



La Represa Inambari – Transporte de Sedimentos

Documento de Trabajo # 14

Autor: Bruce Forsberg

Fecha: Junio 2013

Una de las principales preocupaciones que surge cuando se represa un río con un alto contenido de sedimentos como el Inambari es determinar cuál va a ser el efecto a nivel regional de la alteración del ciclo de sedimentos. Luego de cerrado el embalse, la velocidad de la corriente se reducirá de manera considerable y la mayor parte de los sedimentos, que inicialmente eran transportados por el río ya sea en suspensión o arrastrados por el fondo, quedarán depositados (“atrapados”) en el fondo del embalse. Si la tasa de sedimentación dentro del embalse es muy elevada existe la posibilidad de que el ducto de ingreso a las turbinas por donde usualmente el agua es liberada para generar energía quede bloqueado, reduciendo así el tiempo de vida útil de la hidroeléctrica y amenazando la viabilidad económica del proyecto. Aguas abajo de la represa el aporte de sedimentos también se reducirá considerablemente con impactos significativos en la estabilidad de los hábitats bentónicos, tanto del canal como de la llanura inundable. A continuación se presentan estimaciones de campo relacionadas a la concentración de sedimentos totales en suspensión (STS, mg/L), descarga de agua (D, m³/s) y descarga de sedimentos (STSflujo, g/s) para el canal principal y los tributarios del río Inambari, estas estimaciones nos han permitido estimar la descarga de sedimentos que entrará en el reservorio y el periodo que tomará en saturarse de sedimento, así como la reducción en la descarga de sedimento en el canal principal aguas abajo de la represa.

SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

Los muestreos implementados entre agosto 2002 y marzo 2012 nos han permitido estimar la concentración de sedimentos en suspensión, y la descarga de agua y sedimentos para 134 ríos y quebradas en la cuenca Inambari (Figura 1). Asimismo a partir de un modelo digital de elevación (DEM –Digital Elevation Model) de la región generado por información recogida por la misión topográfica de radar de la NASA (SRTM –Shuttle Radar Topography Mission) se ha estimado la pendiente media en zonas aguas arriba de cada punto de muestreo.

El flujo de sedimentos totales en suspensión (STSflujo) en la mayoría de los ríos y quebradas arriba del reservorio varió principalmente en función de la descarga (Figura 2), con un pequeño –pero significativo– residuo asociado principalmente a la pendiente media de cada uno. Los cuatro valores atípicos que se muestran en la figura 4 (círculos en blanco) pertenecieron a los tributarios Dos de Mayo y Caychihue, ríos ubicados aguas abajo del sitio propuesto para la represa y que presentaron un flujo de sedimentos significativamente elevados debido a la intensa extracción de oro que ocurre en esas cuencas. Excluyendo estos valores atípicos, el 85% de la variación total de TSSflux fue explicada por la siguiente relación: $\ln(\text{TSSflux}) = 1.386(\ln D) -$

0.050 (S) - 3.250. Esta relación se utilizó para estimar la descarga de sedimentos para todos los tributarios con áreas mayores a 5 km² que descargan en el embalse.

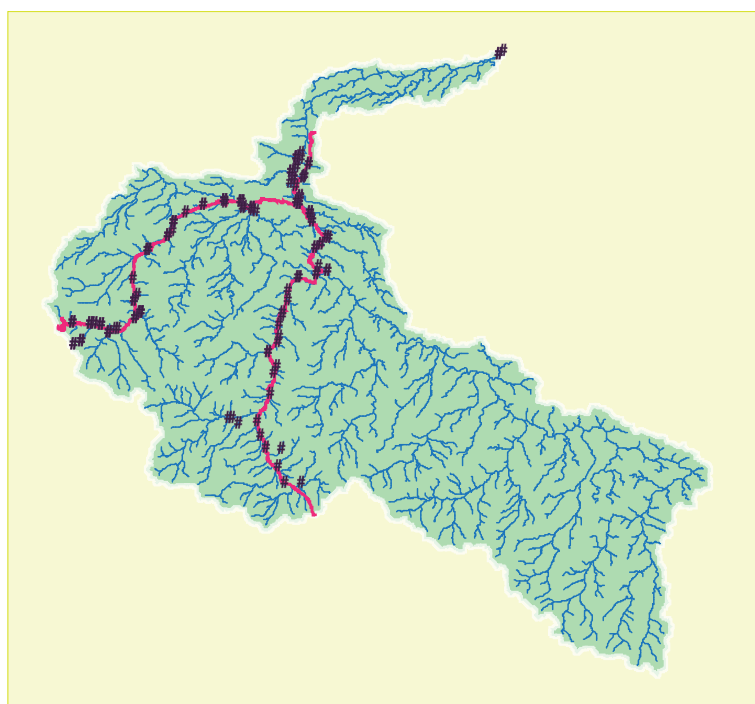


Figura 1. Puntos de muestreo en la cuenca del río Inambari.

Utilizando también la información del modelo digital de elevación (DEM-SRTM) se ha calculado la extensión geográfica del embalse y de cada uno de sus tributarios, así como también el nivel de agua promedio en la represa (514 msnm) (Figura 3). La pendiente media de cada tributario también fue estimada utilizando la misma fuente de información.

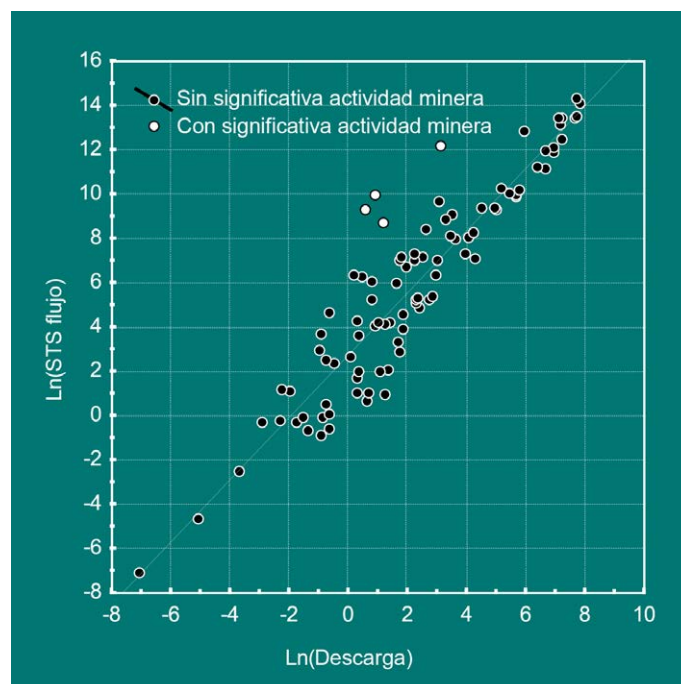


Figura 2. Relación entre la descarga (Ln) y el flujo de sedimentos totales en suspensión (Ln) encontrados en los tributarios de la cuenca Inambari.

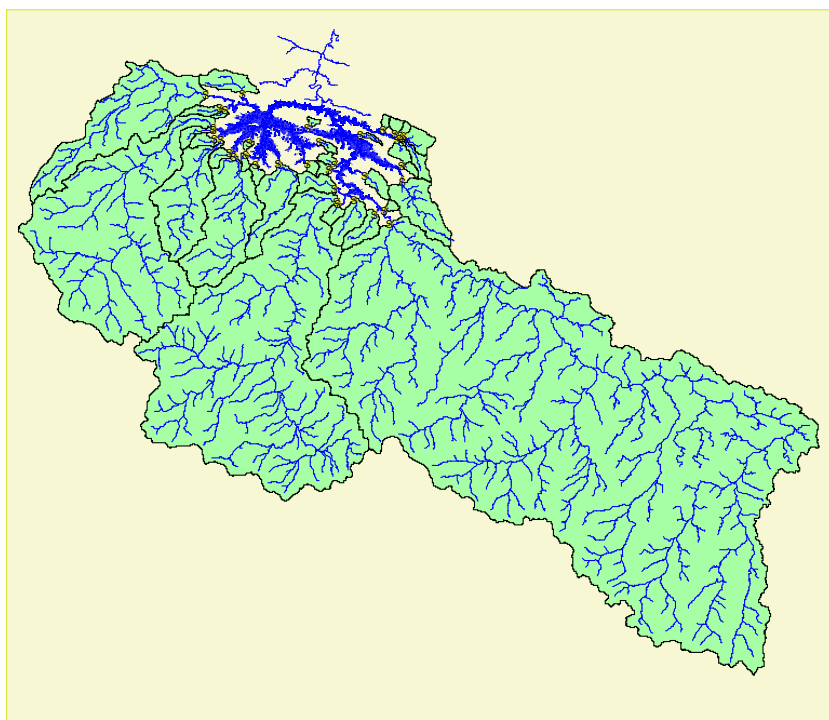


Figura 3. Extensión (polígonos en azul) del reservorio de la propuesta represa Inambari. Se muestran los puntos de descarga de los tributarios que descargan en el reservorio (puntos amarillos).

La descarga diaria en la desembocadura de cada tributario (puntos amarillos) fue calculada como el producto del área de la cuenca (km^2) por la descarga diaria ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{s}$), la cual fue estimada a partir de la relación entre el flujo y el nivel de agua (m), esta última información recogida en el puente Inambari (Figura 4). El flujo promedio anual de sedimentos fue estimado para cada uno de los tributarios que descargan en el embalse a partir de valores diarios de STS y descarga para el período comprendido entre 1 enero 2009 - 31 diciembre 2011. Se estimó que el volumen total de sedimentos en suspensión descargado por todos los tributarios dentro del embalse es 6'096,699 toneladas/año, lo cual posiblemente represente un valor subestimado si consideramos que nuestros cálculos utilizaron concentraciones superficiales de STS. Si se utilizaran las concentraciones integradas de STS (un promedio de STS que incluye registros a diferentes niveles en toda la columna de agua) es posible que los niveles de descarga se dupliquen (Meade 1985) alcanzando 12'193,398 toneladas/año. Asumiendo que la densidad aparente es similar a la encontrada en los sedimentos de los lagos de las llanuras de inundación de Amazonía Central ($1,396 \text{ kg/m}^3$, Devol et al. 1984), esto significa un volumen total de sedimentos de 8'734,526 $\text{m}^3/\text{año}$.

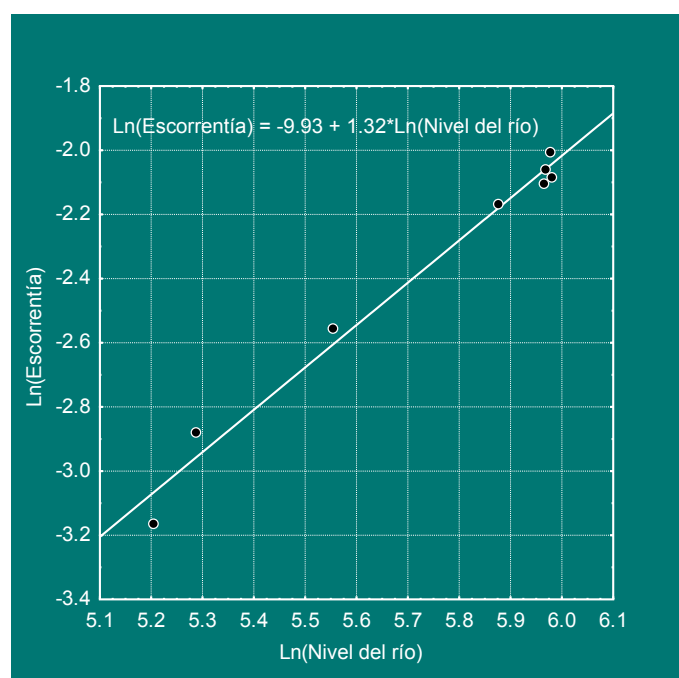


Figure 4. Logaritmo natural de la Escoventía ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{s}$) versus el logaritmo natural del nivel del río (m) para el río Inambari en el puente Inambari.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL FONDO DEL CANAL

El transporte de sedimentos que va sobre el lecho del río es más difícil de estimar debido a la compleja relación que existe entre la velocidad de la corriente, las dimensiones del canal, y el tamaño y flujo de las partículas. Existen pocas estimaciones disponibles sobre el transporte de sedimentos en el fondo del río para tributarios de cabeceras de origen andino, estos sugieren que el material de fondo representa entre 10 a 13% del total anual de sedimentos transportados (ENDE 1980; Palenque 1981; Asociación ICLA 1982; Vollmers y Palenque 1983, Martin 1977). A partir de estos valores Guyot (1993) asumió que los afluentes altoandinos bolivianos aportaban el 10% del total de sedimentos transportados. Suponiendo que este mismo valor ocurre en los afluentes que desembocan en el reservorio Inambari, el flujo total anual de sedimentos de fondo sería de 1'354,822 toneladas al año. Suponiendo que la densidad aparente para el canto rodado o cascajo es de $1,890 \text{ kg/m}^3$ (Carling y Reader 1982), existirá un volumen adicional de sedimento de $716,837 \text{ m}^3$ por año, resultando un flujo volumétrico total de $9'451,363 \text{ m}^3$ al año.

Se ha estimado la batimetría del embalse considerando que 514 msnm es el nivel promedio de agua necesaria para su operatividad (Figura 5). Considerando que el canal que llevará el agua del reservorio hacia las turbinas estará ubicado a 484 msnm (Vega et al. 2012), esta ubicación corresponde a una profundidad media de 30 m, y si los sedimentos llegan a acumularse alcanzando este nivel, las turbinas ya no estarán operativas. Se prevé que el volumen total de agua debajo de este nivel será $7,984'791,650 \text{ m}^3$. Si asumimos que la tasa de acumulación promedio es de 9.43 millones m^3 de sedimentos por año, este volumen crítico de sedimentos se alcanzará únicamente después de 846 años. Por tanto, no es probable que la sedimentación aluvial afecte significativamente el funcionamiento de la represa Inambari durante su tiempo de vida útil.

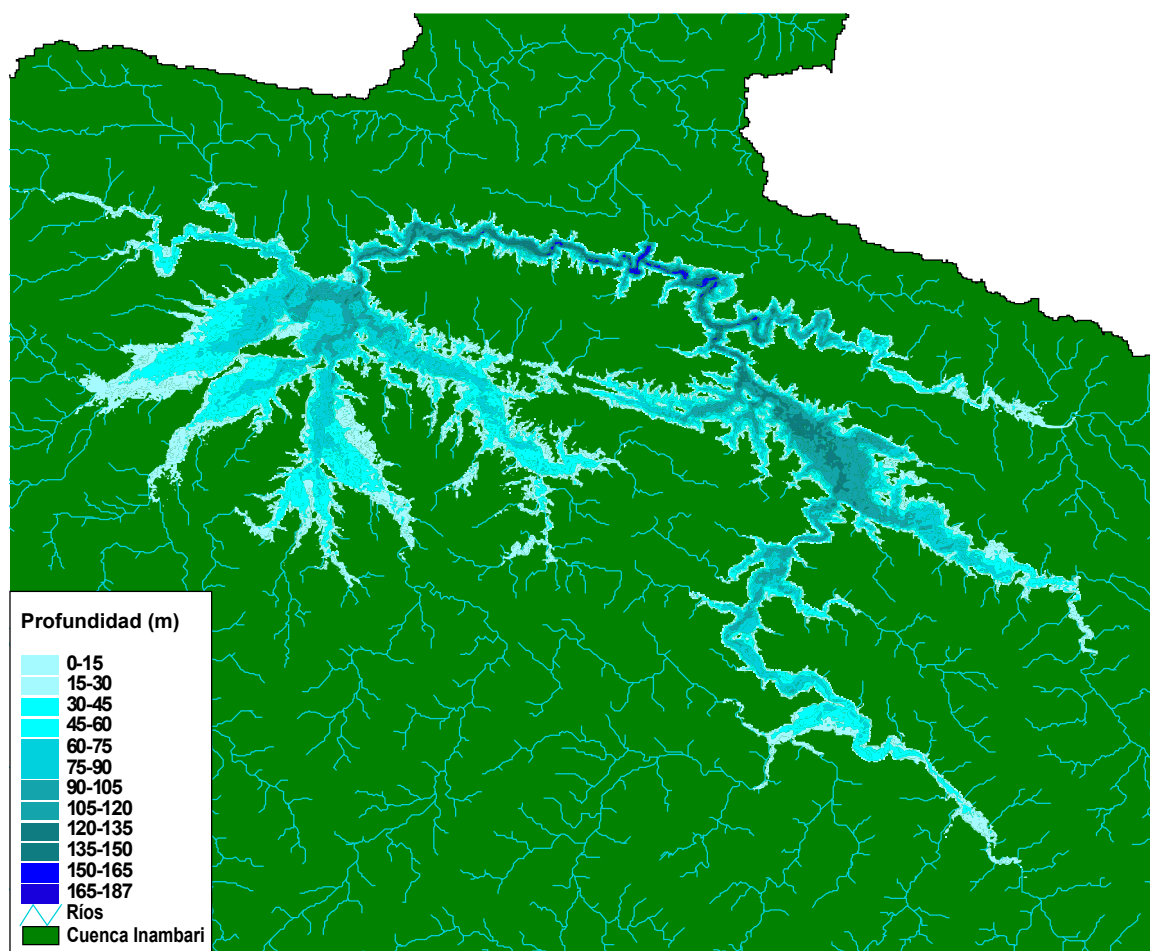


Figure 5. Información batimétrica del reservorio Inambari considerando 514 msnm como el nivel promedio para su operatividad.

No obstante, el acúmulo de sedimentos también puede causar otros impactos en el reservorio los cuales también deberán ser considerados. Por ejemplo, la distribución espacial de estos sedimentos no será uniforme en todo el reservorio, particularmente en la zona de descarga de los tributarios se espera el desarrollo de áreas de deposición que podrían forzar el desplazamiento de las poblaciones humanas ubicadas en estas áreas. La minería de oro aluvial que ocurre aguas arriba del sitio de la represa actualmente está limitada a ambientes inundables y no ocurre en el canal principal debido a la alta velocidad que presenta el río en estas secciones. Los grandes depósitos de sedimentos aluviales que se formarán en la desembocadura de los tributarios dentro del reservorio van a representar un ambiente ideal para la explotación minera y es probable que propicien una rápida expansión de estas actividades en la región. Por otro lado, los humedales asociados a estas formaciones sedimentarias también representan una fuente de gases de efecto invernadero e incrementan las zonas para la metilación del mercurio. La expansión de las actividades mineras en la zona de tierra firme y de las llanuras de inundación que existen aguas arriba del reservorio también podría aportar significativamente al flujo total de sedimentos al embalse (Figura 2), lo cual agrava los problemas de sedimentación y potencialmente reduciría la vida útil del embalse.

EFFECTOS AGUAS ABAJO

El reservorio va a retener la mayor parte de los sedimentos que son transportados desde los tributarios tanto en suspensión como sobre el lecho del río, reduciéndose prácticamente a cero el aporte de sedimentos al

sistema fluvial aguas abajo. El agua, por otro lado, continuará fluyendo fuera del reservorio con una reducción significativa en la carga de sedimentos lo cual le da un poder erosivo mucho mayor, produciendo efectos directos e importante pérdida de hábitats de sedimentación en el cauce del río Inambari aguas abajo del reservorio. La naturaleza y significancia de estos impactos dependerá directamente de la disminución de la carga de sedimentos y también de la variabilidad en la liberación de agua procedente de la represa. La reducción en la descarga de sedimentos en suspensión puede estimarse a partir de las curvas de descarga y sedimentos en suspensión que fueron desarrollados para el río Inambari en el puente Inambari, cerca del sitio de la presa propuesta (Figura 6a; 6b, respectivamente). A partir de estas relaciones y comparando con los valores diarios del nivel río para el período 1 de enero de 2009 a 31 diciembre 2011, se espera una reducción en el flujo de sedimentos totales en suspensión aguas abajo de 21'547,976 toneladas por año. Si asumimos que el transporte de sedimento sobre el lecho del río representa el 10% de esta carga total, el represamiento podría entonces reducir el aporte de sedimento de fondo aguas abajo de la represa en 2'394,219 toneladas por año.

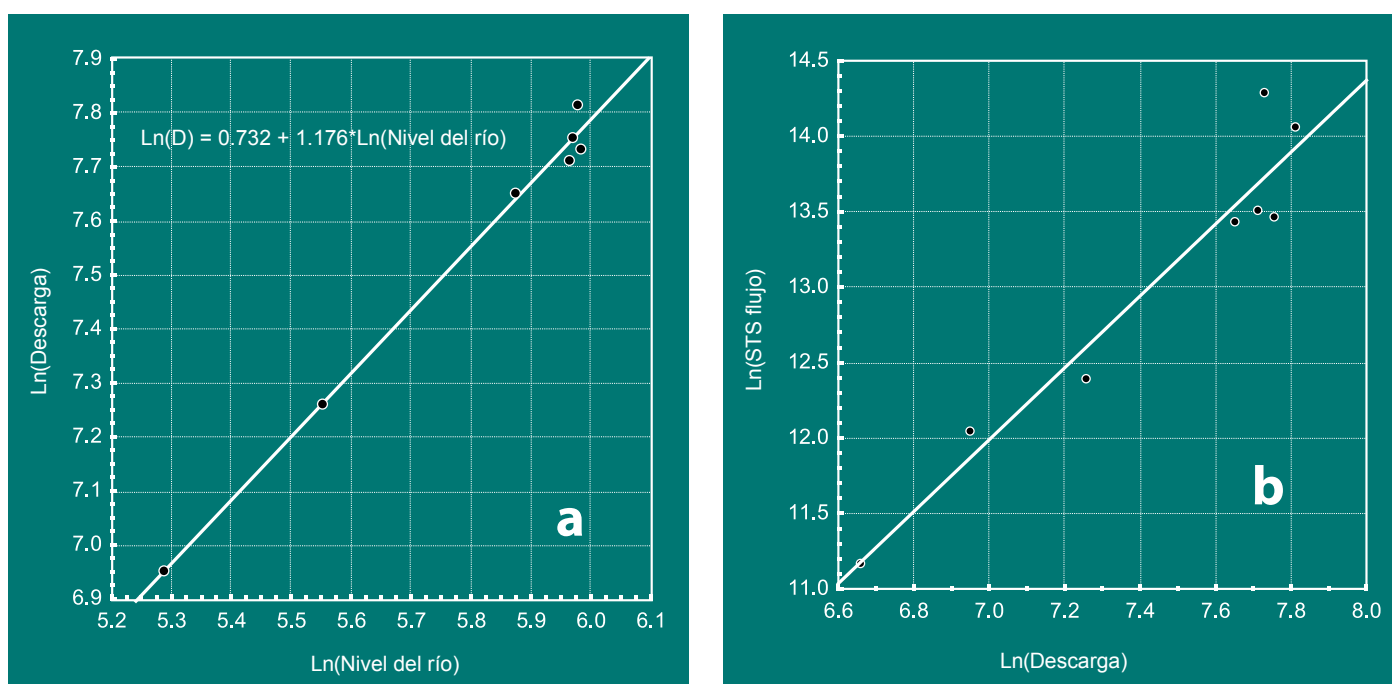


Figura 6. Variación del logaritmo natural de a) descarga (m^3/s) y b) STSflujo (g/s) en función del logaritmo natural del nivel del río (m) and la descarga, respectivamente, para el río Inambari en el puente Inambari.

Es muy probable que la reducción del aporte de sedimentos en suspensión aguas abajo de la represa tenga un impacto limitado en el sistema fluvial ya que las actividades mineras que ocurren en esas zonas continuarán adicionando sedimentos finos en suspensión (Figura 4; Figura 6; Figura 7). Por el contrario, la reducción de la descarga de sedimentos de fondo es probable que tenga un mayor impacto aguas abajo ya que el río Inambari es la principal fuente de estos materiales que son de vital importancia para el mantenimiento de la estructura geomorfológica y hábitats del canal aguas abajo. El patrón de descarga estacional en el sitio de la represa es actualmente muy variable aunque con una tendencia estacional monótona acompañada con picos de inundación frecuentes asociados a tormentas localizadas (Fig. 7). Este patrón variable de descarga produce dos importantes características del canal del río Inambari en esta sección: la deposición de una amplia gama de tamaños de partículas transportadas por el fondo del canal y la formación de canales trenzados en el Bajo Inambari. Una vez que el río es represado y el aporte de sedimentos de fondo es anulado, la deposición de

los materiales de fondo que ocurran aguas abajo van a depender del régimen hidrológico. En la mayoría de ríos que han sido represados, la magnitud y frecuencia de las inundaciones disminuyen significativamente aguas abajo de la represa debido al efecto amortiguador que ejerce el reservorio en los patrones de escurrimiento regional (Batalla et al. 2004). Bajo estas condiciones de flujo moderado, el agua remueve selectivamente las partículas más pequeñas (arena y grava) y deja las piedras y el canto rodado (“cascajo”), generando un lecho de río pedregoso o duro. El efecto final es por lo general una profundización y ensanchamiento del canal del río en zonas ubicadas inmediatamente debajo de la represa, acompañado por un incremento promedio del tamaño de las partículas del fondo del río (Williams y Wolman 1984; Kondolf y Matthews 1993; Kondolf 1997; Ibáñez et al 1996). Estos cambios van a tener un impacto negativo en la distribución selectiva de la vegetación ribereña y de la fauna bentónica que están adaptadas a la presencia de sustratos de arena y grava. La entrada de grandes volúmenes de sedimentos finos en suspensión procedentes de zonas mineras de oro más aguas abajo podría tener el efecto contrario. Bajo las condiciones de un caudal reducido, es probable que este material se acumule en el canal y producir un aumento en la sedimentación y reducción del fondo del canal.

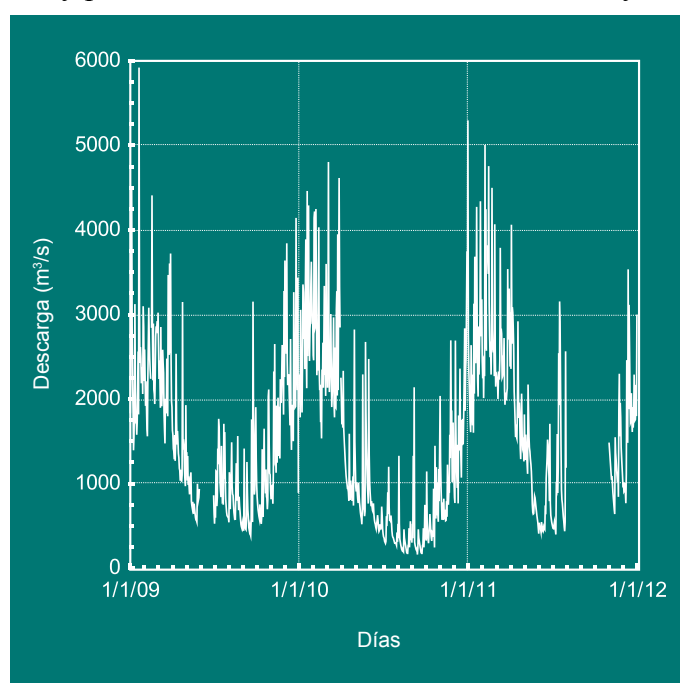


Figure 7. Variación de la descarga del río Inambari en el puente Inambari

La reducción en la magnitud y frecuencia de las inundaciones después de formado el reservorio también podría tener un impacto significativo en la estructura y dinámica de la llanura de inundación aguas abajo. Aunque esta zona inundable experimenta escasas inundaciones al año, luego de formado el reservorio probablemente estará completamente aislada del canal principal del río. La vegetación inundable que actualmente depende del pulso de inundación para mantener sus patrones estacionales de reproducción y crecimiento probablemente va a desaparecer, y serán potencialmente sustituidos por bosques de tierra firme más maduros. Debido a la presencia de suelos ricos en nutrientes, estas zonas también pueden ser transformadas en tierras agrícolas, aunque la fertilidad del suelo, mantenida por las inundaciones anuales, probablemente también disminuirá con el tiempo después de formado el reservorio.

LITERATURA CITADA

- Asociación ICLA. 1982. Proyecto ICLA: Hidrología y sedimentología, Informe final. Sucre. 149 p
- Batalla R.J., Gómez, C.M. Kondolf, G.M. 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain) *Journal of Hydrology* 290 (2004) 117–136
- Carling, P.A. and Reader, N.A. 1982. Structure, composition and bulk properties of upland stream gravels. *Earth Surf. Processes Landforms* 7: 349-365.
- Devol, A. H., Zaret, T. M., and B. R. Forsberg. 1984a. Sedimentary organic matter diagenesis and its relation to the carbon budget of Amazon floodplain lakes. *Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verh.* 22: 1299-1304.
- ENDE, Empresa Nacional de Eletricidad S.A. 1980. Proyecto Hidroeléctrico Sakhahuaya. Hidrología y sedimentología. Publ. Ende, Cochabamba, 121 p.
- Guyot, J.L. 1993. Hidrogeoquímica des Fleuves de l'Amazonie Bolivienne. l'ORSTOM. Collection Études et Thèses, Paris, 261 p.
- Ibanez, C., Prat, N., Canicio, A., 1996. Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the Lower Ebro River and its estuary. *Regulat. Rivers: Res. Mgmt* 12, 51–62.
- Kondolf, G.M., 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environ. Mgmt* 21 (4), 533–551.
- Kondolf, G.M., Matthews, W.V.G., 1993. Management of Coarse Sediment in Regulated Rivers of California, Report No. 80, University of California Water Resources Center, Riverside.
- Meade, R.H. 1985. Suspended sediment in the Amazon River and its tributaries in Brazil during 1982-1984. U.S. Geological Survey Open File Report 85-492. Denver. 39 p.
- Martin, J. 1977. Plan de desarrollo urbano de la ciudad de La Paz. Informe geológico No 9: Concisiones hidrológicas de la cuenca de La Paz. 71 p.
- Palenque Espada, G. 1981. Analisis de las ecuaciones para el transporte de la carga de fondo. Tesis UMSA, La Paz.
- Veja, J.S., Malky, A. and Reid, J. 2012. Costos y beneficios del proyecto hidroeléctrico del río Inambari. Documento de Discussion No 2. Conservación Estratégica. 67p

Vollmers, H.J. & Palenque Espada, G. 1983. Sediment measurements in the Pilcomayo River in Bolivia, p 1050-1070. In River Sedimentation. Nanjing, October 1983.

Williams, G.P., Wolman, M.G., 1984. Downstream effects of dams in alluvial rivers. US Geological Survey, Professional Paper, 1286.

Se sugiere citar:

Forsberg, B. 2013. La Represa Inambari – Transporte de Sedimentos. Documento de Trabajo #14 . Wildlife Conservation Society, Lima, Perú.