalse es importante en los proyectos hidroeléctricos. Se trata de un proceso paulatino que ocurre bajo la superficie cuando las aguas fluviales se estancan al llegar al embalse y se produce una ralentización del caudal. Los sedimentos gruesos se depositan en la parte superior del vaso formando un delta que puede afectar a los niveles de avenida aguas arriba, mientras que los sedimentos más finos son llevados al interior del vaso. Además de una pérdida en la capacidad de éste, esos sedimentos finos pueden llegar a obstruir las instalaciones de desvío y desagüe e incluso llegar a dañar las turbinas. En el presente artículo se efectúa un análisis de la tasa de sedimentos medidos entre la aportación al embalse y la salida de la central en el caso de un río fronterizo en las montañas del Himalaya. La tasa de sedimentos en suspensión (granos finos, medios y gruesos) medidos a la salida de la descarga de la central se aproxima a la cantidad de limos finos que entran en el embalse ubicado en altas montañas, en una zona donde el transporte de sedimentos es un proceso natural inevitable.

**Palabras Clave:** Alta montaña; Erosión; Limpieza de sedimentos; Transporte de sedimentos; Aporte de sedimentos; Tasa de sedimentos en suspensión

**Abstract:** Natural river reaches are usual in a state of morphological equilibrium where the sediment inflow in average balances the sediment outflow. Dam constructions dramatically alter this balance due to change in the hydraulic conditions as well as trapping of the sediment in the reservoir. Imposed changes in the supply of sediment to a river reach or extraction of sediment from the riverbed can significantly change the overall river morphology. It may cause unexpected side effects in the long term.

Reservoir sedimentation is a major problem throughout hydropower projects. It is a gradual process taking place below the water surface. Sediment deposition occurs as the river meets the still water in the reservoir, and the transport capacity of the flow drops. Coarse sediment is deposited in the upper part of the reservoir forming a delta, which can affect upstream flood levels, while finer sediment is transported further into the reservoir. In addition to the storage loss, the finer sediment deposition can block diversion and abstraction facilities and damage turbines. This paper analyses the fraction particles between (inflow into) a hydropower reservoir and (outflow of) the existing powerhouse in a transboundary river in the highlands applying data obtained from a river in the Himalayas foothills. The suspended sediment load (fine, medium and coarse) measured downstream of the powerhouse almost reaches the quantity of fine silts entering to the hydropower reservoir in the highland foothills, where sediment transport is a natural process which cannot be avoided.

**Keywords:** Highlands; Erosion; Sediment flushing; Sediment transport; Sediment yields, Suspended sediment load



Arriba, embalse para aprovechamiento hidroeléctrico de Pomacocha en serranía central; abajo, embalse con propósitos múltiples de Gallito Ciego, Cordillera de los Andes, Perú / Above, hydropower reservoir in central highlands; below, multipurpose reservoir of Gallito Ciego, Andean Range Mountains, Peru. (Fuente foto inferior / Source Photo below: Google Earth 2007).

### **Objetivo**

---

Análisis de sedimentos a fin de demostrar que la tasa de éstos en suspensión (finos, medio y grueso) que salen o son descargados del embalse equivalen a la cantidad o volumen de limos que ingresan en el mismo.

### **Introducción**

---

Los embalses de saltos hidroeléctricos ubicados en altas montañas, tales como la cordillera Andina y la

### **Objective**

---

*Analysis of sediment data in order to demonstrate that suspended sediment load (fine, medium and coarse) leaving the reservoir reaches the quantity of silts entering to this one.*

### **Introduction**

---

*Reservoirs of hydropower projects in highlands, such in the Andean mountains and Himalayas foothills lose their storage capacity due to a high*

del Himalaya, reducen su volumen de almacenamiento debido a la alta concentración de sedimentos transportados por los ríos, proceso que afecta muy seriamente a la vida de dichos embalses y, en consecuencia, modifica la operación y esquema de este tipo de embalses.

La presencia de limos gruesos en el agua durante los meses de verano, en época de lluvias, puede corroer y dañar las turbinas. En las épocas secas de invierno, con caudales inferiores, solamente algunos de estos saltos llegan a funcionar normalmente, con la consiguiente reducción en la generación de energía. Las aguas rápidas arrastran una gran cantidad de sedimentos aguas abajo y pueden afectar la operación al dañar las máquinas, proponiéndose diversas medidas preventivas basadas en el establecimiento de embalses intermedios a fin de reducir los sedimentos. A continuación se presenta un análisis de las tasas de sedimento basado en los datos disponibles de un caso en estudio.

### La naciente de un río

Se considera un río que tiene su nacimiento en las altas montañas, próximo a un lago. El río discurre paralelo a los pies de la cordillera montañosa, y finalmente penetra en una estrecha garganta. Vuelve a cortar una nueva cordillera, y atraviesa una nueva garganta antes de confluir con otro río y entrar en un gran valle.

### Ubicación típica de las estaciones de aforo para medición de la tasa de sedimentos en suspensión en un esquema hidráulico

A fin de proceder al análisis de sedimentos que lleguen al río procedentes del embalse, se establece la Tabla 1 que recoge los datos obtenidos durante la época de avenidas del año 2005 en tres estaciones de aforo situadas aguas arriba del mismo y una aguas abajo, en la propia central. (Ver figura 1).

La estación 1 está situada aguas abajo de la confluencia de dos ríos, mientras que la 2 recoge los datos de sedimentación de una gran superficie de grandes laderas, aguas arriba del embalse. La estación 3 se localiza inmediatamente anterior al punto en que el río alcanza la cola del embalse y la última estación

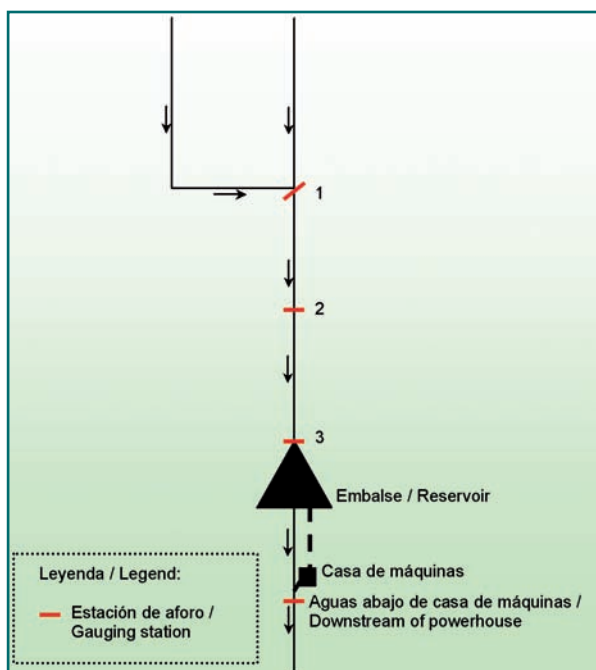


Fig. 1. Esquema típico hidráulico / Typical hydraulic scheme.

*inflow of sediments transported by rivers. This process seriously affects the lifetime of these reservoirs and changes the operation and economics of the hydropower schemes.*

*Heavy silt in the water in summers, during flood seasons often corrodes and damages the turbines of the units. As for winters, due to low discharge, dry seasons, in the river only some units function, resulting in low generation of power. Fast moving waters bring a lot of silt downstream, which often hampers the running of the project as it can corrode the machines. Plans for remedial measures are afoot to build in some cases midway reservoirs, which would reduce the silt. Based on data available from a case under study an analysis of sediment loads of hydropower reservoirs was performed.*

### The Origin of a river

*A river is originated from the higher slopes of holy mountains, near a lake. It flows parallel to the range mountains and foothills, and finally penetrates to a gorgeous pass. It cuts through other mountain range, and makes a deep gorge at the base of the range. Finally, the pass is encountered with other river up to drain in a big valley.*

está situada aguas abajo de la casa de máquinas.

**Proceso de Sedimentación/Erosión**

Se ha observado un aumento en el proceso de sedimentación en el embalse en cuestión debido sobre todo a la erosión en el tramo de río cercano a la estación de aforo nº 2. Esa fuerte erosión se debe a los desprendimientos continuos en una de las márgenes, aumentados por los altos caudales en ese tramo del río

**Fuentes de Datos**

Los datos obtenidos y relativos a los sedimentos finos, medios y gruesos se obtuvieron a través de mediciones llevados a cabo en las estaciones de aforo indicadas en el esquema hidráulico durante la época de lluvias del año 2005 en una campaña de mediciones llevada a cabo durante 25 días.

Al no existir registro de caudales, éstos eran considerados como constantes entre las estaciones de aforo 2, 3 y la salida de la casa de máquinas. Se estimaba el caudal sobre la base del de proyecto de una turbina y del número de turbinas en operación. Por lo tanto, el análisis se llevo a cabo tomando el caudal medio mensual:

$$Q_2 = Q_3 = Q_{\text{salida casa de máquinas}}$$

**Análisis de Datos**

La aportación de sedimentos desde la cuenca del río y fluyendo a través de las estaciones de aforo estaba compuesta, según los datos, por limos gruesos (20-60 µm), medios (6-20 µm) y finos (2-6 µm). Estas fracciones según la diagrama de Hjulstrom (ver figura 2) explican la relación entre la granulometría y la energía por erosión, transporte y depósito aguas arriba del embalse originada en el

| Tabla 1. Concentración de sedimentos en suspensión<br>Table 1. Suspended sediment concentration |   |        |
|---|---|--------|
| Estación de aforo<br>Gauging station  | Concentración de sedimentos en suspensión<br>Suspended sediment concentration |        |
|   | (ppm)   | (T/m³) |
| 1   | 69.500  | 0,07   |
| 2   | 156.000   | 0,16   |
| 3   | 143.000   | 0,14   |
| Salida casa de máquinas<br>Powerhouse outlet  | 63.500  | 0,06   |

**Typical Location of Gauging Stations for Measurement of Suspended Sediment Load in a Hydraulic Scheme**

In order to carry out the suspended sediment load analysis of particles from the reservoir in the river, silt data available measured during the flood season of year 2005 from four gauging stations located three upstream (1, 2 and 3) and one downstream (powerhouse) of the reservoir was analysed, see Figure 1.

Gauging station 1 is located downstream of the confluence of two rivers. Station 2 obtains sediment data measured downstream from an area with large landslides immediately upstream of the reservoir. The gauging station of 3 is situated before the river reaches the tail of the artificial impoundment created by the released from the reservoir are measured in a gauging station located downstream of the powerhouse.

**Sedimentation/Erosion Process**

Sedimentation process in the reservoir of the hydropower station in the river under study is increasing, mainly due to potential erosion in a reach of the river, specifically in the area near of the gauging station 2. The high erosion in this area is due to a continuous sliding in a river bank, which is increased with the high discharges in the river.

**Source Data**

Source data regarding coarse, medium and fine silts from measurements carried out in the gauging stations shown in the hydraulic scheme for a case under study was available for the flood season of the year 2005 during a gauging campaign which last 25 days.

Since no flow records at the stations were available, the discharges were

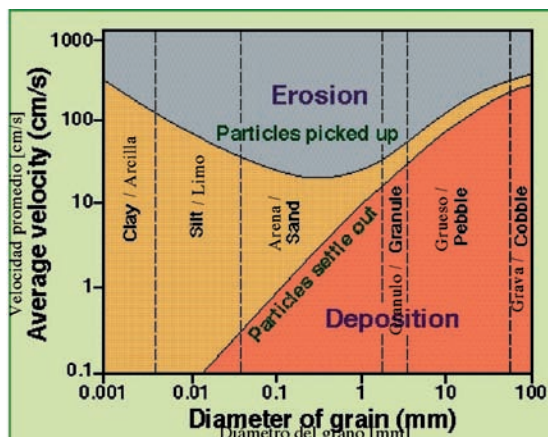


Fig. 2. Diagrama de Hjulstrom/Hjulstrom's diagram.

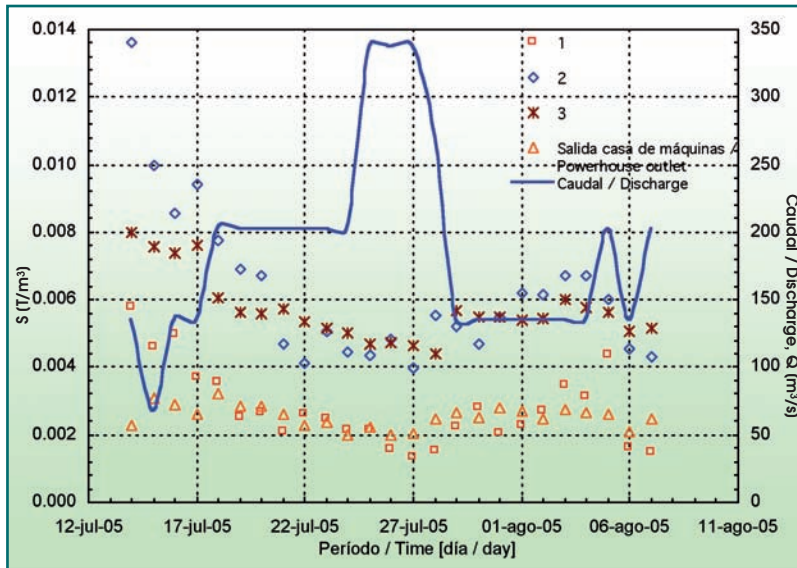


Fig. 3. Tasa de transporte de sedimentos en suspensión durante el período de avenidas 2005 considerando el caudal en función del número de unidades en operación / Suspended sediment transport load during the flood season 2005 taking into account the discharge in function of the number of units in operation.

río entre las estaciones de aforo números 1 y 3. Los datos muestran que durante la época de lluvias 2005 y para un caudal máximo de 340 m<sup>3</sup>/s y un caudal medio de 185 m<sup>3</sup>/s, una tasa importante de sedimentos en suspensión paso por esas estaciones de aforo. Como se aprecia en la tabla 1, un porcentaje alto de estos sedimentos fueron aportados desde la zona 2, en una cantidad dos o tres veces mayor que la concentración medida en la zona 1.

La cantidad de sedimentos en suspensión medida en la zona 2, en término medio, se equilibra con la aportación de sedimentos que llegan al embalse desde la zona 3.

La figura 3 muestra que la aportación máxima de sedimento aguas arriba del embalse, en la zona 3, se registró durante el primer día de la campaña de mediciones. De hecho, la aportación al embalse era mayor que los caudales desaguados por la Central Hidroeléctrica, dependiendo del número de máquinas que estuviesen en funcionamiento y de los caudales resultantes de la operación del embalse entre el 24 y 29 julio.

A pesar de la dificultad de obtener muestras de sedimentos en los ríos en zonas montañosas así como el hecho de que los datos disponibles pueden verse afectados por defectos en las técnicas de medición y por los cortos periodos de su aplicación, (como suce-

considered to be constant between the gauging stations of 2, 3 and the powerhouse outlet. The magnitude of flow was estimated on the design discharge of one turbine and the number of turbines in operation. Therefore, the analysis was performed taking into account the following condition of mean monthly discharges.

$$Q_2 = Q_3 = Q_{\text{POWERHOUSE-OUTLET}}$$

### Data Analysis

The total sediment outflow, sediment yield, from the catchment area of the river routing through the control stations according to the source data was composed of coarse silt (20-60 μm), medium silt (6-20 μm) and fine silt (2-6 μm). These fractions according to the Hjulstrom's diagram, see Figure 2, explains the relationship between particle size and energy for erosion, transportation and deposition occurred upstream of the reservoir between 1 and 3 gauging stations. Data measured shows that during the flood season 2005 for a peak flow near of 340 m<sup>3</sup>/s and a mean flow of 185 m<sup>3</sup>/s a high suspended sediment

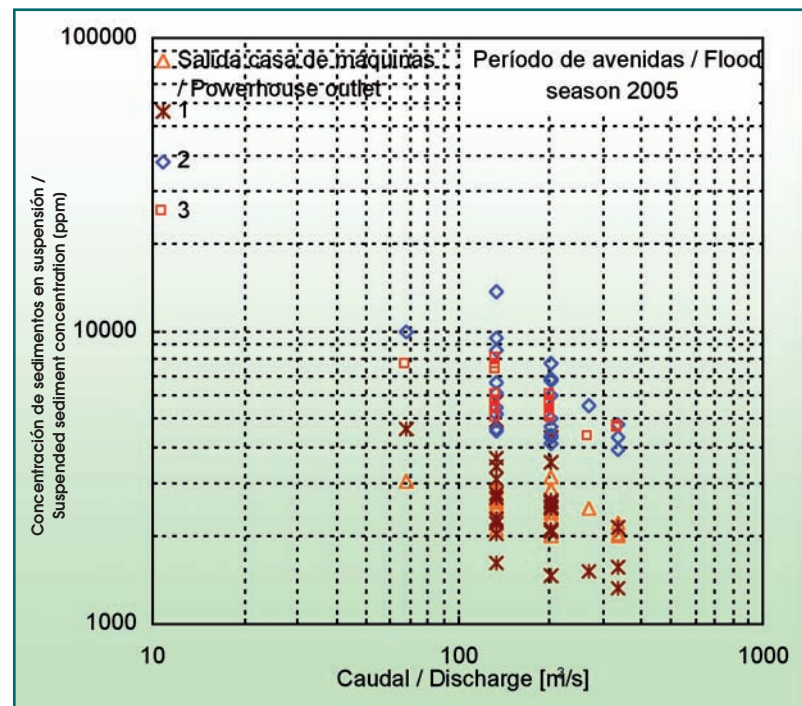


Fig. 4. Ploteo de la concentración y caudales en el río - período de avenidas 2005 bajo las consideraciones asumidas / Concentration and discharge plot of the river - flood season 2005 under conditions assumed.

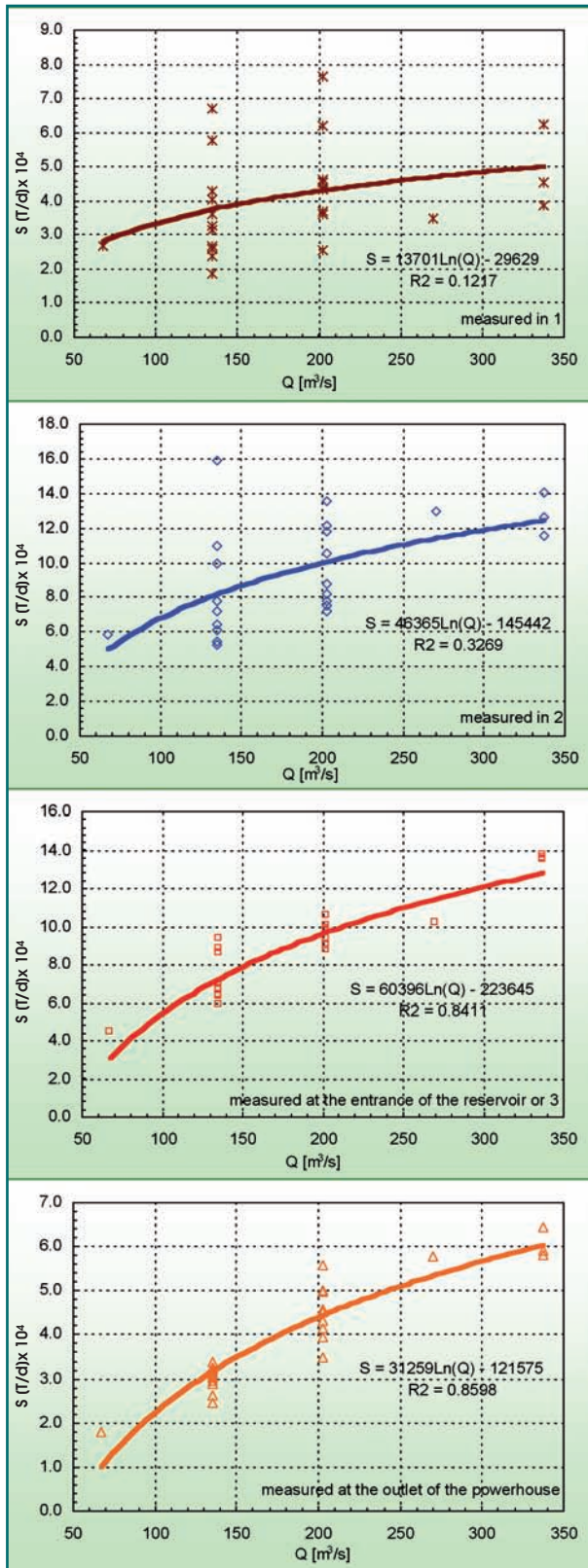


Fig. 5. Ploteo del caudal y tasa de sedimentos en suspensión (S) para 1, 2, 3 y salida de casa de máquinas / Discharge and suspended sediment load (S) plot for 1, 2, 3 and PH outlet stations.

load passed through the gauging stations. As summarised in Table 1, the contribution of major amount of sediments came from the vicinity area of 2 representing this 2,3 times the concentration measured in 1.

The suspended load measured in 2 is in average equilibrated with the inflow sediments reaching the reservoir in 3.

In Figure 3 it is shown that the peak sediment yield upstream of the reservoir, in 3, is registered for the first day of observation during the campaign of measurements. In fact, the inflow to the reservoir was higher than the flow discharge assumed considering the number of units in operation in the HPP, and the discharges assumed between 24 and 29 July are due to the reservoir operation.

In Figure 3 it is shown that the peak sediment yield upstream of the reservoir, in 3, is registered for the first day of observation during the campaign of measurements. In fact, the inflow to the reservoir was higher than the flow discharge assumed considering the number of units in operation in the HPP, and the discharges assumed between 24 and 29 July are due to the reservoir operation.

In spite of sediment sampling in mountain rivers is difficult to achieve and data available is often questionable with respect to the data quality, partly due to shortcomings in the available sediment measurement techniques and short periods of measures like in this case, the correlation between water flow under the condition assumed and observed suspended sediment concentration for the area on study shown in Figure 4 indicates a similarity in the tendency for sediment inflow between 2 and 3. The analysis also indicates that approximately the 60% of the incoming sediments to 3 are impounded in the reservoir. Only the 40% of these are released through the tailrace tunnel after passing the powerhouse.

In spite of sediment sampling in mountain rivers is difficult to achieve and data available is often questionable with respect to the data quality, partly due to shortcomings in the available sediment measurement techniques and short periods of measures like in this case, the correlation between water flow under the condition assumed and observed suspended sediment concentration for the area on study shown in Figure 4 indicates a similarity in the tendency for sediment inflow between 2 and 3. The analysis also indicates that approximately the 60%

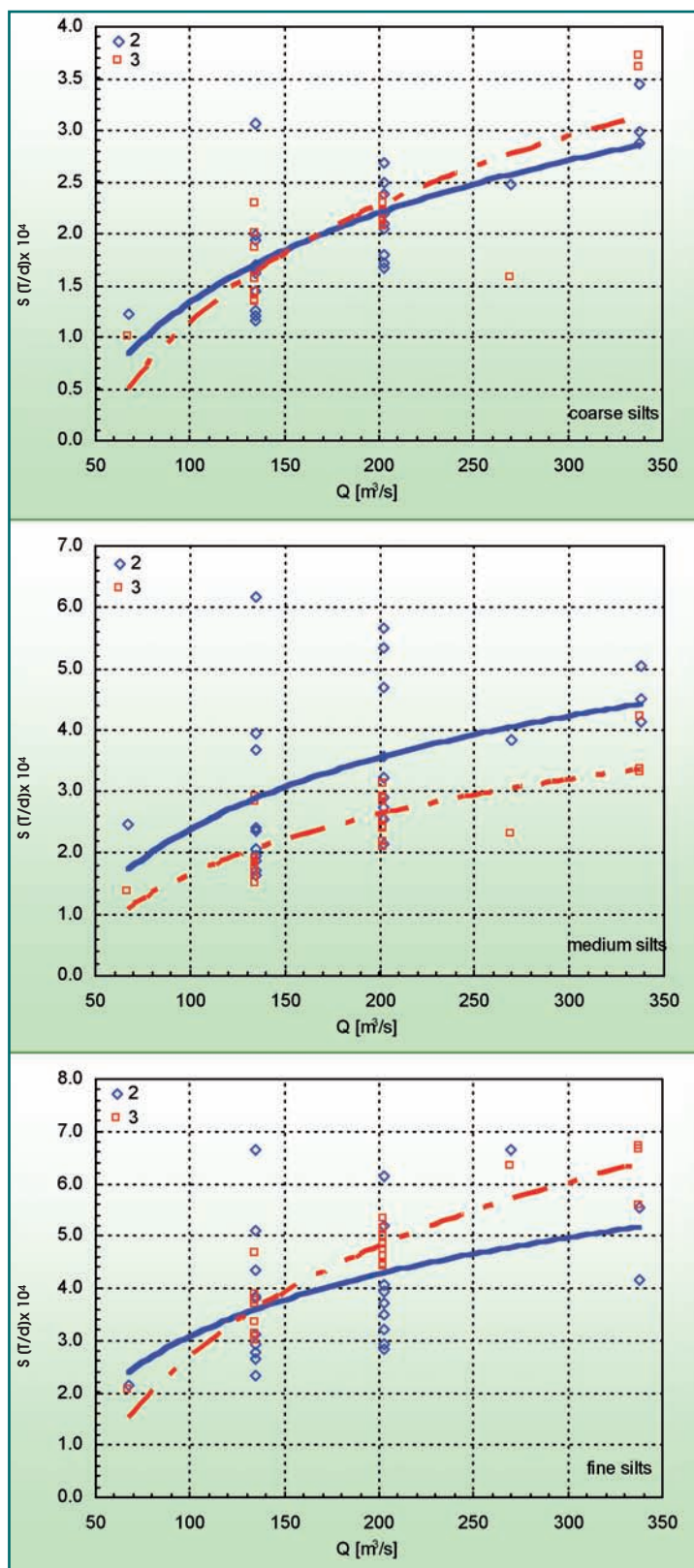


Fig. 6. Comparación de caudales y sedimentos de tamaño grueso, medio y fino registrados en 2 y 3 / Comparison of discharge and coarse, medium and fine silts measured in 2 and 3.

of the incoming sediments to 3 are impounded in the reservoir. Only the 40% of these are released through the tailrace tunnel after passing the powerhouse.

Figure 5 shows the increasing tendency of sediment loads reaching the reservoir. Despite of the bad correlation for 1 and 2 stations, the trendline for 3 is observed to have a good adjustment for data measured. The trendline for Powerhouse outlet is the best due to particle size of sediment loads as it will be explained later.

Figure 6 shows the plotting sediment loads for coarse, medium and fine silts sediments measured between 2 and 3. The graphs in Figure 6 indicate that inflow coarse silt loads between 2 and 3 are in the same range. However, inflow medium silt loads measured in 3 are a little less than those measured in 2; and fine silt loads in 3 are larger than in 2.

This proves that the medium and coarse fractions of the sediment are deposited mainly in the tail of the reservoir; meanwhile fine silts are accumulated more downstream in the impounded area and eventually flushed by the gated-spillway or mainly by the turbine units. This observation is in line with the reference shown in Figure 7.

Figure 8 shows the result of the comparison in sediment transport between all gauging stations. As it can be seen the quantity of sediment yield between 2 and 3 are almost equal at different discharges. This means, that the sediments are transported along the river reach (2-3), and finally reach the reservoir area. At the powerhouse outlet considerable less particle sediments are transported. Therefore the difference between the station 3 and the powerhouse outlet is deposited in the reservoir. In consequence a high sedimentation process takes place in the reservoir. The amount of depositions is higher at higher flows. The sediments are measured in three fractions, coarse, medium and fine silts. The analysis of the fractions between 3 and the powerhouse data show, that the suspended sediment load (fine, medium and coarse) measured at the powerhouse almost reach the quantity of fine silts measured in 3, see Figure 9.

This proves that the medium and coarse fractions of the sediment are deposited in the reservoir. This is in line with observations in different part of the world with high sediment loads, such as the Andes in South America or the Himalayas in Asia; the coarse material is deposited in reservoirs due to reduced velocity and the fine particles are entering the waterway and

de en este caso), la correlación entre el caudal y la concentración de sedimento en suspensión observada en la zona de estudio e indicada en la Figura 4, muestra una semejanza en la tendencia del aporte de sedimentos entre los puntos 2 y 3. El análisis también muestra que aproximadamente el 60% de los sedimentos que llegan a la zona 3 se depositan en el embalse. Y que solamente el 40% de estos sedimentos son controlados en el túnel, tras haber pasado por la central.

La figura 5 muestra el aumento en las tasas de sedimentos aportados al embalse. A pesar de la mala correlación aparecida entre las estaciones 1 y 2, los resultados para la 3 se ajustan a los datos medidos e incluso es mejor la observada en la zona de medición a la salida de la central debido a la granulometría del sedimento tal como se señala más adelante.

La figura 6 muestra las comparación de caudales y sedimentos de tamaño grueso, medio y fino registrados en las estaciones de aforo 2 y 3. Esos gráficos indican que el aporte de sedimentos gruesos entre 2 y 3 están en la misma línea, que el aporte de sedimentos medios en la 3 es algo menor que los registrados en la 2, y, finalmente, que las tasas de sedimentos finos aportados a la zona 3 son mayores que las de zona 2.

Estos datos muestran que los sedimentos gruesos y medios se depositan aguas arriba del embalse, mientras que los limos más finos se acumulan aguas abajo y se eliminan más tarde por el aliviadero o las turbinas, tal como se refleja en la figura 7.

La figura 8 muestra la comparación en el transporte de sedimentos entre todas las estaciones de aforo. Como se puede observar, las tasas de sedimento depositado entre las zonas 2 y 3 son casi iguales para distintos caudales, es decir que los sedimentos son transportados por el tramo del río (2-3) y terminan en la zona del embalse. La cantidad de sedimentos en suspensión que llegan a la salida de la casa de máquinas es bastante inferior. Por lo tanto, la diferencia entre la estación de aforo 3 y la salida de la central se deposita en el embalse, donde hay un proceso de sedimentación bastante alto que va en aumento con caudales superiores. El análisis de los tamaños (gruesos, medios y finos) entre la zona 3 y la salida de la central muestra que la tasa de sedimentos en suspensión registrado en este punto es casi igual que la cantidad de limos finos registrados en 3 (ver figura 9).

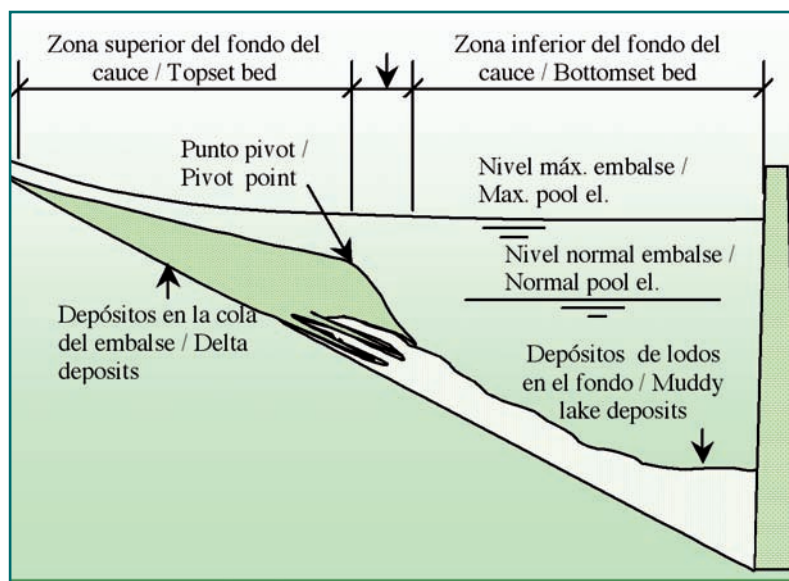


Fig. 7. Bosquejo mostrando el punto pivot entre la región de deposición de materiales gruesos y limos de grano medio en la zona superior del fondo del embalse, y los limos de granos finos en la zona inferior del fondo del embalse / Scheme showing the pivot point between the deposition of coarse and medium silts at the topset bed, and fine silts at the bottomset bed of the reservoir.

might cause abrasion effects on the turbine wheels. From the data available with a duration of 15 days the amount of sediment depositions was calculated to 1,2 Mio tons, that means 0,45 Mio m<sup>3</sup>. A rough and conservative estimation give a sediment load of approximately 2,4 ton/month and it means around 7,2 tons or more than 2,7 Mio m<sup>3</sup> during the all rainy season, which could be increased up to 5 Mio m<sup>3</sup> for silts only.

However it should be clearly stated, that the transported sediments calculated above cover the suspended load only, since the maximum diameter of particles is in the range of 2 mm. In the rivers of the Himalayas the river bed consists of coarse material having gravel as well as cobbles with diameters in the range of 60 - 120 mm. These sediment materials are transported during flood conditions as well in the form of bed load and are expected to be deposited in the reservoir as well. For this type of sediments special measurement devices are required.

### Tackling the Problem

The only way to tackle the problem is to determine an appropriate design of the reservoir and the dam in order to ensure the planned storage capacity of the plant. This is proposed to be carried out stepwise as follows:

Todo ello prueba que las fracciones gruesas y medias del sedimento se depositan en el embalse, lo que concuerda con las observaciones registradas en otras partes del mundo con altas tasas de sedimento, como la cordillera de los Andes en Sudamérica o el Himalaya en Asia. El material grueso se deposita en los embalses debido a la velocidad reducida mientras que las partículas más finas entran en el canal y pueden llegar a dañar las turbinas. De los datos disponibles, la cantidad de sedimento depositado durante un periodo de 15 días asciende a 1.2 Mio tn, lo que equivale a 0.45 Mio m<sup>3</sup>. Según una estimación conservadora se deposita una tasa de sedimento de alrededor de 2.4 toneladas por mes y de hasta 7.2 tn o más de 2.7 Mio m<sup>3</sup> durante la época de lluvias, pudiendo alcanzar hasta 5 Mio m<sup>3</sup> solamente en términos de limos.

Sin embargo, hay que decir que el cálculo de los sedimentos transportados se refiere solamente a la tasa en suspensión, cuyo diámetro máximo de partículas es de alrededor de 2 mm. En los ríos del Himalaya, donde el lecho del río está constituido básicamente por material grueso con grava y guijarros cuyos diámetros oscilan entre los 60-120 mm, estos sedimentos son transportados durante épocas de lluvias en forma de acarreo y es de suponer que llegan también al embalse, lo que requiere, entonces, unos instrumentos de medición especiales.

### Una forma de enfrentar el problema

El problema solamente puede ser enfrentado por medio de un adecuado estudio del embalse y de la presa para asegurar la capacidad de almacenamiento de la instalación. Esto puede ser llevado a cabo como sigue:

- Estimación de las tasas de sedimento esperadas (sedimento en suspensión y acarreo) basada en un amplio plan de mediciones.
- Cálculo de la sedimentación previsible en el embalse en base a los materiales transportados.
- Planificación del proyecto hidroeléctrico con diseños apropiados, en particular en el embalse, la presa, las estructuras hidráulicas y la obra de toma.
- Determinación de medidas preventivas durante la explotación (transporte, sedimentación, y niveles operativos del embalse).

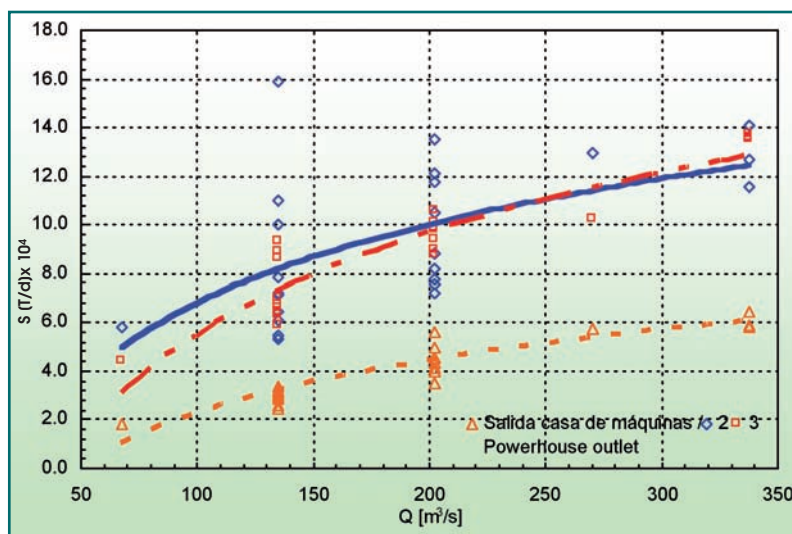


Fig. 8. Caudal vs. tasa de sedimentos en suspensión registrado en los puntos de medición 2, 3 y salida de casa de máquinas en el río/ Discharge vs. suspended sediment load at stations 2, 3 and Powerhouse outlet in the river.

- Estimation of expected sediment loads (suspended load and bed load) based on extensive field measurements.
- Calculation of expected reservoir sedimentation based on transported materials.
- Planning of adequate design of hydropower structures, especially reservoir, dam, hydraulic steel structures and the intake (entrance orientation, intake entrance).
- Determination of countermeasures during operation (sediment flushing, sediment routing, reservoir operation levels).

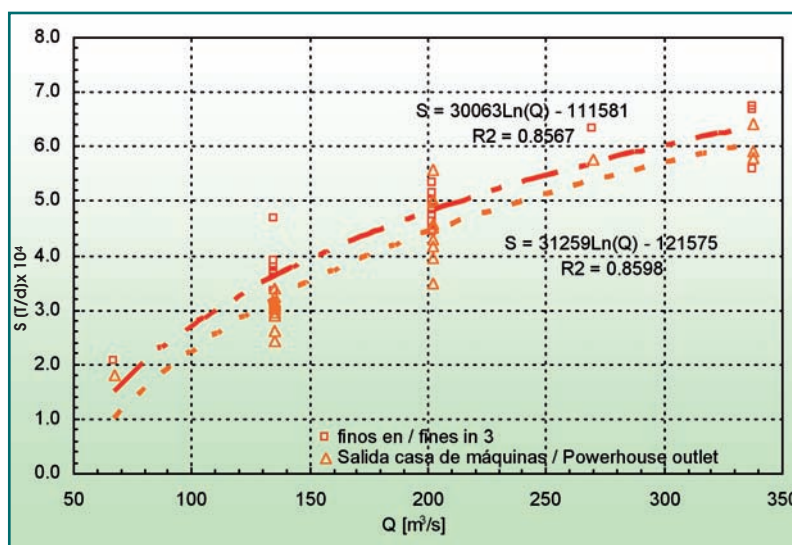


Fig. 9. Caudal vs. tasa de sedimentos finos en suspensión registrados en 3 y salida de casa de máquinas/ Discharge vs. fine suspended sediment load in 3 and at the Powerhouse outlet.

- Control continuado de acuerdo con las previsiones de cálculo, mediante ensayos en modelo físico y numérico.

Se contrasta la distribución de velocidades y niveles en el embalse y otras zonas, como en la toma o el cauce, para calcular la sedimentación y la efectividad de las medidas preventivas. Con este enfoque se puede alcanzar la vida útil del embalse y asegurar el buen desarrollo económico del proyecto.

### Conclusiones

El análisis de las partículas de sedimentos entre el punto de medición 3 y la salida de la central bajo las condiciones asumidas muestra que la tasa de sedimentos en suspensión (granos finos, medios y gruesos) medidos a la salida de descarga de la central se aproxima al volumen de limos finos en el embalse. Esto prueba que las partículas de sedimentos de grano medio y grueso se depositan en el embalse, de acuerdo con las observaciones realizadas en diferentes partes del mundo en zonas de embalses con una elevada tasa de flujo de sedimentos.

Se concluye, pues, que dependiendo de la velocidad y el caudal de ingreso en el embalse, aproximadamente del 5 % al 10 % de los sedimentos finos en suspensión que llegan a él se depositan en el mismo, y, por lo tanto entre el 90 % y 95 % de ellos es descargado a través del conducto de descarga de la central. Estos son de importantes parámetros que deben ser tenidos en cuenta a la hora de hacer una estimación aproximada de la sedimentación en los embalses de aprovechamientos hidroeléctricos en altas montañas. ♦

- Confirmation of planning by means of numerical model and physical model testing.

By means of numerical and physical models the velocity distribution in the reservoir as well as in specific areas and elevations, for instance at the intake or the riverbed can be studied in order to investigate the sedimentation and the effectiveness of countermeasures. By applying the stepwise approach the planned lifetime of the reservoir can be reached and the economics of the hydropower project is ensured.

### Conclusions

The analysis of the fractions between 3 and the powerhouse under the conditions assumed shows that the suspended sediment load (fine, medium and coarse) measured at the powerhouse-outlet almost reach the quantity of fine silts in the reservoir. This proves that the medium and coarse fractions of the sediment are deposited in the reservoir and this is in line with observations in different part of the world with high sediment loads.

It is concluded that depending on velocity and discharge inflow into the reservoir approximately in the range of 5 % to 10 % of suspended fine sediment load inflow is deposited in the impoundment, therefore between 90 % and 95 % of suspended fine sediment load inflow is flushed through the powerhouse outlet. These are important parameters to be considered for a roughly estimation of reservoir sedimentation for hydropower development in highlands. ♦

### Referencias / References

-(1) CHANG, F.J. - LAI, J.S. - KAO, L.S. (2003). *Optimization of operation rule curves and flushing schedule in a reservoir*. Volume 17, Issue 8, Pages 1623-1640, Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Ltd.  
-(2) DE VRIES, M. (1985). *Engineering potamology - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.  
-(3) GAWEESH, M.T.K. - RAMADAN, K.A.H. - KLAASSEN, G.J. (2001). *Sediment transport in rivers - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.

-(4) JANSEN, P.Ph. (1979). *Principles of river engineering, The non-tidal alluvial river*. Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft University of Technology, ISBN 90-6562-146-6.  
-(5) LYSNE, D. - GLOVER, B. - STOLE, H. - TESAKER, E. (2003). *Hydropower Development, Hydraulic Design, 8, Sediment Transport and Sediment Handling*. Norwegian University of Science and Technology, Norway, ISBN 82-7598-027-5.  
-(6) MARTIN VIDE, J.P. (2002). *Ingeniería de Ríos*, Ediciones UPC, Barcelona, Spain, ISBN 84-8301-563-3.  
-(7) RAUDVIKI, A. (1982). *Grundlagen des Sedi-ment-transportes*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.  
-(8) STOLE, H. (1993). *Withdrawal of water from Himalayan Rivers - Sediment Control at Intakes*. Nor-

wegian University of Science and Technology, Norway.  
-(9) UHRICH, M. (2002). *Determination of total and clay suspended-sediment loads from instream turbidity data in the north Santiam River Basin, Oregon; 1998-2000*. Turbidity and Other Sediments Surrogates Workshop, Reno, USA  
-(10) VAN RIJN, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.  
-(11) VISCHER, D.L. - HAGER, W.H. (1996). *Reservoir Sedimentation*. Dam Hydraulics.  
-(12) ZANKE, U. (1982). *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.