

**ANALISIS DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO
AMBIENTAL DEL
COMPLEJO HIDROELÉCTRICO DEL RIO
MADERA**



HIDROLOGÍA Y SEDIMENTOS

JORGE MOLINA CARPIO

LA PAZ – BOLIVIA

Abril de 2006

Contenido

| | |
|--|-----------|
| PRESENTACIÓN | 1 |
| LA REGIÓN Y EL PROYECTO | 2 |
| 1.1 EL RÍO MADERA..... | 2 |
| 1.2 EL PROYECTO..... | 5 |
| NIVELES DE AGUA | 10 |
| 2.1 NIVELES ACTUALES E INDUCIDOS POR LOS EMBALSES | 10 |
| 2.2 VELOCIDADES DE FLUJO..... | 18 |
| 2.3 CONCLUSIONES..... | 21 |
| SEDIMENTACIÓN | 23 |
| 3.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RIO MADERA | 24 |
| 3.2 VIDA ÚTIL DE LOS EMBALSES..... | 27 |
| 3.3 SEDIMENTACIÓN EN EL TRAMO GUAYARAMERIN-PORTO VELHO | 31 |
| 3.4 CONCLUSIONES..... | 41 |
| AGRADECIMIENTOS | 44 |
| REFERENCIAS | 45 |

PRESENTACIÓN

El Complejo Hidroeléctrico del río Madera constituirá, si se hace realidad, en el proyecto hidroenergético más grande de la Amazonía. Embalsará además el segundo río más caudaloso de la cuenca, inferior solamente al mismo río Amazonas. Por sus características y origen andino, el río Madera se diferencia mucho del resto de los grandes afluentes del Amazonas. Transporta la mitad de los sedimentos de la cuenca y drena una de las regiones de mayor diversidad física y biológica del mundo, que es compartida entre tres países: Bolivia, Brasil y Perú.

Los estudios de impacto ambiental de las dos presas del Complejo situadas río abajo, en territorio brasileño, identificaron impactos de muy alta magnitud que pueden agruparse en los siguientes temas:

- Peces: interferencia sobre peces migratorios, sus huevos y alevinos, alteración de la composición de la fauna ictica debido a cambios en la dinámica del agua, pérdida de diversidad y áreas de desove.
- Fauna: Pérdida de ambientes para la avifauna, pérdida o fuga de varios tipos de fauna en formaciones vegetales, eliminación de las barreras naturales para las especies de buefos (delfines de río) existentes, al menos una de ellas endémica del Alto Madera.
- Población: Alteración en la organización social y política de la población, alteración y pérdida de recursos pesqueros, alteraciones de la calidad de vida de la población, afectación de las comunidades y poblaciones ribereñas.
- Flora: Supresión de áreas de diferentes formaciones vegetales específicas de la región, como la de campinarana y de áreas de vegetación ombrófila abierta de tierras bajas y aluvial.
- Sedimentos: Retención de sólidos de fondo y en suspensión
- Enfermedades tropicales: Aumento en la incidencia de malaria.

El presente trabajo es un análisis de los estudios de inventario, factibilidad e impacto ambiental del proyecto hidroenergético. Está enfocado en los temas de dinámica del agua (flujo) y sedimentos, que corresponden a la especialidad del autor. A diferencia de los estudios de factibilidad, el análisis no se limitó a territorio brasileño, ya que el flujo del agua y la mayor parte de los impactos arriba mencionados no obedecen a fronteras internacionales y pueden afectar también a territorio y población boliviana.

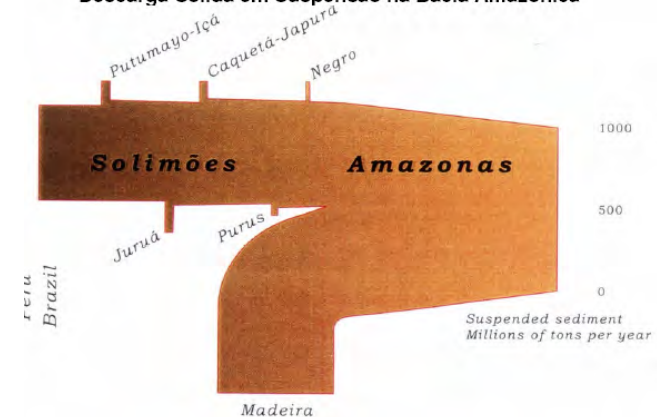
Capítulo 1

LA REGIÓN Y EL PROYECTO

1.1 EL RÍO MADERA

El río Madera es el principal afluente del río Amazonas tanto por caudal como por longitud. En su confluencia con el Amazonas, el río Madera es uno de los cinco ríos más caudalosos del mundo, drenando un área de 1,420,000 km². Es además la fuente principal de sedimentos en suspensión y sólidos disueltos de la cuenca amazónica (figura 1.1). El río Madera drena casi toda la cuenca amazónica boliviana, que ocupa una superficie de 724,000 km² (66% del territorio del país).

**Figura 1.1: Caudal sólido en la Cuenca Amazónica
Descarga Sólida em Suspensão na Bacia Amazônica**



Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

El río Madera es el único afluente de la margen derecha del Amazonas que nace en la cordillera de Los Andes. Se forma por la unión de los ríos Beni y Mamoré en las proximidades de la población de Villa Bella. Se acostumbra denominar Alto Madera al curso (y cuenca) del río aguas arriba de esa población y Bajo Madera al curso aguas abajo de Porto Velho. Entre los dos se encuentra el tramo de cachuelas (cascadas de baja altura) y rápidos donde se proyecta construir las represas (ver figura 1.2).

Los principales formadores del Alto Madera son los ríos Beni, Madre de Dios y Mamoré, que nacen en la falda oriental de la cordillera de Los Andes a altitudes superiores a los 4000 msnm. Otro afluente importante del Alto Madera es el río Iténez, cuyas nacientes están en el Planalto Central brasileño, a menos de 500 msnm. La parte andina de la cuenca del Alto Madera presenta una gran diversidad climática y biológica. Con un rango de precipitación de

350 a 7000 mm/año y una gran variación de temperatura asociada a la altitud, esta región posee algunos de los récords mundiales de biodiversidad y forma parte a su vez de la macrorregión (hotspot) de los Andes Orientales, la más diversa del mundo.



Figura 1.2: El río Madera y la zona del proyecto

El Bajo Madera se extiende desde la cachuela de Santo Antônio hasta la confluencia con el río Amazonas. La longitud de este tramo es de 1100 km con un desnivel total aproximado de 19 m, siendo navegable todo el año. La cuenca del Bajo Madera tiene una superficie aproximada de 460,000 km² y recibe una precipitación media de alrededor de 2300 mm/año. La precipitación y la temperatura presentan poca variación espacial en el Bajo Madera, lo que se explica por su baja altitud y relieve.

El tramo de cachuelas se inicia inmediatamente aguas abajo de las ciudades gemelas de Guayaramerín y Guajará Mirim, sobre el río Mamoré, y termina en la Cachuela de Santo Antonio, 6 km aguas arriba de Porto Velho. Este tramo presenta 18 cachuelas y rápidos que se extienden a lo largo de una longitud de 360 km. El desnivel estimado para este tramo por el estudio de inventario (PCE, Furnas, Odebrecht, 2002) es de 60 m. La figura 1.3 muestra las cachuelas identificadas en el tramo Abuná-Guayaramerín. El subtramo Abuná-Cachuela de Santo Antonio, donde se proyecta construir las dos represas, tiene 222 km de longitud. En este subtramo, el río Madera no recibe a ningún afluente importante. El área de aporte de este trecho representa menos de 3% de la superficie de la cuenca hasta Porto Velho. La

precipitación media anual en Guayaramerín es de 1960 mm, en Vila Abuná de 1595 mm y en Porto Velho de 2200 mm.

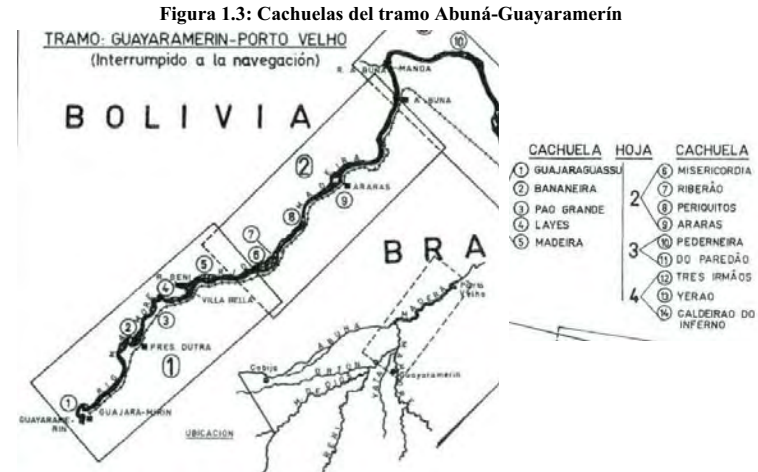


Figura 1.3: Cachuelas del tramo Abuná-Guayaramerín

Fuente: Angulo, G., Al Mar por las Hidrovías de la Integración Sudamericana

La tabla 1.1 muestra los caudales medios mensuales del río Mamoré en Guajará Mirim y del río Madera en las estaciones hidrométricas de Abuná y Porto Velho. La superficie de la cuenca del Mamoré en Guayaramerín ha sido estimada en 589,000 km², de la cuenca del Madera en la estación de Abuná en 932,000 km² y en Porto Velho, en 988,000 km². El caudal máximo medio mensual se produce en marzo y el mínimo en septiembre (figura 1.4). Este comportamiento es resultado de la combinación de los regímenes hidrológicos de sus dos principales formadores: los ríos Mamoré y Beni, cuyos máximos se producen en abril y febrero, respectivamente. Mediante un análisis de regresión, los responsables del estudio estimaron que los caudales medios del periodo 1931-2001 en Jirau y Porto Velho son 17,687 m³/s y 17983 m³/s, respectivamente.

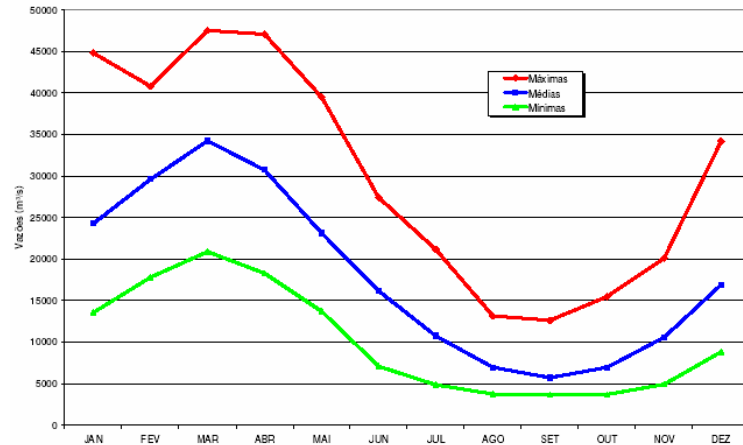
Tabla 1.1: Caudales medios mensuales de los ríos Mamoré y Madera

| Río/estac | Periodo | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año |
|--------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Mamoré en Guayar. | 1970-2001 | 9299 | 11939 | 14011 | 15270 | 14591 | 10634 | 6311 | 3133 | 2136 | 2285 | 3557 | 6213 | 8282 |
| Madera en Abuná | 1976-97 | 23932 | 29379 | 33058 | 31812 | 25930 | 18442 | 11461 | 6455 | 4789 | 6115 | 10002 | 15987 | 18113 |
| Madera en P. Velho | 1967-01 | 23968 | 30761 | 35659 | 34503 | 26387 | 18471 | 11792 | 7167 | 5696 | 6646 | 10381 | 16320 | 18979 |
| | 1931-01* | 24268 | 29582 | 34207 | 30706 | 23107 | 16155 | 10750 | 6938 | 5691 | 6944 | 10553 | 16896 | 17983 |

Fuente: PCE, Furnas, Odebrecht, 2002

*Observado y estimado

Figura 1.4: Caudales medios mensuales en Porto Velho, 1931-97
Vazões Médias Mensais no Rio Madeira em Porto Velho



1.2 EL PROYECTO

En 1971 el Ministerio de Minas y Energía de Brasil identificó las cachuelas de Jirau, Santo Antônio y Teotônio como posibles sitios para la construcción de centrales hidroeléctricas. La ELETRONORTE realizó en 1983 estudios de inventario de la cuenca del Madera, profundizando los estudios en algunos afluentes del Bajo Madera. Estos estudios dieron origen posteriormente a estudios de factibilidad de algunas centrales de tamaño medio, como las del río Jiparana, un afluente de la margen derecha. Paralelamente, la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) de Bolivia identificó y realizó el estudio de diseño final de la central hidroeléctrica de Cachuela Esperanza (20 MW) en el río Beni, con el propósito de abastecer de energía a las ciudades de Riberalta y Guayaramerín.

Las crecientes necesidades de energía del Brasil (se estima un crecimiento de la demanda de 83,000 MW el 2002 a 124,000 MW el 2012), plantean la necesidad de nuevos proyectos. Así durante los años 2001 y 2002, se realizaron los Estudios de Inventario Hidroeléctrico del río Madera, en forma conjunta por las empresas Furnas Centrais Elétricas SA y CNO-Constructora Noberto Odebrecht SA, que tienen la licencia de la Agencia Nacional de Electricidad del Brasil (ANEEL). Las actividades de ingeniería consultora fueron desarrolladas por PCE-Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda y Furnas Centrais Elétricas SA. Las mismas empresas concluyeron el estudio de factibilidad en 2004 y junto con Leme Engenharia los estudios de impacto ambiental en 2005.

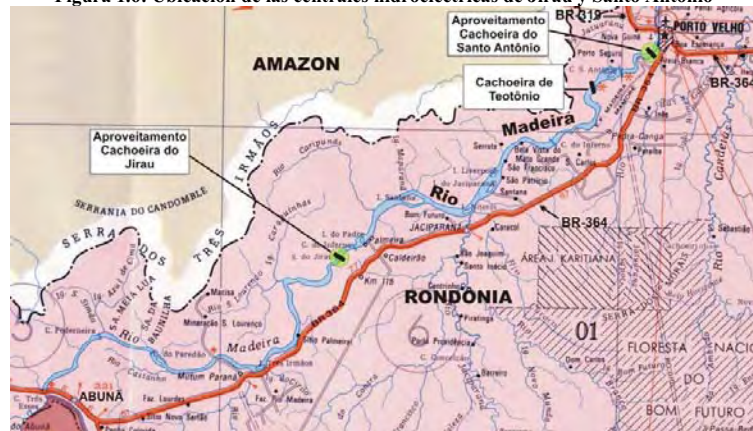
Los estudios proponen la construcción de las centrales hidroeléctricas de Jirau y Santo Antonio en el tramo brasileño Abuná-Porto Velho, que fueron seleccionadas como la combinación más conveniente desde el punto de vista técnico-económico. La figura 1.6 muestra la ubicación de esas dos centrales. Se ha propuesto y se está estudiando una tercera central, que aprovecharía el desnivel de algo más de 20 m que existe en el tramo binacional Abuná-Guayaramerín y posiblemente, una cuarta en Cachuela Esperanza sobre el río Beni, situada íntegramente en territorio boliviano (ver figura 1.5).

Figura 1.5: Ubicación de las centrales hidroeléctricas del río Madera



Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

Figura 1.6: Ubicación de las centrales hidroeléctricas de Jirau y Santo Antonio



Fuente: Inventario hidroeléctrico del río Madera, 2002

La tabla 1.2 resume las principales características técnicas y de costos de las centrales Jirau y Santo Antonio. En el caso de la central de Jirau, la necesidad de evitar la inundación de territorio boliviano obligó a considerar un nivel variable durante el año, lo que marca una diferencia importante con los estudios de inventario. El tiempo estimado de implantación de las centrales es de 150 meses.

Tabla 1.2: Características generales de las centrales de Jirau y Santo Antonio

| | SANTO ANTONIO | JIRAU |
|---|---------------|-----------|
| Potencia instalada (MW) | 3150 | 3,300 |
| Energía media, p. histórico (MW med) - cota constante | 2212 | 2,212 |
| Cota 90 variable | | 1,973 |
| Caída bruta media (m) | 16.8 | 17.10 |
| Caída líquida de referencia (m) | 13.9 | 15.2 |
| Nivel de agua normal en el embalse (msnm) | 70.0 | 90.0 |
| Nivel de agua normal aguas abajo (msnm) | 55.29 | 74.23 |
| Superficie normal del embalse (km2) | 271 | 258 |
| Vida útil del embalse (años) | >100 | 50 |
| Caudal de diseño del vertedero, T=10000 años (m3/s) | 84000 | 82600 |
| Altura máxima de la presa (m) | 60.0 | 35.5 |
| Número y tipo de turbina | 44, Bulbo | 44, Bulbo |

7

| | | |
|---|-------|-------|
| Potencia unitaria de cada turbina (MW) | 73 | 75 |
| Factor de capacidad de las plantas - cota constante | 0.68 | 0.66 |
| Cota variable | | 0.58 |
| Costo de la central, sin esclusas ni línea de transmisión (millones US) | 3171 | 3360 |
| Costo de la energía generada (US/MWh), cota constante | 23.02 | 22.76 |
| Cota 90 variable | | 25.50 |
| Costo de las esclusas de navegación (millones US) | 201 | 173 |
| Costo de la línea de transmisión, 500kV, 1320km (millones US) | 1600 | |
| Población directamente afectada | 2046 | 953 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

Los costos de la energía generada no incluyen los costos de transmisión. La vida útil de los embalses fue estimada bajo el supuesto de que los embalses tienen una capacidad de retención de sedimentos muy baja: 20% al inicio del proyecto en el caso de Jirau, que se va reduciendo a 1% al cabo de 15 años, para ser virtualmente 0% a partir de los 30 años. Esta estimación se basa en la gran longitud y modesto volumen de los embalses en relación al caudal líquido del río Madera.

En abril de 2004, la empresa Constructora Noberto Odebrecht solicitó a la Superintendencia de Electricidad de Bolivia dos licencias provisionales para realizar estudios de factibilidad para la implementación de centrales hidroeléctricas en los ríos Mamoré/Maderá, tramo Guayaramerín-Abuná y en el río Beni. La solicitud fue rechazada por la Superintendencia en base a las observaciones realizadas por varias instituciones, con la recomendación de que se tramite en el marco de un acuerdo binacional. Paralelamente, el consorcio Furnas-Odebrecht solicitó a la ANEEL autorización para realizar estudios de factibilidad de la central hidroeléctrica de Guajara-Mirim (revista Brasil Energia, enero 2005), ubicada en el tramo fronterizo del río Madera entre Abuná y Guayaramerín (ver figura 1.5). Según el director de contratos de Odebrecht, Jose Bonifacio Pinto Junior, la potencia instalada de esta hidroeléctrica deberá estar alrededor de 3000 MW y la inversión sería compartida entre Brasil y Bolivia.

Hay razones para suponer que la construcción de la presa binacional en el tramo Guayaramerín-Abuná hará innecesaria la construcción de una presa en Cachueta Esperanza. Los datos que maneja el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) muestran que el nivel del cero de la regla limnimétrica de Guayaramerín es de 112.51 msnm, más de 11 m por encima de la regla de Cachueta Esperanza. El nivel normal del agua en el futuro embalse debería alcanzar el de Guayaramerín para eliminar el obstáculo a la navegación que representa la cachuela próxima a esta población (ver figura 1.3). Si ese es el caso y solo se construye una presa en ese tramo, Cachueta Esperanza sería sumergida por el nuevo embalse. Considerando que el nivel normal del embalse de Jirau será de 90.0, lo más probable es que entre Guayaramerín y Abuná se proyecte una presa única. El nuevo embalse inundaría territorio boliviano a lo largo de los ríos Madera, Mamoré y Beni.

8

La navegación es otro componente importante del proyecto. Mediante la construcción de esclusas a un costo razonable (ver tabla 1.2), se posibilitaría la navegación de más de 4000 km de vías fluviales aguas arriba de las presas, integrando grandes regiones de Brasil, Bolivia y Perú. La apertura a la navegación de los ríos Madera e Iténez es la única manera de hacer realidad el eje Norte-Sur (Orinoco-Amazonas-Plata) de la IIRSA.

En el Brasil, los beneficios de la nueva vía navegable alcanzan directamente a los estados de Rondônia y Mato Grosso, al norte de Cuiabá hasta la carretera BR-163 a la altura de Lucas de Rio Verde, cubriendo una región de cerca de 350,000 km², con potencial de producir 28 millones de toneladas/año de granos en 7 millones de hectáreas (PCE, Furnas, Odebrecht, 2002). Esta región produce actualmente cerca de 3 millones de toneladas/año. Considerando los insumos necesarios de fertilizantes y combustibles a ser transportados por esta hidrovía, se estima que la carga total potencial a ser transportada por la hidrovía Madera-Iténez será de 35 millones de toneladas/año. Se propone además ampliar las facilidades del puerto de Itacoatiara, en la confluencia de los ríos Madera y Amazonas, para facilitar el transporte de carga de Brasil, Perú, Bolivia, Colombia y Ecuador. La nueva instalación se denominaría Puerto Bolívar.

En Bolivia, los proyectistas brasileños estiman un potencial de producción de 24 millones de toneladas/año de granos (principalmente soya) en el área de influencia directa de la futura Hidrovía: los departamentos de Pando, Beni y parte de Santa Cruz, donde afirman que existen 8 millones de hectáreas de tierras aptas para agricultura intensiva. Estiman también un gran potencial de carga minera proveniente de la región subandina de la cuenca del Madera. Estas afirmaciones no parecen corresponder a la realidad. Según la zonificación agroecológica y económica de Pando (Zonisig, 1997) y Beni, virtualmente no existen en esos departamentos suelos aptos para la producción intensiva de granos. La producción actual de castaña en la región de influencia directa de la futura Hidrovía no utiliza las facilidades de navegación del Madera a partir de Porto Velho, aunque potencialmente podría hacerlo. Esa producción sale por carretera hacia los puertos del Pacífico. En cuanto a Santa Cruz, la soya (producción actual superior al millón de toneladas/año) y sus derivados se exportan por los puertos del Pacífico y la Hidrovía Paraguay-Paraná, conectada mediante ferrocarril y mucho más cercana a las zonas de producción que el Madera. Para usar el Madera tendría que habilitarse el río Mamoré para barcas de 4 m de calado y además utilizar un tramo significativo de carretera hasta Puerto Villaroel. En el Perú, los proyectistas estiman un potencial de productos maderables y mineros de 1 millón de toneladas/año.

El análisis del componente de navegación ha estado centrado en el transporte aguas abajo en dirección al Amazonas y al Atlántico. Según la concepción de la iniciativa de Integración de la Infraestructura Regional de Sudamérica (IIRSA), la dirección podría ser la opuesta: el transporte multimodal de carga brasileña hacia los puertos del Pacífico. Por ejemplo, la nueva vía fluvial se conectaría en Puerto Maldonado (Perú), sobre el río Madre de Dios, a la carretera que forma parte del eje Perú-Brasil y en Puerto Villaroel (Bolivia), sobre el río Mamoré, al eje interoceánico. Debe destacarse que para hacer realidad la navegación del Madera debe construirse una presa en el tramo Abuná-Guayamerín, además de las presas de Jirau y Santo Antonio, es decir un mínimo de tres presas.

Capítulo 2

NIVELES DE AGUA

Inevitablemente una presa elevará los niveles naturales del agua en el río que embalsa. Esa elevación de niveles está asociada a varios impactos ambientales y sociales de gran magnitud, pero también a otros aspectos importantes como la operación del embalse, los costos de la energía generada y en último término, con la viabilidad económica del proyecto.

Este tema es de especial relevancia en represas a ser construidas en la cuenca amazónica, donde predominan condiciones de llanura, con ríos de baja pendiente y poco desnivel topográfico, que obligan a inundar grandes áreas para producir la caída necesaria para generar energía en condiciones económicas. Por esa razón, algunas de las presas para generación de energía eléctrica construidas en la Amazonía brasileña figuran entre los proyectos de más alto impacto ambiental en el mundo. Por ejemplo la presa de Balbina cerca de Manaus es citada como uno de los cinco proyectos hidroeléctricos más negativos ambientalmente en relación a su potencia instalada. Un poco más atrás en la lista negativa de proyectos figuran la presa de Samuel en un afluente del río Madera y la presa de Tucuruí en el río Tocantins.

Esas experiencias fueron tomadas en cuenta por los impulsores y responsables de los estudios de factibilidad/viabilidad del “Complejo Hidroeléctrico do Rio Madeira - Aproveitamentos Hidroeléctricos de Jirau y Santo Antonio”. Había una razón adicional para actuar así: la ubicación del embalse/reservorio de Jirau en la zona fronteriza con Bolivia, con la consiguiente posibilidad de inundar territorio de otro país. Evitar esto fue convertido incluso en una condicionante de los estudios.

El objeto principal del presente trabajo es usar los datos contenidos en los estudios de factibilidad y de impacto ambiental para analizar si se cumplirían esa y otras condicionantes del proyecto, identificar vacíos de información y prever las consecuencias y magnitud de algunos impactos relevantes.

2.1 NIVELES ACTUALES E INDUCIDOS POR LOS EMBALSES

La construcción de una presa provoca la elevación de los niveles de agua con respecto a los niveles naturales. Esa sobre-elevación no se limita al área próxima a la presa. Además los esquemas y figuras que acompañan a muchos proyectos (ver figuras 2.1 y 2.2) inducen a creer que el nivel de agua en el embalse se mantiene horizontal, lo que no es real. Además de crear el embalse e inundar temporal o permanentemente áreas próximas al río, la elevación de niveles tiene múltiples efectos e impactos sobre el medio físico y biológico.

Justamente por eso, dos de los tres Criterios Básicos adoptados por los impulsores del proyecto (Furnas et al, 2004) están asociados a los niveles del agua:

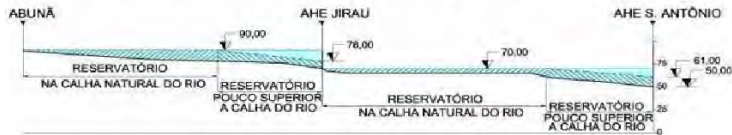
- “Inicialmente buscando un mínimo de interferencia de los proyectos con áreas de preservación, se optó por limitar los niveles de agua máximos de los embalses a niveles poco superiores a los de las crecidas naturales. Esta opción creó la necesidad de desarrollar

soluciones de ingeniería de construcción y de equipos que permitiesen la mayor generación de energía posible combinada con presas de baja altura”.

- “Ante la posibilidad de que no se construyan los proyectos binacionales, se optó por la no inundación de territorio boliviano”.

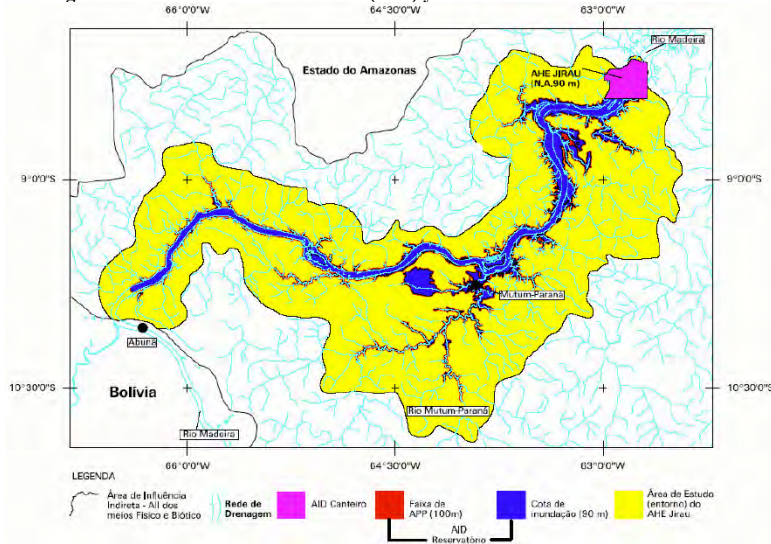
Figura 2.1: Perfil esquemático de los proyectos

ALTERNATIVA COM DUAS USINAS DE BAIXA QUEDA => ALTERNATIVA SELECIONADA



Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

Figura 2.2: Área de influencia directa (AID) y de inundación del embalse Jirau



Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

Uno de los resultados del primer criterio es la adopción de dos represas en vez de una en el tramo Abuná-Porto Velho, lo que al mismo tiempo disminuye la superficie a ser inundada. De hecho, la baja relación entre área inundada y potencia instalada (0.08 km²/MW para Jirau y

0.086 km²/MW para Santo Antonio) es presentada como una gran ventaja de los proyectos del Madera en relación a otras centrales hidroeléctricas construidas en la Amazonía, porque al disminuir el área inundada por los embalses disminuyen también los impactos ambientales. Otra ventaja desde el punto de vista ambiental, es el corto tiempo de residencia del agua en los embalses. Para Jirau varía de un mínimo de cerca de 18 horas en marzo a un máximo de 40 horas en septiembre.

El segundo criterio obligó a considerar un régimen de operación con niveles variables a lo largo del año para el embalse de Jirau (tabla 2.1). Según los autores del estudio de factibilidad (Furnas et al, 2004), “los datos disponibles en la época de los Estudios de Inventario permitieron definir un nivel de agua normal constante de 90.0 m, para mantener inalterado el régimen fluvial del río Madeira, aguas arriba de la localidad de Abuná (límite Brasil – Bolivia), y de sus afluentes bolivianos. Pero los levantamientos topográficos ejecutados en la etapa de factibilidad muestran que un nivel constante de 90 m influencia el régimen fluvial del río Madera aguas arriba de Abuná, manteniendo inundadas todo el año áreas antes alcanzadas solamente durante el periodo de crecidas”. Para evitar esto, se definió una curva guía (tabla 2.1) para operar el embalse Jirau con nivel de agua variable a lo largo del año.

Tabla 2.1: Curva Guía del embalse Jirau

| Variable | Unidad | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|
| Caudal | (Milm ³ /s) | 23.9 | 29.1 | 33.6 | 30.2 | 22.7 | 15.9 | 10.6 | 6.8 | 5.6 | 6.8 | 10.4 | 16.6 |
| Nivel agua | (m) | 90 | 90 | 90 | 90 | 89.5 | 87 | 85 | 83 | 82.5 | 83 | 85 | 87.5 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

En la tabla 2.1 se observa que el nivel 90.0 sólo se mantendrá en los meses de enero a abril, para luego ir bajando hasta un mínimo en septiembre, que es el mes en que se produce el caudal y nivel mínimo en condiciones naturales (tabla 1.1). Se observa también que para no afectar el tramo aguas arriba de Abuná es necesario bajar el nivel del embalse en 7.5 m (de 90 a 82.5 m) en septiembre. Una reducción tan importante se explica por los niveles naturales que se dan arriba de Abuná. La tabla 2.2 muestra los niveles que se producen naturalmente para un caudal bajo y otro medio, en el tramo Jirau-Abuná-Ararás. Se observa que para un caudal de 4250 m³/s, el nivel en la confluencia con el río Abuná está a solamente 82.88 m. Se observa también que la caída del nivel del agua en la cachuela de Ararás (color amarillo en la tabla 2.2), situada en el tramo binacional aguas arriba de Abuná, varía mucho según el caudal: para 4197 m³/s es de 1.59 m (84.5-82.91) y para 18605 m³/s es de solamente 0.37 m (91.11-90.74)

Este cambio en los niveles de operación del embalse Jirau tiene importantes consecuencias sobre la generación y costo de la energía. En concreto, operar con niveles variables reducirá en 12% la energía generada durante el periodo histórico (ver tabla 1.2) y bajará de 0.68 a 0.60 el factor de planta, con relación al aprovechamiento a nivel constante de 90.0 m. Como consecuencia, aumentará el costo unitario de la energía generada, de 22.76 (nivel constante) a 25.50 US\$/MWh (nivel variable). Esta alta sensibilidad del precio de la energía respecto a los niveles del agua se debe en parte a la modesta caída hidráulica disponible en cada embalse.

Los responsables del estudio de factibilidad mantuvieron la alternativa denominada por ellos de “aprovechamiento óptimo a nivel constante de 90.0 m”, pensando en la posibilidad de

llegar a un acuerdo binacional con Bolivia, que permitiese inundar el tramo del río Madera aguas arriba de Abuná.

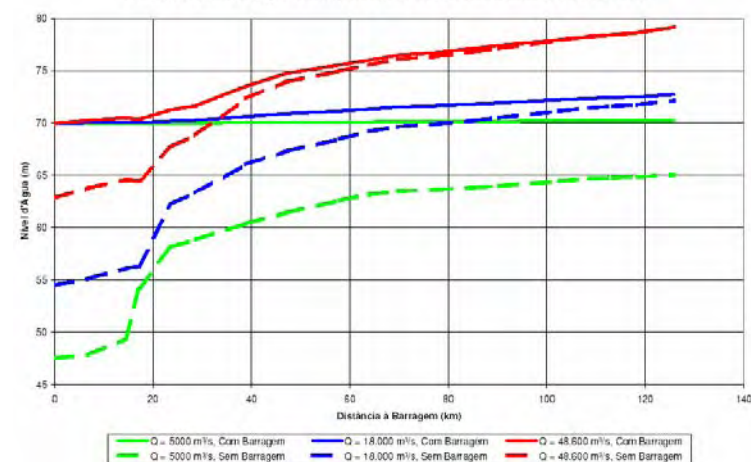
Tabla 2.2: Niveles de agua medidos en el tramo Jiraú-Abuná-Ararás

| Fecha | Caudal (m ³ /s) | Estación | Nivel del agua (m) |
|---------------------------|----------------------------|--|--------------------|
| 16/10/2002 | 4.197 | Sección S-124 (río Abuná) | 82.88 |
| | | Cachoeira das Araras Montante | 84.50 |
| | | Cachoeira das Araras Jusante | 82.91 |
| | | Abuná (CPRM) | 81.80 |
| | | Sección S-121 | 81.79 |
| | | Sección S-119 – Regla L4 | 81.70 |
| | | Sección S-117 | 81.41 |
| | | Sección S-115 – Regla L7 | 81.56 |
| | | Sección S-112 – Regla L6 | 78.28 |
| | | Sección S-109 – Regla L5 | 75.55 |
| Sección S-105 – Palmeiral | 74.27 | | |
| 22/05/2002 | 18.605 | Sección S-124 (río Abuná) | 89.77 |
| | | Cachoeira das Araras Montante | 91.11 |
| | | Cachoeira das Araras Jusante | 90.74 |
| | | Abuná (CPRM) | 89.40 |
| | | Sección S-121 | 89.31 |
| | | Sección S-119A (Antigas Reglas das balsas) | 89.06 |
| | | Sección S-119 – Regla L4 | 89.05 |
| | | Sección S-117 | 88.82 |
| | | Sección S-115 – Regla L7 | 88.37 |
| | | Sección S-112 – Regla L6 | 86.31 |
| Sección S-109 – Regla L5 | 82.63 | | |

Fuente: Inventario hidreléctrico do rio Madeira (2002), tabla 2.5.6

Las figuras 2.3 y 2.4 muestran los perfiles hidráulicos (línea que une los niveles del agua) en los tramos de río afectados por las presas de Santo Antonio y Jirau, respectivamente. En cada caso se muestran perfiles para un caudal bajo, uno medio y uno alto, para las situaciones con y sin represa. Estos perfiles fueron simulados mediante el programa HEC-RAS, creado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (USACE). Se usaron secciones transversales obtenidas de levantamientos topobatómétricos y restitución aerofotogramétrica realizados por los consultores. La simulación se realizó sin considerar el problema de sedimentación, sea natural o inducida por los embalses.

Figura 2.3: Perfil de la línea de agua entre Santo Antonio y Jirau
Perfis de Linha d'Água Simulados entre AHE Santo Antônio e AHE Jirau



Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

En el caso de Santo Antonio, el nivel del agua se aproxima a una línea horizontal solamente en los 20 kilómetros más próximos a la represa. En este primer subtramo, los niveles con represa son mucho más altos que los niveles sin represa para todos los caudales. Se observa también el control hidráulico que ejerce en condiciones naturales la cachuela de Teontonio, representado en la figura 2.3 por la caída brusca del perfil un poco antes del kilómetro 20. Más arriba el perfil de la línea de agua adquiere una pendiente que es más fuerte a medida que el caudal se hace más grande. Por otro lado, para caudales grandes, los perfiles de agua con y sin represa tienden a unirse en el extremo más alejado del embalse, en la cachuela de Jirau.

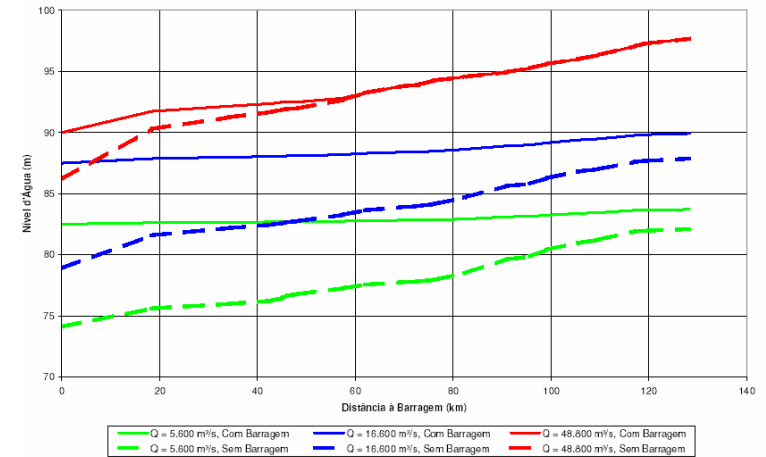
El comportamiento de los niveles del agua en el embalse de Jirau (tabla 2.3 y figura 2.4) es algo diferente al de Santo Antonio. En primer lugar, el nivel del agua junto a la represa (kilómetro 0) es variable según el caudal, lo que está de acuerdo a la tabla 2.1. En segundo lugar, los niveles del agua con represa son más altos que sin represa para todos los caudales, excepto los más grandes (48800 m³/s corresponde al caudal máximo histórico). Esto es particularmente cierto en la cola o extremo superior del embalse, donde empieza el tramo binacional. Como referencia, la boca del río Abuná se sitúa a 119 km de distancia de la represa Jirau. La figura 2.4 muestra que a esa distancia el nivel con represa es claramente más alto, tanto para caudales bajos (líneas verdes) como para caudales medios (líneas azules). Es decir que, aún con los niveles variables propuestos en la tabla 2.1, existirá inundación estacional en el tramo binacional arriba de la confluencia con el río Abuná.

Tabla 2.3: Perfiles de la línea de agua con el embalse Jirau, tramo Jirau – Abunã

| Sección | Caudal (m³/s) | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 5600 | 6800 | 10600 | 10400 | 15900 | 16600 | 22700 | 23900 | 29100 | 30200 | 33600 | 48800 | 60200 | 71400 | 82600 |
| | Nivel del agua en el embalse de Jirau | | | | | | | | | | | | | | |
| | 82.5 | 83 | 85 | 85 | 87 | 87.5 | 89.5 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 92 |
| 28 | 82.50 | 83.00 | 85.00 | 85.00 | 87.00 | 87.50 | 89.50 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 92.00 |
| 29 | 82.62 | 83.16 | 85.26 | 85.25 | 87.38 | 87.87 | 89.98 | 90.48 | 90.69 | 90.74 | 90.90 | 91.73 | 92.50 | 94.27 | 96.08 |
| 30 | 82.66 | 83.21 | 85.34 | 85.33 | 87.50 | 87.99 | 90.12 | 90.61 | 90.88 | 90.94 | 91.14 | 92.14 | 93.34 | 95.38 | 97.26 |
| 31 | 82.69 | 83.24 | 85.38 | 85.37 | 87.56 | 88.05 | 90.20 | 90.69 | 90.99 | 91.06 | 91.28 | 92.38 | 93.90 | 96.01 | 97.95 |
| 32 | 82.70 | 83.25 | 85.40 | 85.38 | 87.59 | 88.08 | 90.23 | 90.73 | 91.04 | 91.12 | 91.34 | 92.50 | 94.12 | 96.26 | 98.24 |
| 33 | 82.70 | 83.26 | 85.40 | 85.39 | 87.60 | 88.09 | 90.24 | 90.74 | 91.06 | 91.13 | 91.36 | 92.52 | 94.17 | 96.31 | 98.28 |
| 34 | 82.71 | 83.26 | 85.41 | 85.40 | 87.60 | 88.09 | 90.25 | 90.74 | 91.06 | 91.13 | 91.36 | 92.49 | 94.16 | 96.26 | 98.20 |
| 34.5 | 82.76 | 83.32 | 85.49 | 85.47 | 87.71 | 88.20 | 90.37 | 90.87 | 91.23 | 91.31 | 91.56 | 92.81 | 94.96 | 97.14 | 99.16 |
| 35 | 82.80 | 83.37 | 85.56 | 85.54 | 87.81 | 88.30 | 90.50 | 90.99 | 91.40 | 91.49 | 91.78 | 93.24 | 95.58 | 97.78 | 99.80 |
| 36 | 82.83 | 83.41 | 85.61 | 85.59 | 87.90 | 88.39 | 90.62 | 91.12 | 91.57 | 91.68 | 92.00 | 93.78 | 96.23 | 98.52 | 100.63 |
| 37 | 82.84 | 83.42 | 85.63 | 85.61 | 87.93 | 88.42 | 90.65 | 91.14 | 91.61 | 91.71 | 92.03 | 93.91 | 96.35 | 98.65 | 100.74 |
| 38 | 82.86 | 83.45 | 85.67 | 85.64 | 87.99 | 88.48 | 90.74 | 91.24 | 91.75 | 91.86 | 92.21 | 94.27 | 96.88 | 99.22 | 101.37 |
| 38.5 | 82.93 | 83.54 | 85.79 | 85.76 | 88.15 | 88.63 | 90.86 | 91.35 | 91.88 | 92.00 | 92.38 | 94.57 | 97.21 | 99.52 | 101.65 |
| 39 | 83.11 | 83.76 | 86.04 | 86.01 | 88.44 | 88.91 | 91.03 | 91.50 | 92.07 | 92.19 | 92.59 | 94.94 | 97.51 | 99.79 | 101.92 |
| 40 | 83.15 | 83.81 | 86.10 | 86.06 | 88.52 | 88.99 | 91.13 | 91.60 | 92.20 | 92.33 | 92.75 | 95.27 | 97.87 | 100.12 | 102.26 |
| 40.5 | 83.24 | 83.91 | 86.23 | 86.19 | 88.69 | 89.15 | 91.26 | 91.73 | 92.36 | 92.50 | 92.96 | 95.61 | 98.25 | 100.54 | 102.72 |
| 41 | 83.38 | 84.08 | 86.43 | 86.38 | 88.94 | 89.39 | 91.43 | 91.90 | 92.58 | 92.73 | 93.22 | 96.01 | 98.63 | 100.92 | 103.09 |
| 41.5 | 83.44 | 84.14 | 86.50 | 86.45 | 89.03 | 89.48 | 91.55 | 92.01 | 92.73 | 92.89 | 93.40 | 96.34 | 99.01 | 101.35 | 103.57 |
| 42 | 83.65 | 84.38 | 86.75 | 86.70 | 89.32 | 89.77 | 91.88 | 92.35 | 93.16 | 93.33 | 93.89 | 97.07 | 99.70 | 101.99 | 104.17 |
| 42.3 | 83.66 | 84.40 | 86.78 | 86.73 | 89.37 | 89.82 | 91.95 | 92.42 | 93.25 | 93.43 | 94.00 | 97.26 | 99.93 | 102.25 | 104.45 |
| 42.6 | 83.71 | 84.46 | 86.84 | 86.79 | 89.46 | 89.91 | 92.07 | 92.54 | 93.41 | 93.60 | 94.20 | 97.69 | 100.39 | 102.73 | 104.95 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

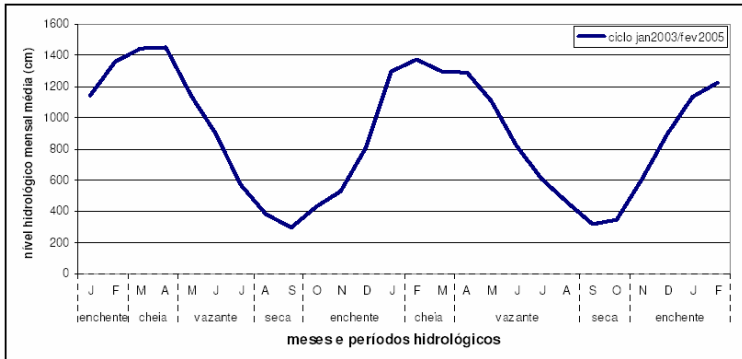
Figura 2.4: Perfil de la línea de agua entre Jirau y Abunã
Perfis de Linha d'Água Simulados – Trecho: Jirau - Abunã



Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

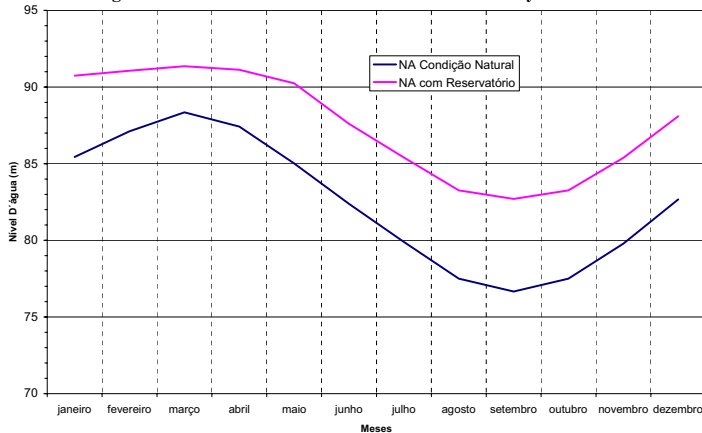
Se debe tomar en cuenta también que *disminuirá o incluso se eliminará la variación estacional (ver figuras 2.5 y 2.6) de los niveles del agua en los tramos afectados por los embalses*, lo que está asociado a muchos impactos ambientales. Por ejemplo, los estudios de impacto ambiental (EIA, tomo C) indican que en el tramo de interés “*existe una estrecha relación entre los estadios reproductivos de varias especies de peces y la variación del nivel hidrológico, demostrando la importancia de la amplitud de variación de niveles de crecida y estiaje. La formación de los embalses elevará el nivel de las aguas hasta cotas próximas a las verificadas durante grandes crecidas y las mantendrá la mayor parte del año. Se eliminarán así las variaciones estacionales responsables del estímulo de varios procesos biológicos, inviabilizando la colonización de los embalses por aquellas especies que dependen de esas variaciones para completar su ciclo de vida*”. Se espera que varias especies de peces desaparezcan, al menos localmente.

Figura 2.5: Variación de niveles en Porto Velho



Fonte: CPRM de Porto Velho

Figura 2.6: Rio Madeira en la confluencia con el río Mutum – Paraná (sección S-33) Cotogramas medios mensuales en condiciones naturales y con embalse



Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

2.2 VELOCIDADES DE FLUJO

La tabla 2.4 muestra un resumen de las velocidades de flujo aguas arriba de Santo Antonio y Jirau, con y sin represas, para varios caudales. Existirá una gran reducción de la velocidad de flujo en las proximidades de los embalses, lo que era de esperar considerando el gran aumento de nivel inducido por las represas en esos sectores (figuras 2.3 y 2.4). Ese cambio de velocidad es menor en el tramo restante de los embalses.

Tabla 2.4: Velocidades Medias Simuladas a lo largo del río Madera en los tramos de los futuros embalses de Santo Antonio y Jirau

| | Vazão (m³/s) | Velocidades (m/s) no Trecho Próximo à Barragem | | | Velocidades (m/s) na Porção Restante do Reservatório | | |
|-------------------|--------------|--|-------------|----------|--|-------------|----------|
| | | Sem Reserv. | Com Reserv. | Variação | Sem Reserv. | Com Reserv. | Variação |
| UHE SANTO ANTONIO | 5.000 | 1.27 | 0.22 | (1.05) | 0.54 | 0.26 | (0.28) |
| | 18.000 | 2.01 | 0.70 | (1.31) | 0.90 | 0.73 | (0.17) |
| | 30.000 | 2.32 | 1.26 | (1.06) | 1.21 | 1.11 | (0.10) |
| | 48.600 | 2.61 | 1.82 | (0.79) | 1.45 | 1.4 | (0.05) |
| UHE JIRAU | 5.600 | 2.62 | 0.31 | (2.31) | 0.68 | 0.24 | (0.44) |
| | 16.600 | 4.57 | 1.19 | (3.38) | 1.17 | 0.76 | (0.41) |
| | 30.000 | 5.71 | 2.19 | (3.52) | 1.66 | 1.31 | (0.35) |
| | 48.800 | 6.92 | 3.28 | (3.64) | 2.10 | 1.82 | (0.28) |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

¿Qué consecuencias tiene la reducción de velocidades en los embalses y especialmente en las cachuelas? En primer lugar, se crean las condiciones para que parte del sedimento que transporta el río Madera se deposite, lo que a su vez provoca una elevación adicional de los niveles del agua. De acuerdo a la tabla 2.3, la reducción de velocidades en la mayor parte del embalse Santo Antonio es pequeña para caudales medios y grandes, pero no para caudales bajos. En cambio, la reducción de velocidades es significativa en todo el embalse de Jirau. La sedimentación no fue considerada en el estudio de niveles de agua realizado con el HEC-RAS, que es un modelo que no tiene la capacidad de simular procesos de deposición y erosión. Según los autores del estudio, “el análisis de las características hidráulicas del tramo del río Madera a ser afectado por las represas de Santo Antonio y Jirau tuvo por objetivo apenas intentar identificar segmentos mas propicios a la sedimentación, sin permitir ninguna conclusión respecto a la cantidad de sedimento a ser depositado”.

En segundo lugar, cambia el régimen hidráulico del río, al menos en algunos tramos. El caso de la cachuela de Jirau es ilustrativo. La tabla 2.3 muestra que la velocidad de flujo se reduce de 4.57 m/s sin represa a 1.19 m/s con represa, para un caudal de 16600 m³/s, que es algo inferior al caudal medio del río. Para caudales grandes, la velocidad se reduce de 6.92 m/s a 3.28 m/s. Se observa además que las velocidades naturales son altas para todos los caudales.

Un cambio grande en el régimen hidráulico tiene muchos efectos sobre el medio acuático. Los Estudios de Impacto Ambiental (EIA, 2005) proporcionan una idea de los impactos que

pueden producirse sobre los peces, por ejemplo. Durante la realización del EIA se identificaron especies de peces especialmente adaptadas a las condiciones hidráulicas de grandes velocidades y tensiones de corte, fuerte turbulencia y gran oxigenación que se presentan en las cachuelas. Las áreas próximas a la cachuela de Jirau presentaron la mayor diversidad específica de la región de estudio. En la cachuela de Teotônio se registraron especies endémicas o raras. Según el EIA, “la alteración de la dinámica del flujo en los embalses afectará negativamente la ocurrencia de las especies de cachuela, ocasionando así una alteración sustancial en la composición de la ictiofauna que ocupa actualmente el tramo Abuná-Porto Velho. Eso probablemente ocasionará una pérdida local de biodiversidad, incluyendo posiblemente especies de peces aún no descritas por la Ciencia, y otras registradas recientemente para la Amazonia brasileña”.

La calidad del agua se verá también afectada. El equilibrio hoy existente, con niveles de saturación de oxígeno en el rango de 70% a 80%, quedará alterado ocurriendo una depleción de los niveles de oxígeno disuelto. La alteración será mayor en el embalse de Jirau, donde la reducción de la capacidad de aireación es más significativa, debido al gran número de cachuelas e rápidas que serán ahogadas. El efecto será aún mayor sobre los afluentes, debido a que el cambio de velocidad en esos ríos será mayor que en el río Madera. Por eso, la disminución de los niveles de oxígeno en los afluentes ha sido identificada como un impacto ambiental de muy alta magnitud, que está relacionado a su vez con otros impactos sobre el medio biótico, debido a la transformación de sistemas lóticos a sistemas semi-lóticos a lóticos.

Las figuras 2.6 y 2.7 muestran las velocidades con y sin represa a lo largo de los tramos de los futuros embalses de Santo Antonio y Jirau, obtenidas mediante simulación con HEC-RAS. Se observa que efectivamente los cambios son pequeños a distancias grandes de la represa de Santo Antonio, pero son grandes en la cercanía, con un máximo en la cachuela de Teotônio. Los cambios son consistentemente más grandes a lo largo del embalse de Jirau, alcanzando sus valores máximos cerca del embalse. Estos resultados corresponden a los cambios de nivel inducidos por la represa (figura 2.4) que muestran que se producirán cambios de nivel y velocidad incluso en Abuná, en la cola o extremo superior del embalse.

Figura 2.5: Velocidad de flujo entre Santo Antonio y Jirau
Perfis de Velocidades d'Água Simulados entre AHE Santo Antônio e AHE Jirau

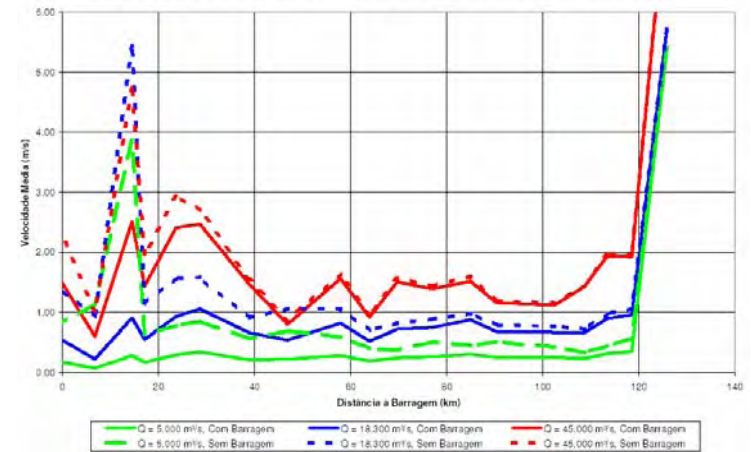
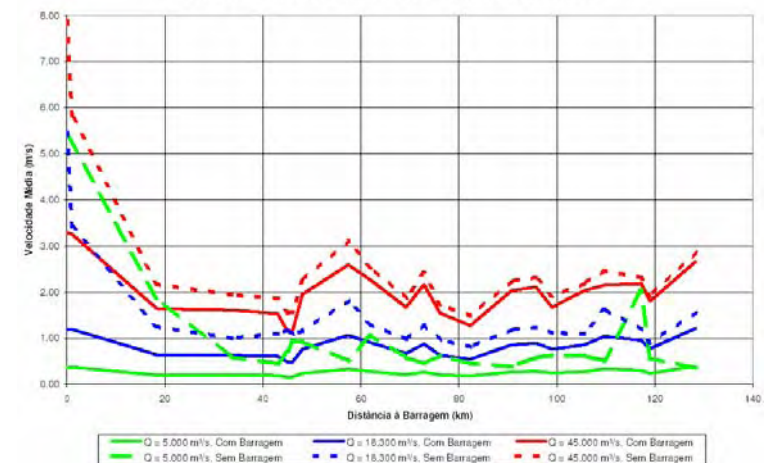


Figura 2.6: Velocidad de flujo entre Jirau y Abuná
Perfis de Velocidade Simulados – Trecho: Jirau - Abuná



Fuente: Estudos de impacto ambiental, rio Madeira, 2004

Hay que tomar en cuenta que el cambio de régimen en los ríos afluentes debería ser aún más drástico que en el río Madera. La razón es simple: el caudal de estos afluentes es mucho menor que el del río principal y su régimen hidráulico en condiciones naturales está fuertemente influenciado por los niveles que se presentan en el Madera. La elevación de niveles por el embalse disminuiría las velocidades de flujo en estos ríos en una magnitud aún mayor que en el río Madera. La mayoría de los afluentes en el tramo Abuná-Porto Velho son pequeños, con la excepción de los ríos Abuná, Mutum-Paraná, que aporta al tramo Abuná-Jirau (ver figura 2.2) y Jaci-Paraná, que aporta al tramo Jirau-Santo Antonio. En los estudios de factibilidad se menciona que “en la sección S33, localizada cerca a la boca del río Mutum-Paraná, a 46 km aguas arriba de la represa de Jirau, se observa que, en términos medios, el nivel de agua con embalse es aproximadamente 5.0 m superior al nivel de agua natural, con una sobre elevación de cerca de 3.0 m en marzo y cerca de 6.0 m en septiembre” (ver figura 2.6). Sin embargo, no se analiza el cambio en la velocidad y condiciones hidráulicas del afluente.

2.3 CONCLUSIONES

El análisis de niveles de agua y efecto de remanso que forma parte de los estudios de factibilidad *es un análisis preliminar* que sirve como insumo o información de entrada a otros estudios y diseños a nivel de viabilidad, como por ejemplo el de operación de los embalses y el de hidrosedimentología. El carácter preliminar es reconocido por los autores del estudio de niveles, por ejemplo en relación a los sedimentos, al indicar: “el análisis de las características hidráulicas del tramo del río Madera a ser afectado por las represas de Santo Antonio y Jirau tuvo por objetivo apenas intentar identificar segmentos mas propicios a la sedimentación, sin permitir ninguna conclusión respecto a la cantidad de sedimento a ser depositado (sic)”.

El problema es que pese a su carácter preliminar, el capítulo 7.9 de los estudios de remanso de los estudios de factibilidad contiene afirmaciones como la siguiente: “El régimen fluvial del río Madera y de sus afluentes en el trecho aguas arriba de Abuná no es alterado independientemente del período hidrológico, crecidas o estiaje. De esa forma, el embalse de Jirau está íntegramente contenido en territorio brasileño”. Sin embargo, los datos y resultados presentados en ese capítulo no permiten sustentar esas afirmaciones.

Un problema adicional es que los resultados del análisis de remanso fueron utilizados directamente en los estudios de impacto ambiental, donde se repiten afirmaciones como la transcrita en el párrafo anterior. Para poder ser usado en la evaluación de impacto ambiental, el estudio de niveles debe incluir, como mínimo, el análisis de:

- a) Los procesos de sedimentación y erosión
- b) Los niveles y velocidades a lo largo de los afluentes al tramo Abuná-Santo Antonio, al menos de los más importantes: ríos Abuná, Mutum-Paraná, Jaci-Paraná
- c) Niveles aguas arriba de Abuná, en el tramo binacional

Aún con esas limitaciones o vacíos, se puede concluir que:

- Los niveles de agua y velocidades aguas arriba de Abuná se verán afectados por la construcción de la presa y embalse de Jirau, al menos para caudales bajos y medios. Por tanto, el área efectiva de los embalses es mayor a la estimada en los estudios de factibilidad.
- Los niveles de agua del río Madera aumentarán mucho en las cercanías de las dos represas y provocará la desaparición de las cachuelas situadas en el tramo de río situado dentro de los futuros embalses.
- Las velocidades naturales de flujo se reducirán mucho cerca de las presas y en las cachuelas. Este gran cambio en el régimen hidráulico del río Madera tendrá efectos sobre el proceso de sedimentación, al crear las condiciones para que parte del sedimento que transporta el río Madera se deposite, lo que a su vez provocaría una elevación adicional de los niveles del agua
- El cambio en el régimen hidráulico tendrá también efectos sobre el medio acuático, al transformar sistemas lóticos a sistemas semi-lénticos a lénticos. Se espera que varias especies de peces serán incapaces de colonizar los embalses y desaparecerán, por lo menos a nivel local. La alteración de la dinámica del flujo en los embalses afectará especialmente a las especies de cachuela, ocasionando así una alteración sustancial en la composición de la ictiofauna que ocupa actualmente el tramo Abuná-Porto Velho. Eso probablemente ocasionará una pérdida local de biodiversidad, incluyendo posiblemente especies de peces aún no descritas por la Ciencia, y otras registradas recientemente para la Amazonía brasileña.
- El cambio de velocidades y régimen hidráulico en los ríos afluentes será más grande que en el río Madera, por lo que los efectos sobre la sedimentación y el medio biótico de estos afluentes será de magnitud muy grande.
- El cambio de régimen hidráulico está asociado a otros impactos, como por ejemplo la disminución del oxígeno disuelto y en general, de la calidad de aguas en los tramos a ser inundados por los embalses. Nuevamente estos efectos serán más grandes en los ríos afluentes que en el río principal.

Capítulo 3

SEDIMENTACIÓN

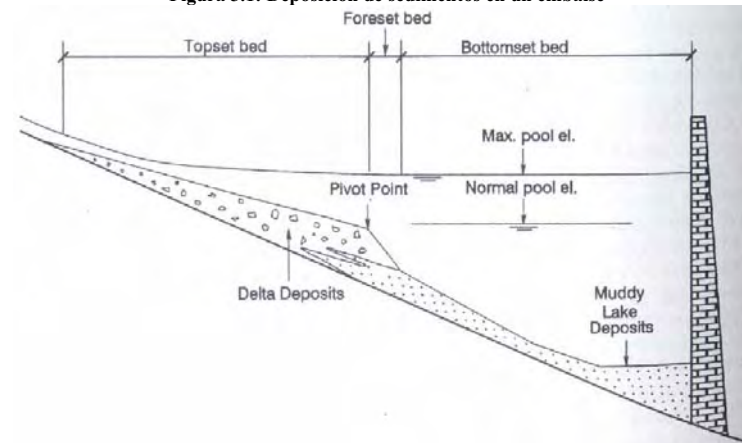
La construcción de una represa y la consiguiente formación de un embalse provoca cambios significativos en el curso de agua afectado. En relación a los sedimentos, en el embalse se producirán procesos de deposición de sedimentos y de erosión de márgenes, que pueden extenderse un tramo aguas arriba. Aguas abajo del embalse ocurrirán procesos erosivos en las márgenes y el cauce principal, asociados a cambios morfológicos del río que se extienden a una cierta distancia de la represa. Todos estos cambios son resultado del proceso de adaptación a los cambios introducidos por las obras hidráulicas y la búsqueda de un nuevo estado de equilibrio morfológico del río. En todos los casos el embalse tiende a perder gradualmente su capacidad de almacenamiento y de generación de energía, en el caso de centrales hidroeléctricas. Se producen también otros cambios asociados a la sedimentación, en su mayoría negativos desde el punto de vista ambiental.

El promedio mundial de pérdida de capacidad de almacenamiento está entre 0.5 y 1%. Con frecuencia la vida útil del embalse está determinada por la tasa de sedimentación. Esa tasa depende en primer lugar del aporte de sedimentos de la cuenca, que a su vez depende de la tasa de erosión y la capacidad de transporte de los cursos de agua (WCD, 2001). Ese aporte se mantiene estable en algunas regiones del mundo, pero en otras, como la cuenca del río Madera, tiende a incrementarse con el tiempo.

A pesar de los avances científicos y de técnicas de recolección de datos, es difícil estimar con precisión la cantidad de sedimento que atraparán un embalse. La dificultad más frecuente es la falta de información confiable y de larga duración sobre la cantidad de sedimento transportado por los ríos. La medición del caudal sólido que transporta un río es generalmente un proceso más dificultoso y caro que la medición del caudal líquido y son pocos los ríos donde se disponen de mediciones de larga duración y adecuada frecuencia (McCully, 1996).

La ubicación de los depósitos de sedimento en un embalse depende de la velocidad local del flujo. El material más grueso se deposita inicialmente en el extremo aguas arriba, formando a menudo un delta (figura 3.1). Material más fino se deposita a lo largo del embalse y puede eventualmente llegar hasta la presa y la toma de agua, afectando la operación y funcionamiento de las turbinas. Entre los factores que influyen el proceso de sedimentación están la forma y tamaño del embalse en relación a la cantidad de sedimento que ingresa, la distribución del tamaño de las partículas, las fluctuaciones en el aporte de agua y sedimentos al embalse y la forma de operación del embalse (WCD, 2001).

Figura 3.1: Deposición de sedimentos en un embalse



Fuente: Morris & Fan, 1998

3.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RIO MADERA

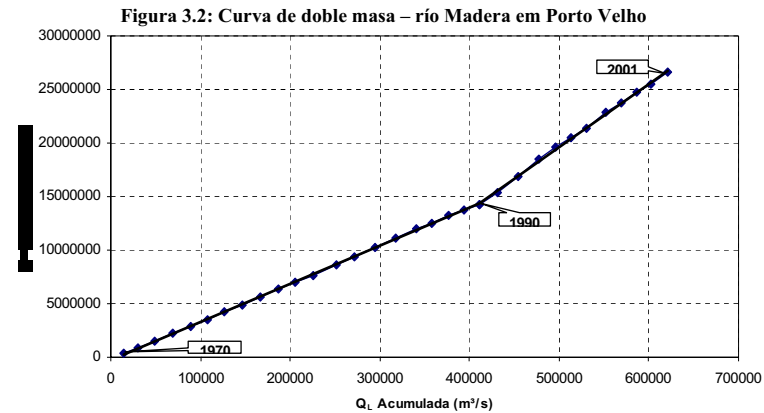
El río Madera es el principal aportante de sedimentos en suspensión y sólidos disueltos de la cuenca amazónica. Según el estudio de viabilidad (Furnas et al, 2004), “el río Madera es uno de los mayores ríos del mundo en términos de descarga sólida, presentando una concentración media de 1350 mg/l, con valores de concentración variando de 600 mg/l en aguas bajas hasta 3500 mg/l en aguas altas. En Jirau, con una descarga media de largo plazo igual a 17686 m³/s, la descarga sólida media estimada (Q_{st}) es de 2059801 t/día”.

Según la figura 1.1, el río Madera es responsable, por sí solo, de la mitad de los sedimentos de toda la cuenca amazónica, lo que se debe principalmente a su origen andino. Sin embargo, las estimaciones sobre el caudal sólido del río Madera varían mucho según la fuente. Guyot et al (1995) estimaron un transporte medio de 306 millones de toneladas por año (mill.ton/año) de sedimentos en suspensión para el periodo 1978-93 en Porto Velho. En Villa Bella, en la confluencia de los ríos Mamoré y Beni, los mismos autores estimaron un transporte de 257 mill.ton/año de sedimentos y 36 mill.ton/año de materias disueltas, para el periodo 1983-90. Del total de sedimentos en Villa Bella, 192 mill.ton/año provenían del río Beni y 65 del río Mamoré. A su vez, 122 mill.ton/año de los sedimentos del río Beni provenían del mismo río y 71 mill.ton/año de su principal afluente, el río Madre de Dios. Un aspecto a destacar es que el río Beni pierde una parte importante de su carga en suspensión en la llanura antes de confluir con el Madre de Dios: al salir de Los Andes, en el Angosto del Bala, el caudal sólido del río Beni ha sido estimado en 212 mill.ton/año (Guyot et al, 1995).

Según Ferreira et al, (1988, citado por Guyot et al, 1995), el río Madera aporta 550 mill.ton/año de sedimentos en suspensión y 37-45 mill.ton/año de materias disueltas en su confluencia con el río Amazonas. El valor diario estimado en Jirau en el estudio de viabilidad equivale a 750 mill.ton/año, lo que hace suponer que en el tramo de Porto Velho hasta la desembocadura en el río Amazonas sedimenta parte del caudal sólido.

Esas estimaciones difieren en un factor de 2 o más. Esto puede deberse a diferencias en los métodos de medición, de cálculo y a periodos de cálculo no coincidentes. También muestra las dificultades, mencionadas por la Comisión Mundial de Presas, para obtener información confiable y de larga duración sobre la cantidad de sedimento transportado en muchos ríos del mundo.

Los estudios de factibilidad (2004) y EIA (2005) identificaron una tendencia de aumento de la carga de sedimentos con el tiempo en el tramo de estudio, lo que tiene gran importancia para los proyectos Jirau y Santo Antonio. Mediante el método de doble masa y los datos disponibles de la ANA, de la FURNAS y del USGS, se halló que a partir de 1990, se produjo un cambio significativo en la relación caudal sólido con caudal líquido, como se observa en la figura 3.2. La tasa anual media de aumento de la carga de sedimentos R fue estimada en 1.83%, lo que según los autores de esos estudios probablemente esté asociado al aumento de la erosión en la cuenca. En base a ese resultado, se decidió adoptar un valor relativamente conservador de R=2% de aumento anual de la tasa de producción de sedimentos, para los estudios de sedimentación y vida útil de los embalses.



Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

El capítulo de Hidrosedimentología de los estudios de factibilidad estima que el caudal sólido total es 1.05 veces el caudal sólido en suspensión. Eso significa que el caudal de fondo representa solamente 5% del caudal en suspensión. Se denomina caudal o transporte de fondo

al que se mueve por el lecho o cerca del lecho del río, por arrastre o saltación. El tamaño de las partículas que se mueven por el fondo es generalmente mucho más grande que el tamaño de las partículas que se mueven en suspensión. Por eso mismo, son las primeras que se depositan en el fondo de los embalses, empezando generalmente por el extremo aguas arriba. En cambio, los sedimentos en suspensión están formados por material fino (sobre todo limo y arcilla), que bajo condiciones adecuadas puede incluso no depositarse en el embalse y pasar río abajo a través de las turbinas y vertedero.

El caudal sólido que se mueve por el fondo es mucho más difícil de medir que el sedimento en suspensión, por lo que con frecuencia no se dispone de mediciones de fondo en ríos. La tabla 3.1 muestra los únicos datos de tamaño de material del lecho del río Madera que aparecen en los estudios de factibilidad. De acuerdo a la tabla 3.1, el 70% de las partículas del lecho está formado por arena. Es decir, el 70% de esas partículas tiene tamaño igual o superior a 0.07 mm y menor a 2 mm.

Tabla 3.1: Río Madera en Porto Velho: Porcentaje de arcilla, limo y arena en las muestras de sólidos del lecho

| Fecha | Sólidos del lecho (%) | | |
|-----------|-----------------------|------|-------|
| | Arcilla | Limo | Arena |
| 1/nov/03 | 2.7 | 27.3 | 70.0 |
| 27/ene/04 | 4.0 | 26.0 | 70.0 |
| Media | 3.4 | 26.7 | 70.0 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

La tabla 3.2 muestra que solamente el 2.4% de los sólidos en suspensión del río Madera está formado por arenas. El 55.7% está formado por arcillas, cuyo tamaño es menor a 0.004 mm y el 41.9% por limos, cuyo tamaño oscila entre 0.004 y 0.07 mm. Considerando que aproximadamente un poco menos del 5% de los sólidos totales se mueve por el fondo, los autores del estudio de Hidrosedimentología estimaron que los porcentajes medios de arcilla, limo y arena en el caudal sólido total son los que se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.2: Río Madera en Porto Velho: Porcentaje de arcilla, limo y arena en las muestras de sólidos en suspensión

| Fecha | Sólidos del lecho (%) | | |
|-----------|-----------------------|------|-------|
| | Arcilla | Limo | Arena |
| 1/nov/03 | 70.1 | 26.5 | 3.4 |
| 27/jan/04 | 56.6 | 41.0 | 2.4 |
| 3/feb/04 | 64.9 | 31.8 | 3.3 |
| 10/feb/04 | 31.5 | 64.0 | 4.5 |
| 16/feb/04 | 57.7 | 41.2 | 1.1 |
| 20/feb/04 | 60.9 | 38.2 | 0.9 |
| 2/mar/04 | 36.1 | 63.0 | 0.9 |

| | | | |
|----------|------|------|-----|
| 9/mar/04 | 67.9 | 29.7 | 2.4 |
| Media | 55.7 | 41.9 | 2.4 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

Tabla 3.3: Río Madera en Porto Velho: Porcentaje de arcilla, limo y arena en las muestras analizadas

| Sólidos | % Arcilla Pc | % Limo Pm | % Arena Ps |
|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| En suspensión | 53.1 | 39.9 | 2.3 |
| Del lecho | 0.2 | 1.3 | 3.3 |
| Total | 53.2 | 41.2 | 5.6 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

De acuerdo a los estudios de factibilidad, “el segmento del río Madera, donde serán instaladas las centrales hidroeléctricas Jirau y Santo Antonio, se caracteriza por su elevada pendiente, patrón rectilíneo y encajonado, meandros, codos y niveles de base controlados estructuralmente. Esas características morfológicas del canal reflejan un marcado control geológico impuesto al río”, que se hace evidente en los niveles de agua en cachuelas como Teotónio y Jirau, que son verdaderos controles hidráulicos. “Tales condiciones favorecen el tránsito de sedimentos a lo largo del perfil longitudinal del canal del río y reducen la sedimentación. Aun así, parte del transporte de sedimentos será bloqueado por las represas”.

3.2 VIDA ÚTIL DE LOS EMBALSES

El estudio de factibilidad (Furnas et al, 2004) usó el “método empírico de reducción de área” desarrollado por Borland & Miller para estimar la sedimentación y vida útil de los embalses de Jirau y Santo Antonio. La eficiencia de retención del embalse Er fue estimada mediante la curva de Brune. La eficiencia de retención es un parámetro que indica qué porcentaje de los sedimentos que ingresan al embalse será atrapado en el lago en un momento determinado. El método y la curva empleados en los estudios son de uso frecuente a nivel mundial como una primera aproximación adecuada para estudios de prefactibilidad, donde no se pretende estimar la ubicación de los depósitos ni el tamaño del material depositado.

Para evaluar la sedimentación en los embalses, previamente se estimó el caudal sólido total (en suspensión y de fondo) en Jirau y Santo Antonio para el periodo 1931-2001. La tabla 3.3 muestra los valores medios diarios de ese periodo para los dos embalses. El caudal sólido de Jirau difiere según la fuente. Según el EIA (2005), el caudal sólido medio diario en Jirau es de 1,594,529 ton/día, 21% por debajo del valor de la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Caudal sólido medio (toneladas/día) en Santo Antonio y Jirau, 1931-2001

| Embalse | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| S. Antonio | 1,984,326 | 3,203,121 | 5,721,690 | 4,129,370 | 1,760,933 | 754,218 | 333,195 | 134,670 | 91,507 | 141,303 | 328,900 | 869,056 | 1,621,024 |
| Jirau | 2,914,808 | 3,888,288 | 4,845,698 | 4,138,638 | 2,712,262 | 1,586,320 | 859,805 | 440,973 | 328,600 | 449,061 | 844,733 | 1,708,421 | 2,059,801 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

La tabla 3.4 resume los principales resultados obtenidos para Santo Antonio. Se estima que la pérdida máxima de volumen del embalse es de 52.2%, que se alcanzaría en 74 años para R=0% y en 44 años para un aumento de R=2% en la producción de sedimentos de la cuenca. La eficiencia de retención de sedimentos del embalse Er es 0% a partir de ese momento, independientemente del valor de la tasa R. Es decir, a partir de 44 o 74 años, el embalse no retendría sólidos, que pasarían todos a través de las turbinas y el vertedero. Un dato adicional no consignado en la tabla 3.4 es que Er=19.5% para el año 0, es decir que al inicio de la operación del embalse, el 80.5% de los sólidos totales pasaría aguas abajo. La altura del sedimento estimada al pie de la presa, en cien años de operación alcanzaría la cota 61.63, por lo que los autores recomiendan que las tomas de agua se coloquen a la cota 63.0 m.

Tabla 3.4: Principales resultados de los Estudios de sedimentación en Santo Antonio

| Variable | Unid | Alternativa | |
|---|-----------------|-------------------------|---|
| Tasa anual de aumento del sedimento -R | % | 0 | 2 |
| Capacidad - Volumen del Embalse | hm ³ | 2075 | |
| Volumen líquido anual afluente | hm ³ | 567044.03 | |
| Relación Capacidad/Volumen anual afluente | - | 3.66 x 10 ⁻³ | |
| Eficiencia de Retención Er en t = 0 | % | 19.50 | |

| | | | |
|-------------------------------------|-----------------|---------|---------|
| Tiempo para Er = 1% | anos | 28 | 22 |
| Volumen de Sedimentos en el Embalse | hm ³ | 1044.35 | 1046.63 |
| Volumen Disponible en el Embalse | hm ³ | 1030.78 | 1028.50 |
| Pérdida de Volumen del Embalse | % | 50.3 | 49.6 |

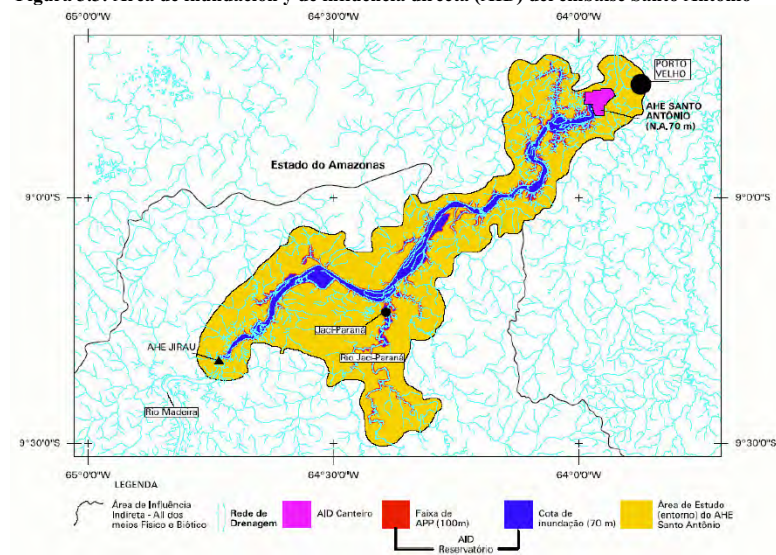
| | | | |
|-------------------------------------|-----------------|---------|---------|
| Tiempo para Er = 0% | anos | 74 | 44 |
| Volumen de Sedimentos en el Embalse | hm ³ | 1082.62 | 1082.64 |
| Volumen Disponible en el Embalse | hm ³ | 992.52 | 992.49 |
| Pérdida de Volumen del Embalse | % | 52.2 | 52.2 |

| | | | |
|---|---|-------|-------|
| Cota de Altura del Sedimento al Pie de presa (50 años) | m | 61.61 | 61.63 |
| Cota de Altura del Sedimento al Pie de presa (100 años) | m | 61.63 | 61.63 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

Resultados tan favorables al proyecto se deben a la forma estrecha y alargada del embalse (ver figura 3.3), a su pequeño volumen en relación al volumen de agua afluente y a la rápida disminución de eficiencia de atrape de sedimentos que resulta de aplicar la curva de Brune a las condiciones anteriores.

Figura 3.3: Área de inundación y de influencia directa (AID) del embalse Santo Antonio



Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

La tabla 3.5 resume los principales resultados obtenidos para Jirau. Se observa que las alternativas son cuatro, debido a que se consideraron dos niveles de operación del embalse: 90.0 y 87.0. Esto se debe al criterio de operar el embalse con niveles variables a lo largo del año (tabla 2.1) para evitar inundar territorio boliviano. Como el método no puede considerar niveles variables en el tiempo, se asumió un nivel constante de 87.0, que representa el promedio de los valores de la tabla 2.1.

El volumen final disponible en el embalse es idéntico para todas las alternativas. Lo único que varía es el tiempo que lleva alcanzar ese volumen. En cambio, la cota del sedimento al pie de presa varía mucho según la cota de operación. Esos resultados reflejan las limitaciones del método utilizado para evaluar la sedimentación. Las diferencias de pérdida de volumen en porcentaje se deben a que la capacidad inicial del embalse varía según la cota de operación: 87.0 o 90.0. En un tiempo estimado entre 28 y 45 años según el caso, la eficiencia de retención de sedimentos del embalse E_r es 0%, independientemente del valor de la tasa R . A partir de ese momento el embalse no retendría sólidos y mantendría un volumen de almacenamiento de 976.2 hm^3 . Un dato adicional no consignado en la tabla 3.5 es que $E_r=19.1\%$ para el año 0, es decir que al inicio de la operación del embalse, el 80.9% de los sólidos totales pasarían aguas abajo. Considerando la gran cantidad de sedimentos que pasará por los sistemas de descarga

desde el inicio de la operación, los autores recomiendan “que las turbinas y demás equipos sean proyectados para soportar los impactos de esas partículas”.

Tabla 3.5: Principales resultados de los Estudios de sedimentación en Jirau

| Variable | Unid | Alternativa | | | |
|---|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nivel del agua del embalse | m | 87.00 | 90.00 | 87.00 | 90.00 |
| Tasa anual de aumento del sedimento-R | % | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Capacidad - Volumen del Embalse | hm^3 | 1378.91 | 2015.26 | 1378.91 | 2015.26 |
| Volumen líquido anual afluente | hm^3 | 557744.72 | 557744.72 | 557744.72 | 557744.72 |
| Relación Capacidad/Volumen anual afluente | - | 2.47×10^{-3} | 3.61×10^{-3} | 2.47×10^{-3} | 3.61×10^{-3} |
| Eficiencia de Retención E_r en $t = 0$ | % | 8.48 | 19.15 | 8.48 | 19.15 |

| | | | | | |
|-------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Tiempo para $E_r = 1\%$ | anos | 12 | 17 | 10 | 14 |
| Volumen de Sedimentos en el Embalse | hm^3 | 364.01 | 1005.76 | 366.86 | 1003.84 |
| Volumen Disponible en el Embalse | hm^3 | 1014.90 | 1009.50 | 1012.05 | 1011.42 |
| Pérdida de Volumen del Embalse | % | 26.4 | 49.8 | 26.6 | 49.8 |

| | | | | | |
|-------------------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|
| Tiempo para $E_r = 0\%$ | anos | 39 | 45 | 28 | 31 |
| Volumen de Sedimentos en el Embalse | hm^3 | 406.67 | 1039.03 | 402.70 | 1039.06 |
| Volumen Disponible en el Embalse | hm^3 | 976.24 | 976.23 | 976.16 | 976.20 |
| Pérdida de Volumen del Embalse | % | 29.5 | 51.6 | 29.2 | 51.6 |

| | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|
| Cota de Altura del Sedimento al Pie de presa (50 años) | m | 67.48 | 76.09 | 67.48 | 76.09 |
| Cota de Altura del Sedimento al Pie de presa (100 años) | m | 67.48 | 76.09 | 67.48 | 76.09 |

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudios de viabilidad, 2004

Sin especificar razones, pero al parecer tomando en cuenta los resultados descritos, los autores del estudio de factibilidad decidieron adoptar una vida útil de 50 años para el embalse de Jirau y mayor a 100 años para Santo Antonio, como se observa en la tabla 1.2.

3.3 SEDIMENTACIÓN EN EL TRAMO GUAYARAMERIN-PORTO VELHO

3.3.1 Metodología

El estudio de factibilidad (Furnas et al, 2004) recomendó profundizar los estudios hidrosedimentológicos para responder, entre otras, a las siguientes cuestiones:

- Ubicación espacial de los sedimentos en los embalses, localizando los puntos más importantes de acumulación y estimando los volúmenes acumulados.
- Tipos y tamaños de los sedimentos predominantes en los puntos notables de deposición.
- Identificación de los depósitos permanentes y estacionales.
- Análisis del comportamiento de los embalses individualmente y en conjunto.

Para responder esas cuestiones y evaluar algunos impactos, el estudio de impacto ambiental (EIA) incluyó un anexo de modelación hidrosedimentológica del río Madera, “que cubre todo el tramo entre la confluencia con el río Beni y la confluencia con el río Jamari. Este tramo de 430 km de extensión, se inicia aguas arriba del área afectada por el embalse de Jirau, terminando aguas abajo de Porto Velho, 80 km más abajo de Santo Antonio”. Es considerablemente más extenso que el tramo Abuná-Santo Antonio que se utilizó en el estudio de niveles de agua.

Desde hace varios años, se ha extendido el uso de modelos matemáticos para simular el proceso de sedimentación en embalses. El EIA usó el modelo HEC-6 – Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs, del U.S Army Corp of Engineers. Es un modelo de libre disponibilidad y amplia difusión, que permite estimar los cambios geométricos del lecho fluvial resultante de procesos de erosión y sedimentación, sobre grandes periodos de tiempo. Al ser aplicado a embalses, el modelo calcula los depósitos a lo largo del perfil longitudinal, incluyendo su volumen y ubicación. Para un tramo de río, el modelo hace un balance de las entradas y salidas de sedimentos. El modelo tiene algunas características y limitaciones que son relevantes al interpretar sus resultados:

- Es unidimensional, lo que por ejemplo significa que no tiene la capacidad de simular la sedimentación o erosión en tramos curvos. El HEC-6 considera que la deposición o erosión es uniforme en toda la sección transversal del río.
- El aporte de sedimentos al tramo de estudio debe ser calculado a través de una relación definida entre caudal líquido y caudal sólido total. Se pueden usar relaciones diferentes por rango de tamaño de partículas. La composición granulométrica y tamaño de las partículas influyen mucho en los resultados.

- El modelo se basa en la ecuación de flujo permanente, es decir constante en el tiempo. Como el caudal (y por tanto, la profundidad, velocidad, etc) de un río varía en el tiempo, el hidrograma caudales se lo aproxima mediante una secuencia de periodos de caudal constante. El modelo calcula el transporte de sedimentos en cada sección, a partir de los perfiles de línea de agua obtenidos para esos caudales constantes.

El modelo necesita, entre otras cosas, de secciones transversales del río. Para el tramo Abuná-Santo Antonio se utilizaron las secciones obtenidas para el estudio de niveles de agua. Para el tramo aguas arriba de Abuná se recurrió a batimetrías parciales del lecho del río Madera, que cubrían un ancho de 60 m del canal central del río. Estas secciones fueron completadas tomando como referencia secciones topobatimétricas completas próximas, y tienen como referencia Canal de Navegação en la tabla 3.6. Algunas secciones aguas abajo de Porto Velho fueron obtenidas del Atlas de la Hidrovia Madeira-Amazonas de Itacoatiara a Porto Velho. Por las referencias de ubicación que contiene y para una mejor interpretación de los resultados, la tabla 3.6 lista todas las secciones utilizadas, según una transcripción literal de la tabla 6.7 del tomo B, volumen 7 de los Estudios de Impacto Ambiental.

Tabla 3.6: Secciones transversales usadas en el modelaje

| Seção | Distância (m) | Seção de referência | | Observações |
|-------|---------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | | HEC - RAS | Desenho | |
| 431 | 8160 | Canal de Navegação | Canal de Navegação | |
| 423 | 8096 | Canal de Navegação | Canal de Navegação | |
| 415 | 9846 | Canal de Navegação | Canal de Navegação | |
| 405 | 6502 | Batimetria | Batimetria | |
| 398 | 2123 | Batimetria | Batimetria | Cachoeira do Ribeirão |
| 396 | 21142 | Batimetria | Batimetria | |
| 375 | 3247 | Batimetria | Batimetria | |
| 372 | 2579 | Batimetria | Batimetria | Cachoeira das Araras |
| 369 | 10060 | Batimetria | Batimetria | |
| 359 | 9769 | Canal de Navegação | Canal de Navegação | |
| 349 | 11369 | Canal de Navegação | Canal de Navegação | |
| 338 | 9325 | 42,6 | S-42,6 | |
| 329 | 1747 | 42,3 | S-42,3 | Rio Abuná |
| 327 | 7510 | 42 | S-42 | |
| 320 | 4169 | 41,5 | S-41,5 | |
| 315 | 6515 | 41 | S-41 | |
| 309 | 3331 | 40,5 | S-40,5 | Cachoeira do Pedreira |
| 306 | 4940 | 40 | S-40 | |
| 301 | 8421 | 39 | S-39 | |
| 292 | 6172 | 38,5 | S-38,5 | |
| 286 | 3292 | 38 | S-38 | Cachoeira do Paredão |
| 283 | 3673 | 37 | S-37 | |
| 279 | 7232 | 36 | S-36 | |
| 272 | 4536 | 35 | S-35 | |

| Seção | Distância (m) | Seção de referência | | Observações |
|-------|---------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| | | HEC - RAS | Desenho | |
| 267 | 9373 | 34.5 | S-34,5 | |
| 258 | 1995 | 34 | S-34 | |
| 256 | 970 | 33 | S-33 | Cachoeira Três Irmãos |
| 255 | 2133 | 32 | S-32 | Ilha Três Irmãos |
| 253 | 9420 | 31 | S-31 | |
| 243 | 15217 | 30 | S-30 | |
| 228 | 17331 | 29 | S-29 | |
| 211 | 1000 | Cópia da seção 228 | Cópia da seção 228 | |
| 210 | 2755 | 28 | S-28 | |
| 207 | 7312 | 18 | S-23 | Salto do Jirau |
| 200 | 5083 | 17 | S-22 | Cachoeira do Inferno |
| 195 | 4757 | 16 | S-21 | |
| 190 | 6198 | 15 | S-20 | |
| 184 | 12103 | 14 | S-19 | Ilha da Pedra |
| 172 | 5416 | 13 | S-18 | Ilha Santana |
| 166 | 7929 | 12 | S-17 | |
| 158 | 7312 | 11 | S-16 | Ilha Niterói |
| 151 | 5772 | 10 | S-15 | Ilha São Patrício |
| 145 | 6011 | 9 | S-14 | Ilha Liverpool |
| 139 | 11047 | 8 | S-13 | |
| 128 | 7925 | 7 | S-12 | Cachoeira Morrinho |
| 120 | 10312 | 6 | S-11 | |
| 110 | 4977 | 5 | S-10 | |
| 105 | 6500 | 4 | S-9 | |
| 98 | 2650 | 3.5 | S-8 | Cachoeira de Teotônio |
| 96 | 7726 | 3 | S-7 | |
| 88 | 6777 | 2 | S-6 | |
| 81 | 6067 | 1 | S-5 | Cachoeira Santo Antonio |
| 75 | 12746 | Ponte Projetada | Ponte Projetada | Porto Velho |
| 63 | 20608 | Cópia da seção 75 | Cópia da seção 75 | Cópia da seção 75 |
| 42 | 16190 | Atlas | Atlas | |
| 26 | 25880 | Atlas | Atlas | Ilha Jamarizinho |
| 0 | 0 | Atlas | Atlas | Foz do rio Jamari |

Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

El número de sección en la primera columna de la tabla 3.6 corresponde a la progresiva, es decir a la distancia en kilómetros medida desde la sección 0 del extremo aguas abajo, en la boca del río Jamari.

3.3.2 Resultados

El modelo entrega como resultados los perfiles del lecho del río y de la línea de agua para cada periodo simulado y los balances de sedimento en cada tramo de interés. Para el análisis de los resultados, el tramo de estudio fue dividido en cuatro subtramos (Furnas et al, 2005):

Trecho I – subtramo binacional aguas arriba de Abuná, secciones arriba de la 329.

Trecho II – correspondiente al futuro embalse de Jirau, entre las secciones 329 y 210.

Trecho III – correspondiente al futuro embalse de Santo Antônio, entre las secciones 210 y 88.

Trecho IV – aguas abajo del futuro embalse de Santo Antônio, secciones 88 a 0.

Se consideraron dos hipótesis de evolución de la producción de sedimentos, de acuerdo a lo descrito en 3.1: a) una condición estabilizada que mantiene la situación actual (R=0%) y b) una condición de crecimiento de la producción de sedimentos de 2% anual. Para cada hipótesis se simuló varias alternativas: caso 0 sin embalses, caso 1 de implantación de uno de los dos embalses y caso 2 de implantación de los dos embalses. Además se simuló dos niveles de operación en Jirau: 87.0 y 90.0, que son idénticos a los casos considerados para la estimación de vida útil. El caso 0 se simuló porque permite identificar, si existen, tendencias a la erosión o sedimentación a lo largo del tramo estudiado del río Madeira. La combinación de las hipótesis y alternativas resultó en los casos de la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Casos simulados con el modelo

| | | NA Jirau (m) | NA Santo Antônio (m) |
|--|--------------|--------------|----------------------|
| Condição Estabilizada (sem crescimento da produção de sedimento) | Caso 0 | - | - |
| | Caso 1S | - | 70,00 |
| | Caso 1J-90 | 90,00 | - |
| | Caso 2-90 | 90,00 | 70,00 |
| | Caso 1J-87 | 87,00 | - |
| | Caso 2-87 | 87,00 | 70,00 |
| Condição Crítica (produção de sedimento crescendo a 2% ao ano) | Caso 0-C | - | - |
| | Caso 1S-C | - | 70,00 |
| | Caso 1J-90-C | 90,00 | - |
| | Caso 2-90-C | 90,00 | 70,00 |
| | Caso 1J-87-C | 87,00 | - |
| | Caso 2-87-C | 87,00 | 70,00 |

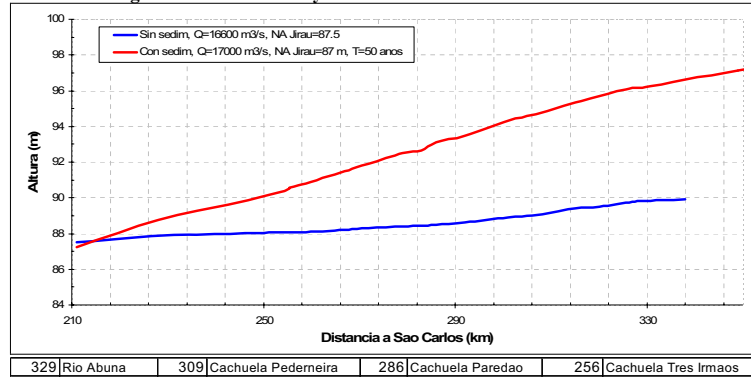
Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

La figura 3.4 permite comparar los perfiles de la línea de agua en el tramo Abuná-Jirau, para caudales y niveles de operación del embalse similares, con y sin sedimentos. El perfil sin sedimentos corresponde al estudio de factibilidad, que se muestra en la figura 2.4. El perfil con sedimentos corresponde a una tasa de aumento anual de 2% al cabo de 50 años. Las diferencias son dramáticas. La simulación con sedimentos estima un nivel de agua de 96.15 m a la altura de la confluencia con el río Abuná (kilómetro 329), más de 6 m por encima del nivel (89.82) del perfil sin sedimentos. Esa diferencia significa que un extenso tramo del río Madeira aguas arriba de la confluencia quedaría inundado, al igual que un tramo del río Abuná,

cuya desembocadura quedaría parcialmente bloqueada por los sedimentos y el nivel del agua del río principal. El nivel de 96.15 m es muy cercano al correspondiente

El perfil sin sedimentos se extiende solamente hasta el kilómetro 338, que corresponde a Abuna Vila. Por eso no es posible hacer una comparación de los niveles en el tramo binacional más arriba. Esto evidencia muestra una seria limitación del estudio de factibilidad, que ni siquiera consideró en el análisis el tramo I aguas arriba de Abuná. En general y pesar de que las diferencias en los resultados están influenciados por varios factores que se describirán más adelante, es evidente que el análisis con sedimentos debió ser considerado tanto para determinar la superficie inundada por los embalses, como para evaluar los impactos ambientales.

Figura 3.5: Perfiles con y sin sedimento en el tramo Jirau-Abuná



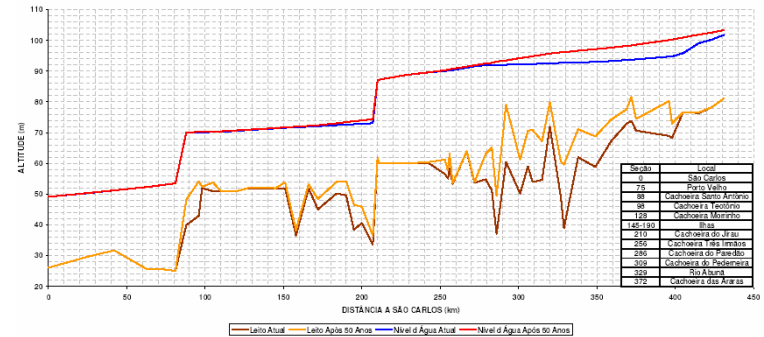
Fuente: Elaboración en base a los Estudios de impacto ambiental, río Madeira

La figura 3.6 muestra los resultados de la simulación con el modelo HEC-6 para el mismo caso 2-87-C de la figura 3.5, que considera la construcción de las dos represas. Se muestra todo el tramo de estudio desde el río Jamari (kilómetro 0) hasta la confluencia de los ríos Beni y Mamoré (kilómetro 431). Esta figura muestra también el perfil del lecho del río al inicio (año 0) y después de 50 años. Las caídas bruscas del perfil corresponden a la ubicación de las represas. La simulación predice una fuerte elevación del nivel del lecho del río en el trecho I aguas arriba de Abuná y en el trecho II entre Abuná y Jirau. En algunos puntos (ver tabla 3.8) se acumulan más de 20 m de sedimentos en 50 años. En cambio, la sedimentación en el embalse de Santo Antonio es de pequeña magnitud. El modelo no predice erosión del lecho aguas abajo de la represa de Santo Antonio.

La figura 3.6 muestra también los niveles del agua al inicio (línea azul) y después de 50 años (línea roja). Nuevamente el cambio más grande se produce en los trechos I y II, por causa del embalse de Jirau. Llama la atención que el aumento más grande de nivel se produzca cerca de la cachuela de Ribeirão (km 398), es decir 70 km más arriba de la confluencia con el río Abuná

y completamente dentro del tramo binacional. El nivel de agua en este punto sube cerca de 6 m en 50 años (de 94.77 a 100.30) para el caudal de 17000 m³/s. Para una mejor ubicación de las cachuelas de este tramo referirse a la figura 1.3.

Figura 3.6: Perfil del lecho y de la línea de agua para el caso 2-87-C
 Condición Crítica – Simulación Durante 50 Años – Caso 2-87 – Após a Construção dos Dois Aproveitamentos (Jirau na El. 87,00 m)
 Perfil de Linha d'Água Correspondente à Vazão Média do Mês de Dezembro (17.000 m³/s)



Fuente: Estudos de impacto ambiental, río Madeira, 2004

Los resultados anteriores son compatibles con lo que se conoce del comportamiento de embalses, descrito al comienzo de este capítulo. En particular, con la formación de depósitos de material grueso (delta deposits, figura 3.1) en el extremo aguas arriba del embalse. Estos depósitos son los primeros que se forman, desde la entrada en operación del embalse. Lo notable es que según la figura 3.6, esos depósitos se extienden mucho más arriba de Abuná. Es decir, los efectos del embalse de Jirau se extienden mucho más allá de lo previsto en los estudios de factibilidad e incluso, que el embalse se extiende hasta el tramo binacional. Bajo esos conceptos sería razonable calcular una nueva superficie del embalse Jirau, que sería más realista que el dato de la tabla 1.2. Lamentablemente no se dispone de la topografía del sector entre Abuná y Guayaramerín. Los planos topográficos que forman parte de los estudios de factibilidad solo llegan hasta Abuná.

La tabla 3.8 muestra las cotas del talvege o talweg para el mismo caso 2-87-C. El talvege es la línea que une los puntos más profundos del lecho del río. Esta tabla muestra los cambios del talvege y del nivel de agua NA durante los 50 años de simulación.

Como se mencionó más arriba, los autores del EIA hallaron que el aumento de nivel del lecho del río y de la superficie del agua se debe a varios factores, el más importante de los cuales es la construcción de los embalses. El segundo factor en importancia sería un proceso de sedimentación natural. “Los resultados de las simulaciones indican que existe una tendencia natural a la sedimentación en algunos trechos localizados a lo largo del tramo de estudio. El primero de esos trechos se inicia aguas debajo de la cachuela de Ribeirão (sección 396) y se

prolonga hasta aguas abajo de cachuela de Paredão (sección 272). Otro trecho con tendencia natural a la sedimentación se sitúa inmediatamente aguas abajo de la cachuela de Jirau (secciones 207 a 166), en una longitud de 30 a 40 km².

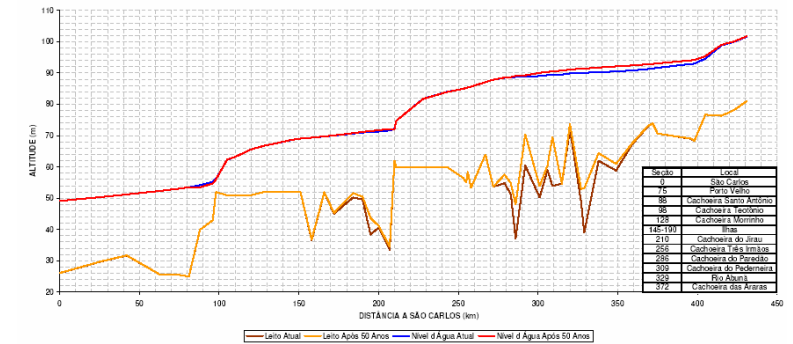
Tabla 3.8: Evolución del tramo de estudio para el caso 2-87-C
Condição Crítica – Evolução do Trecho em Estudo Durante 50 anos
Caso 2-87-C – Após a Construção dos Dois Aproveitamentos –
AHE Jirau na El. 87,00 m

| PERÍODO | 0 ANOS | | 5 ANOS | | 10 ANOS | | 20 ANOS | | 50 ANOS | |
|---------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | TALVEGUE | NA | TALVEGUE | NA | TALVEGUE | NA | TALVEGUE | NA | TALVEGUE | NA |
| 431 | 81.05 | 101.78 | 81.05 | 101.81 | 81.05 | 101.86 | 81.05 | 102.07 | 81.05 | 103.38 |
| 423 | 78.15 | 100.18 | 78.15 | 100.23 | 78.15 | 100.31 | 78.15 | 100.67 | 78.16 | 102.52 |
| 415 | 76.35 | 99.10 | 76.35 | 99.16 | 76.35 | 99.27 | 76.35 | 99.73 | 76.59 | 101.93 |
| 405 | 76.86 | 95.85 | 76.86 | 96.07 | 76.86 | 96.39 | 76.86 | 97.35 | 76.86 | 100.93 |
| 398 | 89.24 | 94.77 | 89.25 | 95.05 | 89.25 | 95.48 | 89.25 | 96.58 | 72.98 | 100.30 |
| 396 | 88.95 | 94.72 | 89.43 | 95.00 | 70.12 | 95.41 | 73.71 | 95.43 | 80.25 | 100.12 |
| 375 | 70.85 | 93.84 | 70.65 | 94.14 | 70.66 | 94.56 | 70.70 | 95.50 | 74.43 | 98.63 |
| 372 | 73.85 | 93.72 | 73.86 | 94.02 | 73.91 | 94.45 | 75.49 | 95.38 | 81.59 | 98.39 |
| 369 | 72.94 | 93.61 | 73.11 | 93.92 | 73.16 | 94.35 | 74.37 | 95.27 | 77.63 | 98.24 |
| 359 | 67.15 | 93.27 | 67.32 | 93.58 | 67.25 | 94.02 | 67.58 | 94.94 | 74.24 | 97.66 |
| 348 | 59.86 | 93.93 | 60.94 | 93.81 | 61.55 | 93.75 | 63.54 | 94.64 | 69.79 | 97.15 |
| 338 | 61.97 | 92.81 | 66.56 | 92.92 | 66.66 | 93.98 | 68.70 | 94.27 | 71.13 | 96.64 |
| 329 | 38.98 | 92.74 | 46.07 | 92.77 | 53.11 | 93.06 | 53.37 | 93.99 | 56.64 | 96.15 |
| 327 | 49.07 | 92.70 | 50.80 | 92.74 | 57.18 | 92.99 | 58.29 | 93.91 | 60.56 | 96.15 |
| 320 | 71.96 | 92.68 | 71.95 | 92.61 | 73.79 | 92.74 | 75.09 | 93.64 | 79.87 | 95.71 |
| 315 | 54.82 | 92.42 | 54.92 | 92.44 | 58.45 | 92.49 | 62.98 | 93.33 | 67.23 | 95.32 |
| 309 | 53.95 | 92.36 | 55.25 | 92.37 | 57.05 | 92.39 | 65.65 | 93.01 | 70.86 | 94.86 |
| 306 | 59.01 | 92.32 | 59.01 | 92.33 | 59.13 | 92.35 | 64.30 | 92.92 | 70.66 | 94.62 |
| 301 | 50.26 | 92.21 | 50.68 | 92.21 | 51.49 | 92.23 | 61.13 | 92.49 | 61.25 | 94.29 |
| 292 | 80.47 | 92.10 | 61.02 | 92.10 | 61.04 | 92.10 | 67.27 | 92.12 | 79.13 | 93.46 |
| 286 | 37.09 | 92.07 | 37.09 | 92.07 | 37.09 | 92.07 | 38.29 | 92.07 | 49.43 | 93.13 |
| 283 | 51.24 | 91.99 | 51.24 | 91.99 | 51.24 | 91.99 | 51.24 | 91.99 | 55.21 | 92.67 |
| 279 | 54.80 | 91.94 | 54.80 | 91.94 | 54.80 | 91.94 | 54.80 | 91.94 | 63.06 | 92.50 |
| 272 | 53.98 | 91.57 | 53.68 | 91.57 | 53.68 | 91.57 | 53.68 | 91.57 | 53.98 | 91.92 |
| 267 | 63.95 | 91.12 | 63.95 | 91.13 | 63.95 | 91.13 | 63.95 | 91.13 | 63.95 | 91.49 |
| 258 | 53.37 | 90.35 | 53.37 | 90.35 | 53.37 | 90.35 | 53.37 | 90.35 | 53.64 | 90.74 |
| 256 | 58.37 | 90.25 | 58.37 | 90.25 | 58.37 | 90.25 | 58.37 | 90.25 | 63.33 | 90.59 |
| 255 | 55.05 | 90.18 | 55.05 | 90.19 | 55.05 | 90.19 | 55.05 | 90.19 | 57.74 | 90.49 |
| 253 | 56.57 | 90.06 | 56.57 | 90.06 | 56.57 | 90.06 | 56.57 | 90.06 | 61.26 | 90.28 |
| 243 | 59.95 | 89.63 | 59.95 | 89.63 | 59.95 | 89.63 | 59.95 | 89.63 | 60.45 | 89.65 |
| 228 | 59.95 | 88.78 | 59.95 | 88.78 | 59.95 | 88.78 | 59.95 | 88.78 | 59.95 | 88.78 |
| 211 | 59.95 | 87.24 | 59.95 | 87.24 | 59.95 | 87.24 | 59.95 | 87.24 | 59.95 | 87.24 |
| 210 | 61.97 | 86.99 | 61.97 | 86.99 | 61.97 | 86.99 | 61.97 | 86.99 | 61.97 | 86.99 |
| 207 | 33.56 | 73.09 | 33.56 | 73.10 | 33.56 | 73.10 | 33.56 | 73.10 | 36.55 | 74.41 |
| 200 | 40.83 | 72.82 | 40.63 | 72.83 | 40.63 | 72.83 | 40.63 | 72.83 | 45.88 | 73.99 |
| 195 | 38.37 | 72.73 | 38.37 | 72.73 | 38.37 | 72.73 | 38.37 | 72.73 | 46.53 | 73.72 |
| 190 | 49.59 | 72.63 | 49.59 | 72.63 | 49.59 | 72.63 | 49.59 | 72.63 | 54.19 | 73.44 |
| 184 | 50.23 | 72.44 | 50.23 | 72.45 | 50.23 | 72.45 | 50.23 | 72.45 | 53.99 | 73.05 |
| 172 | 45.05 | 72.09 | 45.05 | 72.09 | 45.05 | 72.09 | 45.05 | 72.09 | 48.45 | 72.39 |
| 166 | 51.85 | 71.94 | 51.85 | 71.94 | 51.85 | 71.94 | 51.85 | 71.94 | 53.22 | 72.19 |
| 158 | 36.58 | 71.71 | 36.58 | 71.72 | 36.58 | 71.72 | 36.58 | 71.72 | 38.27 | 71.91 |
| 151 | 51.97 | 71.59 | 51.97 | 71.59 | 51.97 | 71.59 | 51.97 | 71.59 | 53.89 | 71.73 |
| 145 | 51.97 | 71.36 | 51.97 | 71.39 | 51.97 | 71.39 | 51.97 | 71.39 | 51.97 | 71.52 |
| 139 | 51.97 | 71.16 | 51.97 | 71.16 | 51.97 | 71.16 | 51.97 | 71.16 | 51.99 | 71.30 |
| 129 | 51.97 | 70.86 | 51.97 | 70.86 | 51.97 | 70.86 | 51.97 | 70.86 | 52.03 | 71.02 |
| 120 | 50.96 | 70.68 | 50.96 | 70.69 | 50.96 | 70.69 | 50.96 | 70.69 | 50.96 | 70.75 |
| 110 | 50.96 | 70.25 | 50.96 | 70.25 | 50.96 | 70.26 | 50.96 | 70.25 | 50.97 | 70.44 |
| 105 | 50.96 | 70.21 | 51.03 | 70.22 | 51.04 | 70.22 | 51.07 | 70.22 | 53.82 | 70.37 |
| 98 | 51.97 | 70.11 | 52.08 | 70.11 | 52.09 | 70.11 | 52.12 | 70.11 | 52.37 | 70.24 |
| 98 | 42.98 | 70.13 | 43.07 | 70.13 | 43.08 | 70.13 | 43.24 | 70.13 | 54.15 | 70.22 |
| 89 | 39.86 | 70.19 | 40.18 | 70.19 | 40.33 | 70.19 | 40.79 | 70.19 | 48.19 | 70.10 |
| 81 | 24.99 | 63.47 | 24.99 | 63.47 | 24.99 | 63.47 | 24.99 | 63.47 | 24.99 | 63.48 |
| 75 | 25.48 | 63.07 | 25.48 | 63.07 | 25.48 | 63.07 | 25.48 | 63.07 | 25.48 | 63.08 |
| 63 | 25.55 | 62.93 | 25.55 | 62.93 | 25.55 | 62.93 | 25.55 | 62.93 | 25.55 | 62.94 |
| 42 | 31.70 | 51.22 | 31.70 | 51.22 | 31.70 | 51.22 | 31.70 | 51.22 | 31.70 | 51.23 |
| 28 | 29.78 | 50.38 | 29.78 | 50.37 | 29.78 | 50.37 | 29.78 | 50.37 | 29.78 | 50.39 |
| 0 | 26.06 | 49.12 | 26.06 | 49.12 | 26.06 | 49.12 | 26.06 | 49.12 | 26.06 | 49.14 |

Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

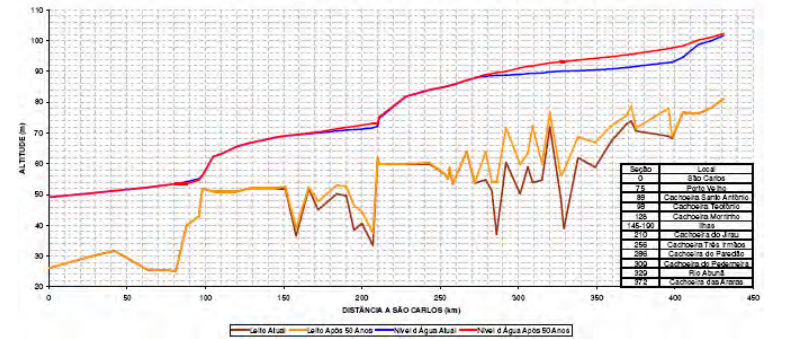
Para mostrar la influencia de la sedimentación natural, la figura 3.7 muestra los resultados de la simulación en condiciones naturales para la condición estable y la figura 3.8 para un crecimiento anual de 2% en la producción de sedimentos. Las dos figuras evidencian que habría una elevación del lecho en los tramos I y II aún si no se construyesen las represas, aunque sería de menor magnitud que con embalses.

Figura 3.7: Perfil del lecho y de la línea de agua, sin embalses y condición estable
 Simulação do Trecho em Estudo Durante 50 Anos – Caso 0 – (Condições Naturais)
 Perfil de Linha d'Água Correspondente à Vazão Média do Mês de Dezembro (17.000 m³/s)



Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

Figura 3.8: Perfil del lecho y de la línea de agua, sin embalses y condición crítica
 Condição Crítica – Simulação do Trecho em Estudo Durante 50 Anos – Caso 0 – (Condições Naturais)
 Perfil de Linha d'Água Correspondente à Vazão Média do Mês de Dezembro (17.000 m³/s)



Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

¿Qué porcentaje de la sedimentación en el tramo de estudio sería atribuible a la sedimentación natural y qué porcentaje a los embalses? Las tablas 3.9 y 3.10 proporcionan una respuesta preliminar. En el trecho I el embalse de Jirau incrementa la sedimentación en un 12% en ambos casos. En el trecho II ese embalse incrementa la sedimentación en un 42% en ambos casos. En el trecho III Jirau tiene un efecto leve y Santo Antonio un efecto grande sobre la sedimentación, lo que era de esperar. En el trecho IV aguas abajo de Santo Antonio no es posible la sedimentación. Según los autores, “no se observó tendencia a la erosión en el trecho IV, causada por la retención de sedimentos en los embalses. Debe considerarse que el modelo no representa este trecho con la misma precisión que representa los trechos II e III”.

Tabla 3.9: Capacidad de retención de arena del tramo de estudio para condición estabilizada

Capacidade de Retenção de Sedimento (areia) do rio Madeira em 50 Anos de Simulação
Condição Estabilizada (R = 0%)

| Trecho | Sem Barragens | Com Santo Antônio | Com Jirau | Com Santo Antônio e Jirau |
|--------|---------------|-------------------|-----------|---------------------------|
| I | 7% | 7% | 19% | 19% |
| II | 27% | 30% | 69% | 69% |
| III | 6% | 75% | 12% | 86% |
| IV | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 40% | 84% | 78% | 93% |

Tabla 3.10: Capacidad de retención de arena del tramo de estudio para crecimiento de 2% anual de la producción de sedimentos

Capacidade de Retenção de Sedimento (areia) do rio Madeira em 50 Anos de Simulação
Condição Crítica (R = 2%)

| Trecho | Sem Barragens | Com Santo Antônio | Com Jirau | Com Santo Antônio e Jirau |
|--------|---------------|-------------------|-----------|---------------------------|
| I | 18% | 18% | 30% | 30% |
| II | 33% | 33% | 65% | 65% |
| III | 21% | 79% | 21% | 89% |
| IV | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 57% | 88% | 80% | 97% |

Fuente: Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

¿Cuál sería la percepción pública de esos factores? ¿Sería posible convencer a los afectados por la elevación de los niveles de agua y del lecho del río en los trechos I y II, que parte de esa elevación se debe a un proceso natural? La respuesta más probable es que no. Para empezar, no existen mediciones que sustenten los resultados de la simulación con el modelo. Los autores de los estudios solamente pueden citar algún depósito de arena o un aumento del tamaño de islas fluviales en ciertos tramos, con base en un análisis puramente cualitativo de imágenes de satélite. Solamente un programa de monitoreo de varios años, con mediciones continuas del lecho y de la sección transversal del río Madera podría aportar pruebas sólidas de que ese proceso de “sedimentación natural” existe realmente. Ese monitoreo tendría que anteceder en el tiempo a la construcción de las represas. Mientras eso suceda, el poblador

riberaño, los gobiernos locales y en este caso, el gobierno boliviano, pueden atribuir a la construcción de los embalses la inundación de su territorio y todos los demás impactos asociados a la sedimentación del lecho y elevación del nivel del agua.

Algunos de esos impactos, que fueron descritos en el capítulo 2, se verán intensificados por la sedimentación. Por ejemplo, los impactos sobre la calidad de agua de los afluentes del trecho I, incluyendo el río Abuná, que no fue considerado en los estudios de factibilidad. La

Otro aspecto que se observa en las figuras 3.7 y 3.8 y las tablas 3.9 y 3.10 es la fuerte influencia de la tasa de crecimiento de la producción de sedimentos. La sedimentación para un crecimiento nulo ($R=0\%$) es considerablemente más baja que para un crecimiento de 2% anual. Los resultados también están influenciados por los modelos utilizados: HEC-RAS en el estudio de remanso y HEC6 en el de hidrosedimentología. Las figuras 3.5 y 3.6 muestran que los niveles de agua estimados para el año 0 no son iguales en ambos casos.

Según las tablas 3.9 y 3.10, entre el 93 y 97% de la arena que transporta el río Madera sería retenido en el tramo de estudio durante los 50 años de simulación. En cambio, prácticamente todo el material fino (limo y arcilla) pasaría aguas abajo. Sin embargo, el EIA estima que la arena representa 12% del sedimento total transportado por el río, un valor considerablemente más alto que el 6% estimado en los estudios de factibilidad (tabla 3.3).

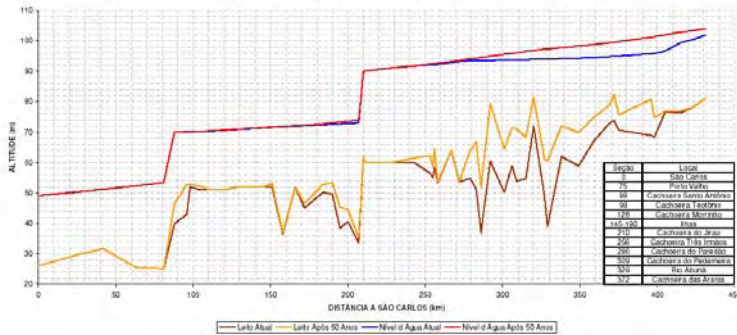
La tabla 3.8 muestra que el proceso de sedimentación continuará aún después de los 50 años. Esto contradice los resultados de los estudios de factibilidad (tablas 3.4 y 3.5), que indicaban que la eficiencia de retención de sedimento de los dos embalses alcanzaría un valor de 0 antes de los 50 años, que así conservarían indefinidamente cierta capacidad de almacenamiento. El capítulo de sedimentología no incluye datos explícitos sobre el volumen depositado al cabo de 50 años, por lo que no fue posible comparar este aspecto entre los dos estudios.

Por otro lado, “el modelo HEC-6 indicó que los depósitos de sedimentos se formarán en el trecho superior del embalse de Jirau. No se espera que los depósitos alcancen la represa en 50 años, por lo que la operación de las turbinas no se verá afectada. La figura 3.6 muestra que el perfil del lecho no sufre alteraciones entre las secciones 210 (represa de Jirau) y 243 (7 km aguas debajo de la isla Três Irmãos). En el embalse de Santo Antonio sí se espera deposición de sedimentos junto a la represa, particularmente en el trecho aguas debajo de la cachuela de Teotônio” (Furnas et al, 2005).

La mayor elevación del lecho y de los niveles de agua se produciría para el caso de mantener el nivel de operación del embalse de Jirau en la cota 90.0. La figura 3.9 muestra el perfil para este caso. Se destaca que los niveles en los trechos I y II son solamente un poco más altos que para un nivel de operación de 87.0.

Finalmente, los autores mencionan que cabe esperar resultados diferentes si se construyen las otras represas del Complejo Hidroeléctrico Madera, situadas aguas arriba de Jirau: la represa binacional de Guajara-Mirim y la de Cachuela Esperanza (ver figura 1.5). La construcción de estas represas reduciría la sedimentación en los embalses Jirau y Santo Antonio.

Figura 3.9: Perfil del lecho y de la línea de agua para el caso 2-90-C
 Condición Crítica – Simulação Durante 50 Anos – Caso 2-90 – Após a Construção dos Dois Aproveitamentos
 (Jirau na El. 90,00 m)
 Perfil de Linha d'Água Correspondente à Vazão Média do Mês de Dezembro (17.000 m³/s)



3.4 CONCLUSIONES

El estudio hidrosedimentológico que forma parte de los Estudios de Impacto Ambiental (Furnas et al, 2005) representa un considerable avance con respecto a los estudios de factibilidad. El estudio muestra la gran importancia de los sedimentos en la evaluación de los niveles de agua, vida útil, impactos ambientales e incluso costo de la energía generada. Pero casi tan importante como lo anterior es que el estudio de hidrosedimentología no se limitó al tramo Abuná-Santo Antonio, sino se extendió varios kilómetros arriba y abajo. Esto marca una gran diferencia con los estudios de factibilidad, que convirtieron al criterio de “no inundación de territorio boliviano” en un prejuicio que influyó en los resultados. Incluso en los estudios de impacto ambiental predominó esa visión de un área de influencia limitada al tramo Abuná-Porto Velho, que ignora a la cuenca hidrográfica. Desafortunadamente el EIA prácticamente no tomó en cuenta los resultados de la modelación hidrosedimentológica.

Incluso las limitaciones mencionadas por los autores del estudio, en cuanto a falta de mediciones de caudal sólido, de datos topográficos y las simplificaciones metodológicas utilizadas en la modelación, son un aporte al identificar vacíos y sugerir tareas futuras. Se recomienda “una utilización más cualitativa de los resultados de la modelación, valorizando más las tendencias observadas y menos las evaluaciones cuantitativas generadas por el modelo, de modo de situar claramente el nivel de precisión y orientar la búsqueda de datos complementarios que permitan el empleo futuro de metodologías más profundas”.

Debe tomarse en cuenta que los mismos autores indican que el estudio hidrosedimentológico corresponde a una primera etapa, “realizada en base a los datos y levantamientos disponibles, llevados a cabo por el Inventario Hidroeléctrico del río Madera y los Estudios de Viabilidad,

cuyo objetivo era la caracterización hidráulica y sedimentológica general del tramo de interés, empleando herramientas compatibles con la información disponible”.

En ese marco se puede concluir lo siguiente:

- El río Madera es el principal afluente del Amazonas, tanto por caudal sólido como por caudal líquido. Es un río de “aguas blancas”, cuya carga de sedimentos y de materias disueltas tiene origen predominantemente andino. Estas características lo diferencian de otros grandes ríos amazónicos, tanto desde el punto de vista hidrológico como biológico.
- La enorme carga de sedimentos transportada por el río Madera, obliga a que los procesos de sedimentación y erosión, sean considerados tanto en el diseño de ingeniería de las obras como en el estudio de impacto ambiental. Eso no ocurrió con los estudios de factibilidad/viabilidad.
- Debido a los procesos de sedimentación, el tramo del río Madera afectado por el embalse de Jirau será considerablemente más largo que lo previsto inicialmente en los estudios de factibilidad y de inventario. Contrariamente a lo que afirman esos estudios, el tramo afectado incluirá el sector binacional aguas arriba de Abuná.
- El proceso de sedimentación será especialmente activo en el tramo superior del embalse de Jirau, donde cabe esperar que los niveles del lecho y del agua suban varios metros con respecto a la situación actual. Una de las consecuencias es que la superficie efectiva del embalse de Jirau será más grande que la calculada en los estudios de factibilidad. No fue posible calcular el posible incremento del área inundada por falta de datos topográficos del tramo aguas arriba de Abuná.
- Sin embargo, la sedimentación será un proceso gradual que se desarrollará a lo largo de varios años, lo que también es válido para los efectos sobre el nivel del agua. Es posible que exista el proceso de “sedimentación natural” que identifica la modelación hidrosedimentológica, pero las pruebas de ese proceso sólo pueden provenir de un programa de monitoreo de varios años de duración, que debería anteceder en el tiempo a la construcción de las represas.
- La elevación del lecho y del nivel del agua afectará a los afluentes del río Madera en el tramo entre las cachuelas de Ribeirão y Jirau. Debe prestarse especial atención al río Abuná, que es el afluente de mayor caudal. El curso de este río no fue considerado en los estudios de factibilidad y es binacional.
- La operación del embalse de Jirau con nivel variable incrementa el costo de la energía producida. Como la principal razón de ese tipo de operación fue la no inundación de territorio boliviano, cabe preguntarse cuál será la alternativa que propondrán los impulsores del proyecto para contrarrestar la elevación del nivel de agua producida por la sedimentación.

- El estudio de modelación hidrosedimentológica, aún reconociendo su carácter preliminar y cualitativo, amplía considerablemente el área de estudio y proporciona datos que deben ser tomados en la evaluación de impactos y en las etapas posteriores. Además ayuda a ampliar la visión sobre el área afectada, hasta ahora restringida al tramo del río Madera entre Abuná y Porto Velho.

El tema de la sedimentación causada por los embalses deja varias interrogantes y tareas a futuro. Los mismos autores del estudio hidrosedimentológico proponen una segunda etapa de levantamientos topobatimétricos y perfiles longitudinales, así como mediciones de descarga líquida y sólida, incluyendo mediciones de descarga sólida en algunos afluentes importantes, como es el caso del río Abuná y los ríos Mutum-Paraná y Jaci-Paraná. Posteriormente una tercera etapa debería caracterizar los procesos fluviales de manera más precisa, empleando un modelo hidrodinámico acoplado al modelo de transporte de sedimento, a ser desarrollados en base a los datos recolectados.

Es necesario que los resultados obtenidos hasta ahora sean incorporados efectivamente a los estudios de factibilidad/viabilidad y a los de impacto ambiental, porque está claro que podrían afectar incluso la viabilidad económica y ambiental de los emprendimientos.

AGRADECIMIENTOS

A Glenn Switkes, de International Rivers Network, quien obtuvo y proporcionó la información sobre los estudios de factibilidad e impacto ambiental, que sirvió de base al presente análisis. Agradezco también todo su apoyo y el haberme brindado la oportunidad de conocer la hermosa región del Madera.

A Patricia Molina del Foro Boliviano de Medio Ambiente y Desarrollo, quien despertó mi interés por el proyecto.

REFERENCIAS

Angulo, G., Al Mar por las Hidrovías de la Integración Sudamericana

Guyot, J.L., Quintanilla, J., Cortés, J & Filizola, N. 1995. Les flux de matières dissoutes et particulaires des Andes de Bolivie vers le río Madeira en Amazonie Brésilienne. En Memorias del Seminario Internacional de Aguas Glaciares y Cambios climáticos en los Andes Tropicales.

PCE-Projetos e Consultorias de Engenharia, Furnas Centrais Elétricas SA y CNO-Constructora Noberto Odebrecht SA, 2002. Inventário Hidrelétrico do rio Madeira, trecho Porto Velho – Abunã, relatório final. Noviembre 2002.

PCE, Furnas, Odebrecht, 2004. Complexo hidrelétrico do rio Madeira, Estudos de Viabilidade do AHE Jirau, nov. 2004, Brasil.

PCE, Furnas, Odebrecht, 2004. Complexo hidrelétrico do rio Madeira, Estudos de Viabilidade do AHE Santo Antônio, nov. 2004, Brasil.