



Institut de Recherche pour le Développement (IRD, Francia)
Instituto de Hidrología e Hidráulica - Universidad mayor de San Andrés (La Paz)
Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos - Universidad Mayor de San Simón
(Cochabamba)

Evaluación preliminar de impactos del complejo hidroeléctrico del río Madera en el Norte Amazónico Boliviano

Marc Pouilly, coordinador

Leslie Córdova

Jean-Michel Martínez

Laurence Maurice

Jorge Molina

Alex Ovando

Agosto 2008

Con el apoyo de WWF Bolivia



Índice

RESUMEN DE CONCLUSIONES.....	1
I. INTRODUCCIÓN. ACERCA DE LOS IMPACTOS POTENCIALES DE LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS EN EL RÍO MADERA.....	5
I.1 DESARROLLO SOSTENIBLE Y REPRESAS	5
I.2 LOS IMPACTOS POTENCIALES DE LAS REPRESAS Y SU EVALUACIÓN	6
I.3 CUÁLES SON LOS IMPACTOS POTENCIALES POR LAS REPRESAS EN EL NORTE AMAZÓNICO BOLIVIANO?	9
I.4 PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO	13
I.5 BIBLIOGRAFÍA.....	14
II –MODELIZACIÓN HIDRÁULICA LONGITUDINAL Y SEDIMENTACIÓN.....	15
II.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA E HIDROLÓGICA DEL RIO MADERA	15
II.2 REMANSO HIDRÁULICO	20
II.2.1 Condiciones naturales	20
II.2.2 Efecto de remanso de los embalses	23
II.3 SEDIMENTACIÓN	28
II.3.1 Transporte de sedimentos.....	28
II.3.2 Sedimentación en el embalse de Jirau	29
II.4 CONCLUSIONES.....	36
II.4.1 Sobre el efecto de remanso hidráulico de las represas	36
II.4.2 Sobre el efecto de sedimentación inducido por el embalse de jirau	37
II.5 REFERENCIAS	39
III - EVALUACIÓN DE LAS LLANURAS DE INUNDACIÓN POR TELEDETECCIÓN	41
III.1 INTRODUCCIÓN.....	41
III.2 ÁREA DE ESTUDIO	41
III.3 MÉTODO.....	42
III.4 CICLO HIDROLÓGICO	44
III.5 RESPUESTAS ESPECTRALES EN LAS ÁREAS INUNDADAS	46
III.6 COBERTURA Y EXTENSIÓN DE LAS INUNDACIONES.....	48
III.7 DINÁMICA DE LAS INUNDACIONES	50
III.9 VARIACIONES EN LA EXTENSIÓN Y DINÁMICA DE LAS INUNDACIONES (ESCENARIO CON PROYECTO)	55
III.10 CONCLUSIONES	58
III.11 REFERENCIAS	59
IV – POTENCIALES IMPACTOS INDIRECTOS DE LAS REPRESAS DEL RÍO MADERA. UNA COMPARACIÓN CON LAS REPRESAS HIDROELÉCTRICAS EN SUD AMÉRICA.	61
IV-1. INTRODUCCIÓN	61
IV-2. ENTORNO REGIONAL DE LAS GRANDES REPRESAS EN SUD AMÉRICA	62
IV. 2- MÉTODO DE COMPARACIÓN ENTRE CONDICIONES AMBIENTALES E IMPACTOS OBSERVADOS.....	65
IV. 3- EL CASO DE LA REPRESAS DEL MADERA ACERCA DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS INDIRECTOS OBSERVADOS EN SUD AMÉRICA	66

<i>IV. 3.1- Emisión de gas</i>	68
<i>IV. 3.2- Área de inundación de bosque</i>	72
<i>IV. 3.3- Ictiofauna</i>	75
<i>IV. 3.4- Malaria</i>	76
<i>IV. 3.5- Mercurio</i>	79
V.1- MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS REPRESAS DEL RÍO MADERA	90
V.2 - GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS MINIMIZANDO LOS IMPACTOS NEGATIVOS	92

Índice de figuras

FIGURA I 1 : PRINCIPALES RÍOS Y EXTENSIÓN DE LAS ZONAS DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA AMAZÓNICA. EXTRAÍDO DE MARTÍNEZ & LE TOAN 2007.	10
FIGURA I 2: PERFIL DE PENDIENTE (EN MM.M-1) DEL RÍO MAMORÉ ENTRE PUERTO VILLAROEY Y PUERTO AVAROA, CONFLUENCIA CON EL RÍO ITÉNEZ. EXTRAÍDO DE CHARRIÈRE ET AL. 2004.	11
FIGURA I 3: NIVELES DE AGUA EN LOS RÍOS MAMORÉ E IBARÉ CERCA DE TRINIDAD EN LA LLANURA DE INUNDACIÓN DEL BENI (BOLIVIA) DE ENERO 1998 A DICIEMBRE 2000. EXTRAÍDO DE POUILLY ET AL. 2004.	11
FIGURA I 4: LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS CUATRO REPRESAS DEL PROYECTO DE APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO DEL RÍO MADERA. EL NOMBRE DE AHE GUAJARÁ MIRIM A CAMBIADO POR EL DE RIBERÃO. (EXTRAÍDO DE EIA ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS SANTO ANTÔNIO E JIRAU).	12
FIGURA II 1: CACHUELA RIBERÃO	16
FIGURA II 2. CACHUELAS DEL TRAMO GUAYARAMERÍN-PORTO VELHO	19
FIGURA II 3. PERFIL HIDRÁULICO Y DEL LECHO DEL RÍO MADERA ENTRE SANTO ANTONIO (81) Y JIRAU AGUAS ABAJO (207).....	21
FIGURA II 4. PERFIL HIDRÁULICO ENTRE SECCIONES DE JIRAU AGUAS ABAJO (207) Y CACHUELA MADERA AGUAS ABAJO (418.1).....	21
FIGURA II 5. RÍO MADERA EN CAPITANÍA DE PUERTO MANOA, 31/8/07	22
FIGURA II 6. RÍO MADERA EN CAPITANÍA DE PUERTO MANOA, 17/03/08	23
FIGURA II 7. PERFIL DE LA LÍNEA DE AGUA ENTRE JIRAU (210) Y CACHUELA MADERA AGUAS ABAJO (418.1).....	25
FIGURA II 8. VELOCIDAD (M/S) ENTRE JIRAU (210) Y CACHUELA MADERA (418.1)	26
FIGURA II 9. RÍO MADERA EN ABUNÁ-VILA (SECCIÓN 338).....	27
FIGURA II 10. CURVAS GRANULOMÉTRICAS MEDIAS DEL LECHO DEL RÍO MADERA EN PORTO VELHO	29
FIGURA II 11. NIVEL DEL LECHO DEL TRAMO JIRAU-RIBERÃO PARA DIFERENTES PERIODOS, CASO N-NV.....	31
FIGURA II 12. NIVEL DEL LECHO PARA 0 Y 80 AÑOS Y NIVEL DEL AGUA NA PARA DIFERENTES CAUDALES.....	32
FIGURA II 13. EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE AGUA DEL RÍO MADERA EN ABUNÁ-VILA (SECCIÓN 338) DESPUÉS DE LA INSTALACIÓN DE LA CENTRAL DE JIRAU	35
FIGURA III 1. COBERTURA DE ESTUDIO Y SUBCUENCAS	42
FIGURA III 2. LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES LIMNIMÉTRICAS Y ESTACIONES VIRTUALES (ENVISAT)	44
FIGURA III 3 VARIACIÓN ANUAL DEL NIVEL DE AGUA EN DIFERENTES RÍOS DATOS ALTIMÉTRICOS (ENVISAT).....	45
FIGURA III 4. VARIACIÓN ANUAL DEL NIVEL DE AGUA RÍOS ABUNA Y MADERA.....	46
FIGURA III 5. VARIACIONES DEL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN A LO LARGO DE LA SERIE TIEMPO PARA DIFERENTES UNIDADES DE TERRENO.	47
FIGURA III 6. VARIACIONES DEL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN A LO LARGO DE LA SERIE TEMPORAL PARA UNIDADES DE BOSQUE INUNDADO EN DIFERENTES RÍOS	48
FIGURA III 7. MAPA COBERTURA Y EXTENSIÓN DE LAS INUNDACIONES	49
FIGURA III 8. DINÁMICA DE INUNDACIONES	51
FIGURA III 9. ÁREA INUNDADA POR SUBCUENCA EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	52
FIGURA III 10. NIVEL DE AGUA RIO MADERA VS. ÁREA INUNDADA EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	53
FIGURA III 11. NIVEL DE AGUA VS. ÁREA INUNDADA (SUBCUENCA ABUNA)	53
FIGURA III 12. NIVEL DE AGUA VS. ÁREA INUNDADA (SUBCUENCA MAMORE).....	54
FIGURA III 13. NIVEL DE AGUA VS. ÁREA INUNDADA (SUBCUENCA ITENEZ)	54
FIGURA III 14. ÁREAS INUNDADAS POR LOS PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS.....	56

Evaluación preliminar de impactos del complejo hidroeléctrico del río Madera - IV

FIGURA III 15. EJEMPLO DE POSIBLE VARIACIÓN DEL LOS NIVELES DE AGUA Y SU RELACIÓN CON EL ÁREA INUNDADA EN LA SUBCUENCA MAMORÉ	57
FIGURA IV 1. ECOREGIONES DEL MUNDO, HIDROECOREGION TROPICAL Y RÍOS SUBTROPICALES DE PLANALTO PARA LAS REPRESAS MODELO DE SUD AMÉRICA (FUENTE: WWW.FEOW.ORG.) LA CUENCA AMAZÓNICA ESTA DIVIDA ENTRE LAS PRINCIPALES ECOREGIONES DE RÍOS ALTO AMAZÓNICOS TROPICALES, SUBTROPICALES Y RÍO DE PLANICIE, HUMEDALES TROPICALES Y SUBTROPICALES.	63
FIGURA IV 2. REPRESAS HIDROELÉCTRICAS FORMANDO UN COMPLEJO SOBRE EL RIO SAN FRANCISCO (BRASIL).....	69
FIGURA IV 3. ÁREA DE INUNDACIÓN VS. EMISIÓN DE CO₂ KG/DÍA EN LAS REPRESAS MODELO DE SUD AMÉRICA.	71
FIGURA IV 4. ÁREA DE INUNDACIÓN VS. EMISIÓN DE CH₄ KG/DÍA EN LAS REPRESAS MODELO DE SUD AMÉRICA.	72
FIGURA IV 5. ÁREA DE INUNDACIÓN, PERDIDA DE FLORESTA EN REPRESAS MODELO Y CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA, EN REPRESAS MODELO DE SUD AMÉRICA.	73
FIGURA IV 6. MAPA CON ÁREAS DE VEGETACIÓN CON VALOR ECONÓMICO RODEANDO LOS POSIBLES RÍOS QUE SERÁN AFECTADOS EN EL NORTE AMAZÓNICO DE BOLIVIA.	74
FIGURA IV 7. EFECTOS DEL ÁREA DE INUNDACIÓN SOBRE LOS PECES EN REPRESAS MODELO EN SURAMÉRICA.	76
FIGURA IV 8. ZONAS DE MALARIA EN BRASIL	77
FIGURA IV 9. SITUACIÓN EPIDEMIOLÓGICA DE MALARIA EN BOLIVIA GESTIÓN 2007 (FUENTE: MINISTERIO DE SALUD Y DEPORTES, UNIDAD NACIONAL DE EPIDEMIOLOGÍA). LAS REPRESAS DEL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO DEL RÍO MADERA ESTÁN PROYECTADAS EN LAS ZONAS DE MAYOR ENDEMISMO, GENERANDO UNA SITUACIÓN MUY SENSIBLE Y DE ALTO RIESGO.	78
FIGURA IV 10. CASOS DE MALARIA EN EL NORTE AMAZÓNICO DE BOLIVIA (FUENTE: MINISTERIO DE SALUD Y DEPORTES UNIDAD NACIONAL DE EPIDEMIOLOGÍA)	79
FIGURA IV 11: CARGA SEDIMENTARIA DE LOS GRANDES RÍOS DE LA AMAZONIA BOLIVIANA. FUENTE J. MOLINA / IRD-HYBAM.	82
FIGURA IV 12. CONTROL HIDROLÓGICO DE LAS CONCENTRACIONES EN Hg TOTAL (NG/L) EN LAS AGUAS DE SUPERFICIE DEL RÍO BENI (MAURICE BOURGOIN, 2001).	83
FIGURA IV 13- BALANCEO DE SEDIMENTOS Y DE MERCURIO EN EL RÍO BENI. FUENTE: IRD/HYBAM	83
FIGURA IV 14. EVOLUCIÓN TEMPORAL (1900-2000) DE LAS CONCENTRACIONES DE MERCURIO EN EL RÍO BENI. LOS VALORES CORRESPONDEN A LOS VALORES OBSERVADOS DIVIDIDOS POR LOS VALORES ESPERADOS EN RELACIÓN A LA CANTIDAD DE ARCILLA CONTENIDO EN TESTIGOS DE SEDIMENTOS DE LOS RÍOS MAMORÉ Y BENI (MAURICE-BOURGOIN ET AL. 2004).	84
FIGURA IV 15. CONCENTRACIONES DE MERCURIO OBSERVADOS EN LOS CABELLOS DE POBLADORES RIBEREÑOS DE LA CUENCA DEL RÍO MADERA (BARBERI 2006).	85

Índice de tablas

<i>TABLA I 1: LISTA NO EXHAUSTIVA DE CRITERIOS AMBIENTALES PARA LA SELECCIÓN DE SITIOS FAVORABLES O DESFAVORABLES A LA CONSTRUCCIÓN DE UNA REPRESA. FUENTE: LEDEC & QUINTERO (2003).</i>	<i>9</i>
<i>TABLA II 1. CAUDALES MEDIOS MENSUALES DE LOS RÍOS MAMORÉ Y MADERA:</i>	<i>17</i>
<i>TABLA II 2: ESTADÍSTICA DE CAUDALES MÁXIMOS ANUALES EN PORTO VELHO</i>	<i>18</i>
<i>TABLA II 3. NIVELES DE AGUA (M) JUNTO A LA REPRESA DE JIRAU</i>	<i>24</i>
<i>TABLA II 4. NIVELES DE AGUA Y SOBRE-ELEVACIÓN EN ABUNÁ-VILA</i>	<i>26</i>
<i>TABLA II 5. CAUDAL SÓLIDO MEDIO EN SUSPENSIÓN (MILES TON/DÍA), RÍO MADERA EN PORTO VELHO</i>	<i>28</i>
<i>TABLA II 6. PERFIL HIDRÁULICO E INCREMENTO DEL NIVEL DE AGUA ENTRE JIRAU Y RIBERÃO, CONDICIÓN ACTUAL Y CON EMBALSE DE NIVEL VARIABLE, $Q = 40000 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	<i>33</i>
<i>TABLA III 1. RESUMEN DE COBERTURA Y EXTENSIÓN DE LAS INUNDACIONES POR SUBCUENCA EN EL ÁREA DE ESTUDIO</i>	<i>50</i>
<i>TABLA IV 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS GRANDES REGIONES NEOTROPICALES DE BRASIL, GUAYANA FRANCESA, URUGUAY, ARGENTINA Y BOLIVIA.</i>	<i>64</i>

Resumen de conclusiones

1_ Modelización Hidráulica longitudinal y sedimentación

¿Hasta dónde las represas afectarán la hidrología y del río?

En base a los resultados preliminares realizados sobre el impacto hidrológico del embalse de Jirau, aún sin considerar sedimentación y aplicando la curva de operación con niveles variables, se estimó que los niveles de agua y velocidades serán afectadas entre la confluencia con el río Abuná y la cachuela Riberão y muy probablemente hasta la cachuela Madera (cerca de la ciudad de Villa Bella y de la confluencia Beni y Mamoré). La sobre elevación de los niveles de agua en este tramo tendrá dos consecuencias directas:

- la disminución de la carga hidráulica y por tanto la pérdida de energía potencial del tramo binacional. Un cálculo preliminar considerando un caudal medio de 17500 m³/s en la estación de Abuná-Vila muestra que cada metro de subida del nivel de agua significa una pérdida de energía potencial bruta del orden de 170 MW y en total la pérdida de energía potencial en el tramo binacional sería del orden de 250 MW.
- un incremento de los riesgos de inundación. Por ejemplo el desborde en Puerto Manoa, situada frente a la estación hidrométrica de Abuná-Vila, se inicia con un caudal de aproximadamente 40000 m³/s. Con un nivel de operación de 90.0 m en el embalse de Jirau, el desborde se produciría con un caudal, mucho más frecuente, de solamente 35000 m³/s.

En la parte sedimentación, en condiciones naturales no se observa una tendencia a la sedimentación para el conjunto del tramo Jirau-Riberão, pero la represa de Jirau, favorecerá un proceso de sedimentación en este tramo Jirau-Riberão. Debido en parte a una baja tasa de sedimentación, el proceso de deposición inducido por el embalse de Jirau no se detendría al cabo de 20 años, como lo estimaron inicialmente los estudios de factibilidad (2004), pero continuaría más allá de los 80 años del periodo de simulación que se usó en el estudio. Como consecuencia de la sedimentación, existirá una sobre-elevación de los niveles de agua, adicional a la que provoca el embalse no sedimentado. Esa sobre-elevación será especialmente notoria en el tramo binacional arriba de la confluencia con el río Abuná.

Los resultados del análisis de remanso hidráulico para el caso de embalse no sedimentado tienen un rango de incertidumbre pequeño. Además debe destacarse

que los efectos del embalse en este caso serán evidentes desde el primer año de operación de los embalses. En cambio, los resultados del análisis de sedimentación en el embalse de Jirau tienen todavía un grado de incertidumbre más grande, debido a la calidad de la información de entrada. Sin embargo, los resultados obtenidos con la modelación son consistentes, incluyendo las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad. Es decir, existe una alta probabilidad de que las predicciones del análisis sean válidas, al menos cualitativamente. A diferencia del caso anterior, el efecto sobre los niveles de agua será gradual en el tiempo.

2_ Modelación hidrológica lateral

¿Hasta dónde las represas afectarán la llanura de inundación?

El método aplicado, basado en el procesamiento y análisis de una serie temporal de imágenes radar ALOS PALSAR recientes (2006-2008), demuestra su potencial para monitorear e identificar áreas de inundación independientemente de la cobertura vegetal existente y poder relacionarlas a las variaciones de los niveles de agua en los ríos.

Se ha logrado identificar que las áreas susceptibles a inundaciones, en el escenario actual (sin proyectos), representan una extensión considerable en cada una de las subcuencas contempladas en el área de estudio y que las inundaciones se propagan, en proporción directa a la subida de niveles de los ríos, hasta varios kilómetros en dirección lateral a ambas orillas.

Esta caracterización inicial, demuestra que las alteraciones al curso natural de las aguas a raíz de la implementación de los proyectos hidroeléctricos, significaría potenciales cambios en la extensión de las inundaciones temporales y en la dinámica de las mismas. Hasta el momento se ha identificado que el efecto de remanso hidráulico debido a las represas de Jirau, alcanzaría al tramo binacional del río Madera, pero el alcance del remanso hidráulico que originarían las represas Riberao y Cachuela Esperanza no ha sido estudiado aún debido a la carencia de estudios preliminares detallados de estos.

En lo que se refiere a las inundaciones, nuestros resultados demuestran que el enfoque para la evaluación de los impactos potenciales de las represas proyectadas no debe limitarse al área del embalse. Los impactos sobre las extensas áreas inundadas, que tienen una diversidad de formaciones vegetales y ecosistemas, debe ser incluida. A fin de optimizar la precisión y los alcances del método utilizado en este trabajo, es necesario tomar en cuenta las siguientes

consideraciones: i) la red de estaciones limnimétricas actual puede ser optimizada a fin de tener más información sobre las variaciones de los niveles de los ríos en función a los potenciales impactos de las represas (ubicación de reglas de medición en sitios clave) ii) información altimétrica satelital de estaciones virtuales adecuadamente distribuidas sería de gran utilidad y complemento a la red de estaciones limnimétricas iii) información topográfica en escala apropiada permitiría la modelación de los planos de inundación (de los futuros reservorios) de manera precisa iv) la ampliación de la serie temporal de imágenes radar ALOS PALSAR permitirá ampliar el conocimiento de la dinámica de inundaciones, asimismo validaciones en campo brindarán mayor precisión en la clasificación de las imágenes.

3- Evaluación de los impactos indirectos

¿Cuales impactos se puede esperar y con qué magnitud?

El análisis de comparación de las condiciones ambientales y de los impactos directos e indirectos que se han producido en 11 represas tropicales de Sud América demuestran un panorama complejo, necesitando todavía una interpretación más completa. Esa interpretación es debilitada debido a que la información que existe no se encuentra fácilmente accesible. Un trabajo a más largo plazo podría plantear una sistematización de la información gris no divulgada y disponible solo localmente sobre los principales temas de impactos (salud, emisión de gases, pérdida biodiversidad, etc.) a nivel de la zona tropical de Suramérica para generar una línea base de evaluación de impactos más eficiente y pertinente.

Sin embargo aunque no existe una evaluación ambiental detallada del proyecto de complejo hidroeléctrico del río Madera por el Norte Amazónico boliviano, nuestro análisis muestra que en los principales temas de impactos indirectos esa región presenta una situación sensible (emisión de gases de efecto invernadero, ictiofauna, pérdida de bosque y de las actividades de aprovechamiento de los recursos silvestres) y veces crítica como en el caso de los impactos que pueden afectar la salud humana (mercurio y malaria). Los datos actualmente disponibles no permiten evaluar la magnitud de estos impactos y por lo tanto recomendamos que se incentive y realice a corto plazo estudios que permitirán una evaluación más precisa y global del proyecto de complejo hidroeléctrico del río Madera enfocando en especial en la parte boliviana.

I. Introducción. Acerca de los impactos potenciales de la construcción de represas en el río Madera

Marc Pouilly

I.1 Desarrollo sostenible y represas

El control del recurso agua mediante represas es una opción importante para el desarrollo, no solamente por la producción energética sino también para facilitar el abastecimiento de agua (potable, industrial, agrícola) y el control de los efectos negativos de las grandes inundaciones. Bolivia se beneficia de una gran diversidad de climas, relieves y paisajes que fundamentan su importante potencial hídrico e hidroeléctrico tanto en las pequeñas cuencas alto-andinas con elevada pendiente, donde se puede generar grandes caídas artificiales de agua, como en los grandes ríos amazónicos con poca pendiente pero con enormes caudales.

Las actividades humanas de desarrollo generan generalmente impactos negativos sobre el ambiente. En este marco, las represas son una herramienta de apoyo para un desarrollo sostenible y “limpio” que permiten un mejor aprovechamiento del recurso agua y también tienen el potencial de minimizar los efectos negativos del desarrollo sobre el ambiente y la salud humana. En particular los impactos negativos de las represas pueden parecer menores a los generados por los tipos convencionales de producción de energía como las plantas térmicas. Las principales ventajas a favor de la hidroelectricidad son el uso de un recurso renovable, una menor tasa de emisión de gases que agravan el efecto invernadero y de partículas atmosféricas o líquidas susceptibles a alterar la calidad del aire o de las aguas (superficiales y/o subterráneas).

Esa visión positiva debe ser modulada y no todas las represas pueden beneficiarse de una aprobación general en relación con las ventajas mencionadas. De hecho, sí bien existen represas que todavía siguen dando servicio a más de 2000 años de su construcción, en varios países se han destruido represas después de un análisis profundo de la relación costo-beneficio. Por ejemplo, Lerner (2006) cuestiona las ventajas del complejo de represas ubicado en el río San Francisco en Brasil, argumentando que los beneficios obtenidos por las

represas (producción de energía y regulación de inundación) están afectados por los impactos generados (emisión de gas en particular).

Frente a las crecientes preocupaciones y polémicas acerca de los impactos de las represas, se conformó una Comisión Mundial de Represas (CMR, World Dams Commission en inglés) con el objetivo de realizar una síntesis de la eficacia de las grandes represas para el desarrollo y evaluar alternativas para la gestión de los recursos hídricos (WDC, 2000). Las principales conclusiones de este amplio trabajo fueron el de recalcar el importante rol de las represas para el desarrollo humano pero considerando que en muchos casos han generado un costo *“inaceptable y a menudo innecesario en especial en términos sociales y ambientales.”* (WDC, 2000). Siguiendo las recomendaciones de esta comisión las grandes instituciones que apoyan este tipo de construcciones de alta inversión (BID, Banco Mundial, FMI) modificaron desde entonces los criterios de selección de los proyectos para asegurar una mejor planificación. En la actualidad bajo el marco del desarrollo sostenible la implantación de una represa debe proyectarse tomando en cuenta los aspectos económicos, sociales, culturales y ambientales y considerando los beneficios del proyecto en relación a los obtenidos con otras alternativas.

I.2 Los impactos potenciales de las represas y su evaluación

En contrapeso de la serie de beneficios que pueden motivar la construcción de una represa (producción de energía, mejoramiento de la capacidad industrial, agrícola, de transporte y mejoramiento de la salud pública por el abastecimiento en agua potable), los impactos negativos locales derivados de una represa pueden ser clasificados en tres tipos:

- *Los impactos directos*, que corresponden a los cambios físicos tal como el largo del tramo afectado, la superficie de inundación, el volumen del agua embalsada, la variación estacional de los ciclos hidrológicos, el aumento de la tasa sedimentación en el embalse y de la tasa de erosión río abajo. Generalmente estos impactos se evalúan en el embalse y río abajo de la represa.
- *Los impactos indirectos de primer orden*, que se generan directamente como consecuencia del cambio del ámbito físico y pueden afectar a los compartimentos biológicos (cambio de composición y de producción en las

comunidades vegetales y animales) y sociales (migración de poblaciones humanas por inundación), etc.

- *Los impactos indirectos de segundo orden*, que se desarrollan como consecuencia de los precedentes y afectan principalmente al desarrollo de las comunidades humanas por la pérdida de instrumentos económicos (pesca, agricultura) y problemas de salud pública (contaminación por mercurio, calidad de agua, aparición de enfermedad como la malaria, etc.).

Los cambios directos son previsible y pueden evaluarse al momento de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) sobre la base de un conocimiento básico de la topografía y batimetría del río, de la carga sedimentaria del agua y del ciclo hidrológico. Los impactos indirectos, por ser complejos y depender de muchos factores, son difíciles de cuantificar y se debe reconocer que las herramientas de evaluación de este tipo de impactos no están actualmente lo suficiente desarrolladas como para aportar una respuesta definitiva. La CMR atribuye esta situación a los insuficientes esfuerzos realizados para entender el funcionamiento de los ecosistemas y el alcance y naturaleza de sus impactos (WDC, 2000 p. 76). Más allá de esta crítica general debemos notar que, además de la falta de herramientas estandarizadas para la evaluación de los impactos indirectos, el mayor problema viene del tiempo dedicado a la evaluación ambiental. En el caso del río Madera, las primeras observaciones y recomendaciones sobre el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico se hicieron en el año 1970; sin embargo los primeros estudios ambientales se realizaron en el año 2005, cuando ya el proyecto estaba en fase de decisión. Muchos de los procesos ecológicos que garantizan el equilibrio de un sistema se desarrollan a una escala de tiempo superior a la década. Los estudios que se realizan a escala más corta observan en primer orden la variabilidad anual y no siempre pueden concluir sobre el proceso principal. Por lo tanto consideramos que la falta de anticipación es seguramente, en muchos casos la primera causa de la debilidad de los estudios ambientales. Otro factor de explicación de esa debilidad proviene de la no difusión de los estudios que por su gran mayoría se queda en forma de literatura gris de difícil alcance, aunque, debido a la gran importancia del debate público sobre los impactos de las represas, es más que probable que exista esa información. Un trabajo podría plantear una sistematización la información no divulgada sobre los principales temas de impactos (salud, emisión de gases, pérdida biodiversidad, etc.) para generar una línea base de evaluación de impactos más eficiente y pertinente.

Las experiencias internacionales sobre las represas existentes permiten definir a grandes rasgos los impactos potenciales y las situaciones que les generan. A

continuación presentamos las posibles situaciones que se presentarían en el caso del río Madera:

- *Alta carga sedimentaria:* los procesos de sedimentación y erosión son la causa de un equilibrio dinámico de la morfología de un río. La represa genera una reducción de las velocidades de corrientes favorable a una mayor tasa de sedimentación en el embalse. Los efectos concretos de este proceso son:

- el relleno del embalse que pierde paulatinamente una parte del volumen útil de retención de agua, hasta perderlo totalmente.

- la movilización de partículas de metales pesados, como el mercurio (capítulo IV), pudiendo generar contaminación.

- el aumento de los procesos erosivos río abajo que pueden afectar de forma irreversible la morfología del río (pérdida de la llanura de inundación, hundimiento del canal principal, desestabilización de las orillas).

- *Ausencia de relieve y alto nivel de productividad (situación eutrófica):* para obtener un mismo volumen de agua, la ausencia de relieve se traduce por una mayor extensión de la inundación mayor y un embalse de menor profundidad donde los procesos biológicos reproducción primaria o de degradación de la materia orgánica van a ser más eficientes. Esa configuración asociada al alto nivel de productividad característica de la zona va a generar una situación favorable a una eutrofización del sistema, más favorable al desarrollo de enfermedades y a una disminución de la calidad de agua.

- *Presencia de bosque y capa de vegetación:* La vegetación natural de la zona que se inunda, aumenta la actividad biológica de degradación de la materia orgánica lo que se traduce por una desoxigenación del agua que se vuelve inhóspita para la vida silvestre.

- *Alta densidad poblacional:* La alta densidad poblacional aumenta la magnitud de los impactos de salud pero también la magnitud de los impactos sociales (por desplazamiento de población) y económicos (por afectación o pérdida de herramientas).

- *Serie múltiple de represas:* Se ha demostrado que la construcción en serie de represas sobre una misma cuenca aumenta la magnitud de los impactos acerca de la retención de sedimentos, en el corte de migración de organismos como los peces y genera un efecto acumulativo en la emisión de gases.

Uno de los puntos más importantes en la reciente evolución de las prácticas de evaluación ambiental de los proyectos es la necesidad de evaluar alternativas al proyecto para permitir elegir entre diferentes soluciones técnicas la que puede permitir alcanzar los objetivos de desarrollo planteado minimizando los impactos. Este último punto es una de las componentes de la Evaluación Ambiental como definido por el Banco Mundial (1999). Ledec & Quintero (2003) consideran de manera general que la medida de mitigación la más eficiente debe considerarse como el proceso de selección de sitio para asegurar que la represa tendrá lo menos de impacto posible. Al respecto estos autores dan una lista de criterios que se pueden proponer como la base de una evaluación y de comparación entre proyectos alternativos (Tabla I.1), complementaria a los seis criterios mencionados previamente.

Tabla I 1: Lista no exhaustiva de criterios ambientales para la selección de sitios favorables o desfavorables a la construcción de una represa. Fuente: Ledec & Quintero (2003).

Criterios	Situación desfavorable	Consecuencias previsibles
Superficie de embalse	Grande	
Zona de inundación	Grande	Perdida de vida silvestre
Tamaño del río	Grande	Perdida de biodiversidad acuática
Profundidad del embalse	Débil	Tiempo de vida útil corto
Afluentes río abajo	No	
Ubicación	Zonas bajas tropical o subtropical	Enfermedad por vectores
bosque sumergido	Presencia	Problema de calidad de agua
vegetación acuática	Presencia	

I.3 Cuáles son los impactos potenciales por las represas en el Norte Amazónico Boliviano?

La llanura del Beni presenta una de las mayores zonas de inundación de la cuenca Amazónica (Figura I.1), cuya extensión no está todavía bien estimada y puede variar según los autores de 78 000 km² hasta 150 000 km². Aunque la mayor parte de las zonas de inundación de esta región se extienden a lo largo de los ríos (sistema de Várzea), la llanura de inundación del Beni abarca una gran área entre los ríos Beni, Mamoré e Iténez y es desconectada del resto de la Amazona y su vertedero. El río Madera, es un canal limitado todo el año a su cauce principal. Esta situación genera una ecología particular en la Amazonía Boliviana que se concretiza por especies endémicas como es el caso del bufeo

boliviano, *Inia boliviensis*. La formación de la llanura del Beni se debe a tres factores principales que se suman:

- la presencia de importantes cachuelas situadas en los cursos inferiores de los ríos Beni, Mamoré y en el río Madera, que actúan como barrera y regulan el nivel de agua como pequeñas represas naturales.

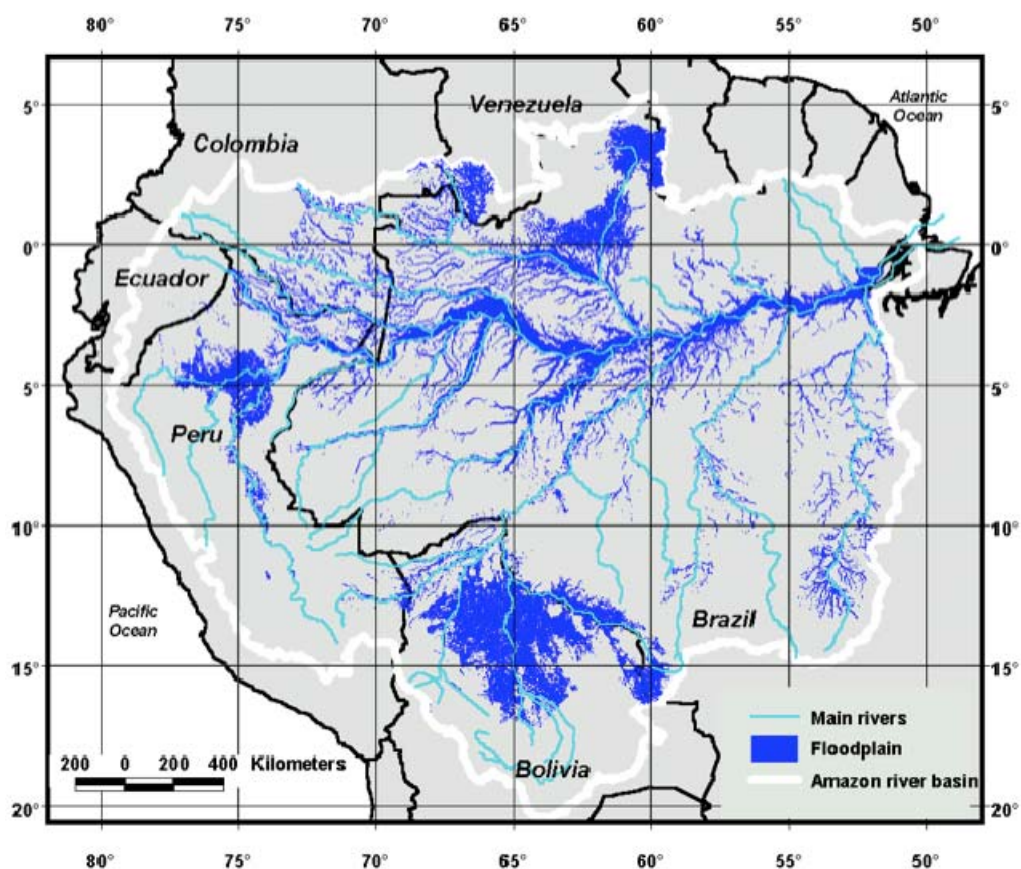


Figura I 1 : Principales ríos y extensión de las zonas de inundación en la cuenca Amazónica.
Extraído de Martínez & Le Toan 2007.

- una topografía homogénea y con pendiente débil (Figura I.2) que favorece la extensión de las aguas que no pueden ser evacuadas por el control hidrológico de las cachuelas.

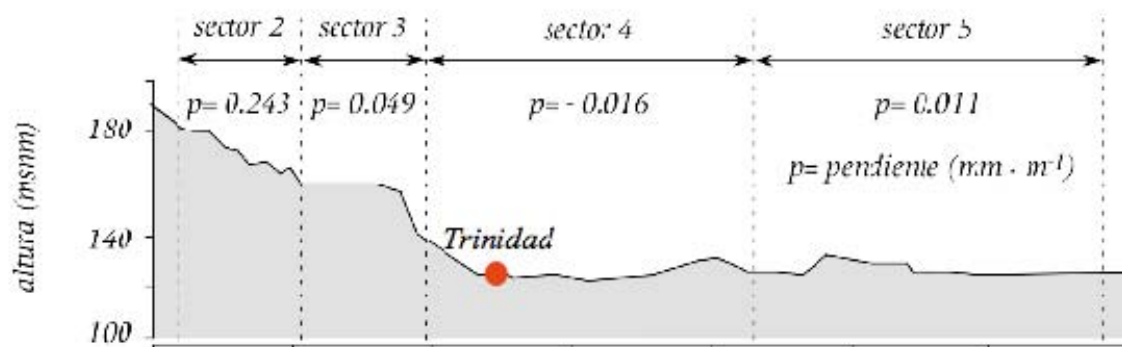


Figura 1 2: Perfil de pendiente (en mm.m-1) del río Mamoré entre Puerto Villaroel y Puerto Avaroa, confluencia con el río Iténez. Extraído de Charrière et al. 2004.

- una estacionalidad climática que produce un pulso de inundación anual muy marcado (Figura 1.3). Las grandes cantidades de aguas asociadas a la presencia de las cachuelas, que impiden su evacuación, provocan un atasco. La obstrucción se traduce en un aumento de los niveles de agua que por la falta de relieve se reparten sobre un amplio territorio.

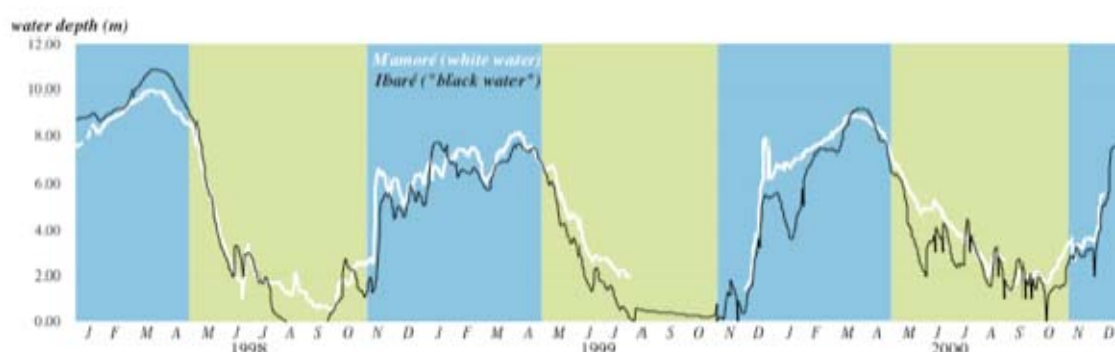


Figura 1 3: Niveles de agua en los ríos Mamoré e Ibaré cerca de Trinidad en la llanura de inundación del Beni (Bolivia) de enero 1998 a diciembre 2000. Extraído de Pouilly et al. 2004.

La construcción de represas sobre el río Madera y en especial las que se prevé realizar cerca de la llanura de inundación (Riberão y Cachuela Esperanza, figura 1.4), van a tener un impacto directo sobre la amplitud del control hidrológico sobrepasando el control ejercido por las cachuelas existentes. Los cambios hidrológicos previsibles consecuentes a este nuevo nivel de control hidrológico son la reducción de la velocidad de corriente y por consiguiente un aumento de las tasas de sedimentación, con un cambio de la dinámica estacional de los niveles de agua que se va a traducir por un aumento del tiempo de inundación y la superficie

de las zonas inundadas está ligado también a la movilización de partículas de metales pesados.



Figura I 4: Localización geográfica de las cuatro represas del proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico del río Madera. El nombre de Ahe Guajará Mirim a cambiado por el de Riberão. (extraído de EIA estudo de impactos ambientais aproveitamentos hidrelétricos Santo Antônio e Jirau).

Para la parte ambiental, esos cambios pueden generar impactos indirectos que afectaran entre otros al uso del territorio y prácticas agrícolas; el ciclo de sustancias tóxicas (como mercurio presente en altas concentraciones en la región) y a la ecología y biodiversidad de la llanura.

La magnitud de estos impactos tanto directos como indirectos es difícil de evaluar y el objetivo de este estudio será compilar elementos existentes y proponer acciones técnicas a implementar para avanzar en esa evaluación del proyecto. Los impactos ambientales de las represas se presentan mayormente cerca del embalse o indirectamente río abajo de la represa. Considerando la configuración topográfica y la proximidad entre los proyectos de represas y la llanura del Beni,

una de las principales dudas considera la extensión río arriba de los efectos directos e indirectos. El primer objetivo de nuestro estudio será entonces de intentar contestar a la pregunta primordial ¿Hasta qué distancia los cambios de niveles de agua debido a las represas tendrán efecto sobre la sedimentación y la inundación de los terrenos ribereños?

I.4 Presentación del estudio

Para este informe hemos realizado un trabajo preliminar de evaluación de los impactos negativos potenciales de la represa de Jirau y de las represas de Cachuela Esperanza y Riberão, en el territorio boliviano. El estudio se compone de cuatro capítulos técnicos, divididos en dos partes:

1- Una cuantificación de los impactos directos sobre la hidrología, sedimentación de los ríos (capítulo II) y las inundaciones (capítulo III). Estas cuantificaciones se basan en los datos actualmente disponibles.

El **capítulo II** contempla una modelación hidrológica longitudinal cuantitativa sobre el tramo Jirau - Villa Bella y cualitativa río arriba de Villa Bella hasta los ríos formadores del Madera (Beni y Mamoré).

La modelación permitirá evaluar, hasta dónde las represas afectarán la hidrología del río, cuáles serán los niveles de agua a lo largo del año en los diferentes tramos de los ríos y cuáles serán las tasas de sedimentación y las velocidades de relleno de las represas.

El **capítulo III** se realizará, a partir del análisis de una serie temporal de imágenes satelitales, una cartografía temporal (sobre un ciclo hidrológica) de las zonas de inundación y estimará la relación entre el nivel de agua en el río y en la superficie de zonas de inundación. *Este último punto podría permitir estimar en el futuro el impacto de las represas sobre la superficie inundada (en tiempo y espacio).*

2- Una primera evaluación de cuáles impactos indirectos podrían presentar un nivel crítico en el caso de la represa de Jirau en el tramo brasilero del río Madera y de las represas de Cachuela Esperanza y Riberão en el territorio boliviano. En el estado actual de los conocimientos y de los datos disponibles sobre la región, no es factible realizar una cuantificación de los impactos indirectos que afectaran la ecología (incluyendo los servicios ecológicos que proveen tanto los sistemas acuáticos como los bosques del Norte Amazónico boliviano), los sistemas productivos y la salud de las poblaciones locales. Sin embargo en el

capítulo IV se realiza una revisión preliminar no exhaustiva de los impactos detectados en varias represas tropicales del continente Sudamericanas y se intenta detectar las condiciones que les favorecen. La revisión compila datos generales físicos y biológicos de 11 represas neotropicales y describe los impactos observados a nivel de emisión de gases, flora, fauna, y salud. En relación a este panorama damos a conocer los elementos que existen acerca de estos temas por el Norte Amazónico boliviano lo que permite evaluar cuáles impactos podrían presentarse en el caso del río Madera en especial acerca de la contaminación por el mercurio.

I.5 Bibliografía

Banco Mundial, 1999. Evaluación Ambiental. Manual de operaciones del Banco Mundial. Normas de Procedimiento del Banco. BP.4.01. disponible en español en el ULR :

Berkamp G. McCartney M., Dugan P., McNeely J & Acreman M. 2000. Dams, ecosystem functions and environmental restoration. Thematic review II.1 for the World Comission on Dams (www.dams.org).187 p.

Charriere M., Bourrel L., Gautier E. & Pouilly M. 2004. División geomorfológica del Río Mamoré. In Pouilly M., Beck S.G., Moraes M. & Ibañez C. (Eds.) . Diversidad biológica de la llanura de inundación del Río Mamoré. Importancia ecológica de la dinámica fluvial. Centro de Ecología Simón I. Patiño, Sta Cruz de la Sierra, Bolivia. 77-94.

Ledec G. & Quintero J.D. 2003. Good dams and bad dams : environmental criteria for site selection of hydroelectric projects. The World Bank, Latin America and Caribbean Region, Sustainable Development Working Paper # 16. 19p.

Martinez, J.-M. & T. Le Toan (2007). "Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data." Remote Sensing of Environment 108(3): 209-223.

Pouilly M., Beck S.G., Moraes M. & Ibañez C. (Eds.) 2004. Diversidad biológica de la llanura de inundación del Río Mamoré. Importancia ecológica de la dinámica fluvial. Centro de Ecología Simón I. Patiño, Sta Cruz de la Sierra, Bolivia. 396p.

WDC/CMR 2000. Represas y desarrollo. Un nuevo marco para la toma de decisiones. World Comission on Dams (www.dams.org).417 p.

II –Modelización hidráulica longitudinal y sedimentación

Jorge Molina

II.1 Caracterización física e Hidrológica del río madera

El río Madera es el principal afluente del río Amazonas tanto por caudal como por longitud. 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

Las características físicas y el régimen hidrológico e hidráulico del tramo del río Madera entre Guayaramerín y Porto Velho juegan un rol decisivo sobre los impactos que podría tener una represa. Las cachuelas de ese tramo son la manifestación de un control geológico impuesto por las rocas del Escudo precámbrico. Como consecuencia, el tramo de cachuelas entre Guayaramerín y Porto Velho es hidráulica y morfológicamente diferente de los tramos situados aguas arriba y abajo. Entre Guayaramerín y Porto Velho, el río Madera fluye “encajonado”, es decir en un cauce estable y bien definido, con niveles de base controlados estructuralmente y muy poca libertad de moverse lateralmente. No se observan meandros ni las típicas lagunas “cuerno de buey” de los meandros cortados. Tampoco se observan las várzeas o lagunas de inundación, tan frecuentes en el Amazonas, y la superficie de la llanura de inundación del Madera es relativamente pequeña.

El río presenta un canal único (excepto donde algunas islas provocan bifurcaciones) y estable, con barrancas laterales de fuerte pendiente. El canal principal tiene capacidad suficiente para contener la crecida media anual (alrededor de 39000 m³/s). En todas las cachuelas (Figura II.1) la roca es aflorante. En el resto del tramo existen tanto sectores rocosos como depósitos aluviales. Los sedimentos del fondo del cauce son predominantemente arena fina ($d_{50}=0.2$ mm), con presencia de arenas gruesas, gravas y un pequeño porcentaje de limo. La carga de sedimentos transportados por el río Madera se estima en 500 millones de toneladas por año, un valor que representa por sí solo el equivalente al sedimento transportado por el resto de los ríos de la cuenca amazónica.

El desnivel del tramo (60 m en 360 km) es mucho mayor que el del río Mamoré entre Guayaramerín y Puerto Villarroel (80 m en 1317 km), siendo este último un

río típico de llanura, con amplios meandros, lagunas cuerno de buey y fuerte migración lateral del cauce. El río Mamoré forma antes del sector de las cachuelas una enorme llanura estacional de inundación (100000 km²), de alta productividad pesquera.

Dos características hidrológico-hidrodinámicas merecen destacarse: la gran variación temporal de los niveles de agua y la gran variación espacial de la velocidad de flujo. El río presenta un régimen hidrológico monomodal, con una sola época húmeda y una época seca por año. La variación estacional de los caudales, entre 5000 m³/s (media del mes de septiembre) y 38000 m³/s (crecida media anual), combinada con las características morfológicas del río, provoca una gran variación de los niveles de agua máximo y mínimo anuales: entre 11 y 14 m en promedio, según el sitio. La diferencia entre los extremos máximos y mínimos es generalmente mayor a los 16 m.



Foto: J. Molina

Figura II 1: Cachuela Riberão

En el tramo de estudio se presenta también una gran variación espacial de la velocidad de flujo, como resultado de la alternancia de cachuelas y rápidos con “pozas” de gran profundidad donde la velocidad se reduce mucho. Como consecuencia, para un mismo caudal, la velocidad media en la sección varía de 0.3 m/s en un sitio a más de 5 m/s en otro. Esto crea una gran variedad de

ambientes acuáticos y condiciones de oxigenación del agua. Para el tramo en conjunto, la velocidad de flujo media anual es alta (alrededor de 1.5 m/s) para un río de "llanura".

La tabla II.1 muestra las estimaciones más recientes de Furnas-Odebrecht (2007) de los caudales medios mensuales del río Madera en las estaciones hidrométricas de Porto Velho y Abuná y del río Mamoré en Guayaramerín, así como de Vauchel (2008) en Porto Velho, para diferentes periodos. Como la estación de Porto Velho empezó a funcionar en 1967, los datos anteriores son resultado de un relleno estadístico. En Porto Velho, el río Madera drena una cuenca de una superficie estimada en 988000 km². La superficie de la cuenca del Mamoré en Guayaramerín ha sido estimada en 589000 km².

Tabla II 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
Madera en Porto Velho	1967-01	23968	30761	35659	34502	26665	18659	11939	7161	5712	6855	10459	16651	19083
	1931-05*	23734	30535	35135	34017	26155	18308	11751	7266	5481	6566	10302	16420	18806
	1977-97	25209	31728	36449	36314	29370	20830	13419	7894	5958	7100	11202	17325	20233
Madera - Abuná	1977-97	24064	29749	33091	31942	26278	18906	11859	6655	4948	6243	10183	16140	18338
Mamoré-Guayar.	1971-01	8294	11104	15737	15251	13199	9959	4987	2757	1817	2022	2780	6186	7841
Madera en PV	1967-07**	23989	30444	34963	33747	25662	17838	11116	6647	5174	6162	9924	16032	18448

Fuente: Furnas, Odebrecht, 2007; Vauchel, 2008

PV=Porto Velho, *Observado y estimado,**Vauchel

El caudal máximo medio mensual se produce en marzo y el mínimo en septiembre. El caudal medio del mes más húmedo (marzo) fue de 34963 m³/s durante el periodo 1967-07, según Vauchel (2008). 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 marzo-abril y febrero, respectivamente.

Para poder estimar el caudal al inicio (Villa Bella) y final (Porto Velho) del tramo de estudio, la tabla II.1 muestra los caudales en cada una de las tres estaciones para el periodo común de 1977-97. Durante este periodo, relativamente húmedo, el

aporte medio de la intercuenca entre Abuná y Porto Velho sería 1895 m³/s (20233-18338). Como entre Abuná y Villa Bella, la intercuenca tiene una superficie de solamente 4100 km², se puede asumir que los caudales en Villa Bella corresponden a los de Abuná.

Sin embargo, un análisis más reciente (Vauchel, 2008) parece mostrar que el caudal en la estación brasileña de Abuná fue ligeramente subestimado. Con esos datos, se puede estimar que la intercuenca entre Villa Bella y Porto Velho aporta un caudal medio del orden de 900 a 1200 m³/s. De ese aporte, aproximadamente 500-600 m³/s provienen del río Abuná, el principal afluente de ese tramo, que drena una subcuenca de 31300 km².

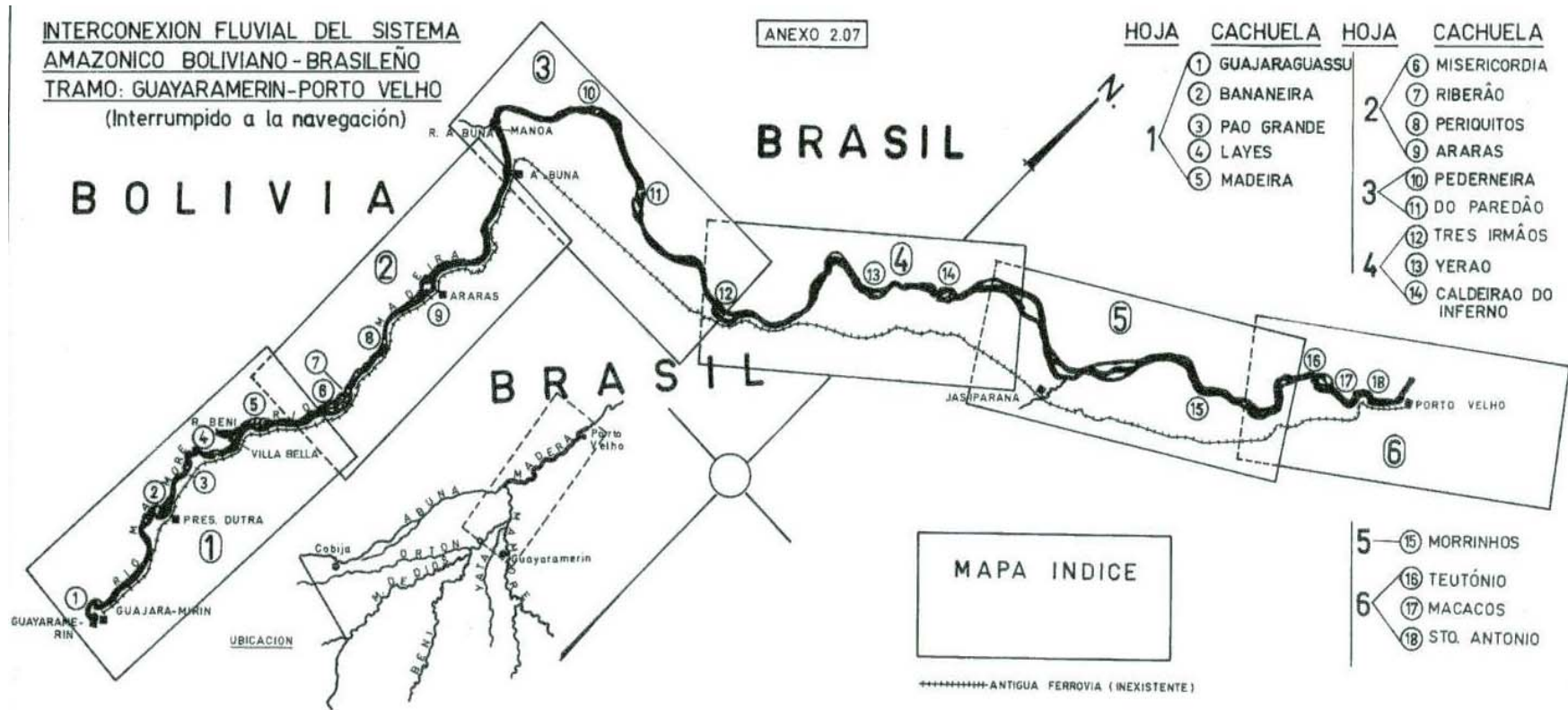
La tabla II.2 muestra la estadística de los caudales máximos anuales en Porto Velho. La crecida máxima media anual en Porto Velho está en el orden de 39000 m³/s y la máxima registrada fue de 48565 m³/s (abril 1984). Se muestran también valores para periodos de retorno TR de 25 y 100 años.

Tabla II 2: Estadística de caudales máximos anuales en Porto Velho

Variable	Valor
Nº Eventos	35
Caudal máximo anual registrado (m ³ /s)	48565
Caudal máximo anual más bajo (m ³ /s)	28183
Caudal máximo medio anual (m ³ /s)	38719
Caudal máximo diario (m ³ /s) TR=25 años	48370
TR=100 años	53530
Desviación Standard (m ³ /s)	4722

Fuente: Estudio de Viabilidad, (Furnas-Odebrecht, 2004)

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. La figura II.2 muestra las cachuelas identificadas en el tramo Guayaramerin-Porto Velho.



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

Figura II 2. Cachuelas del tramo Guayaramerín-Porto Velho

Las cuatro primeras cachuelas están situadas sobre el río Mamoré. De las catorce restantes, las dos más importantes son los saltos de Jirau y Teotonio, que prácticamente en toda época del año tienen una caída hidráulica de 4 metros o más. Sigue un grupo de cachuelas de tamaño intermedio, como Riberão o Pederneira y al final se encuentran un grupo de cachuelas pequeñas que son apenas perceptibles en la estación seca, como Misericordia, Periquitos, Morrinhos o Macacos.

II.2 Remanso Hidráulico

Molina *et al.* (2008) realizaron un estudio de remanso con el objeto de evaluar la influencia de los embalses sobre los niveles de agua en el río, así como sobre las velocidades de flujo, con énfasis en el tramo binacional. El estudio se realizó para diferentes caudales en el río y condiciones de operación de los embalses, usando el modelo HEC-RAS v.4.0. Se presentan los resultados principales de ese estudio.

II.2.1 Condiciones naturales

La figura II.3 muestra los perfiles hidráulicos (niveles de agua) y del talweg (punto más bajo del cauce del río) para el tramo Santo Antonio-Jirau y la figura II.4 para el tramo Jirau-Cachuela Madera, en condiciones naturales y para tres caudales representativos: 5000, 18000 y 40000 m³/s. El primero corresponde aproximadamente al caudal medio del mes más seco (septiembre) en Abuná, el segundo al caudal medio interanual y el caudal de 40000 m³/s a la crecida máxima media anual.

En el tramo Santo Antonio – Jirau (progresivas 81-207) destaca la cachuela de Teotonio, ubicada entre las secciones 96 y 105. Esta cachuela presenta una caída hidráulica (de la superficie del agua) de casi 9 metros entre las secciones 96 y 105 para el caudal más bajo (5000 m³/s). La caída hidráulica se va reduciendo gradualmente a medida que aumenta el caudal. Para el caudal medio de 18000 m³/s la caída se reduce a 6.5 m y para el caudal de 40000 m³/s a un poco más de 4 metros. Además se observa que la pendiente hidráulica (de la superficie del agua) aumenta con el caudal.

Para el tramo Jirau-Cachuela Madera, se observa que la caída de la superficie del agua en la cachuela de Jirau es de más de 7 metros (entre las secciones 210 y 207) para los tres caudales y por tanto, en cualquier estación del año. La caída hidráulica en las cachuelas de Tres Irmaos (256), Pederneira (309), Araras (375) y Riberão (405) se percibe claramente para el caudal de estiaje (5000 m³/s). Además se observa que el perfil hidráulico arriba de esas cachuelas es casi horizontal para ese caudal.

Para el caudal medio de $18000 \text{ m}^3/\text{s}$, las cachuelas de Tres Irmaos y Araras son casi imperceptibles y la caída hidráulica se reduce considerablemente en Pederneira y Ribeirao. La pendiente hidráulica arriba de las cachuelas aumenta con respecto a la pendiente para el caudal de $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el caudal de crecida de $40000 \text{ m}^3/\text{s}$, todas las cachuelas (excepto Jirau) son casi imperceptibles en el perfil hidráulico. La pendiente del perfil de la superficie del agua aumenta con el caudal para casi todo el tramo Jirau-Cachuela Madera.

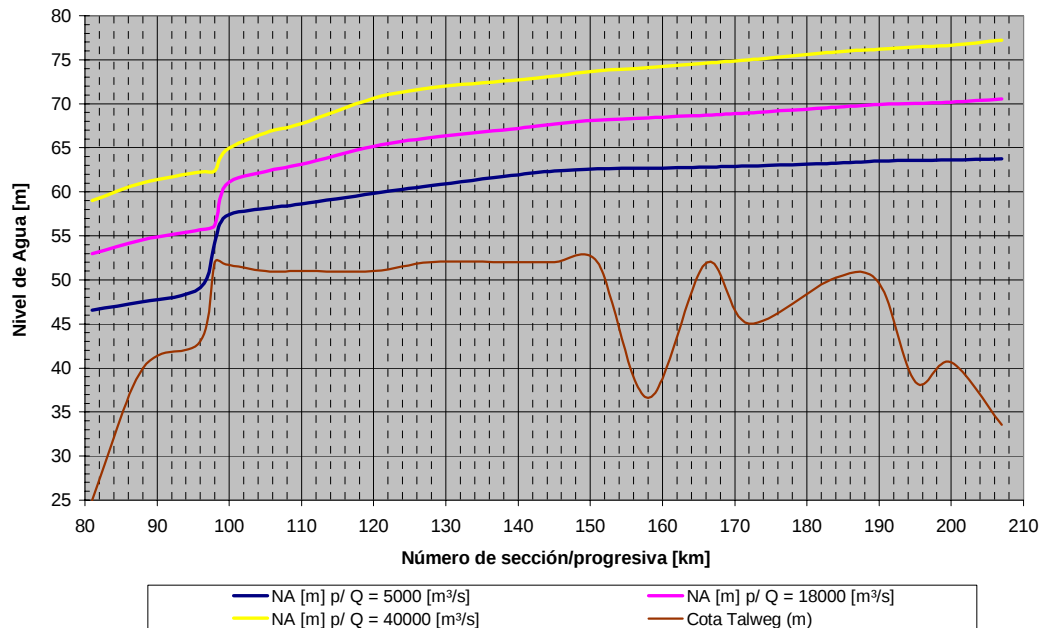
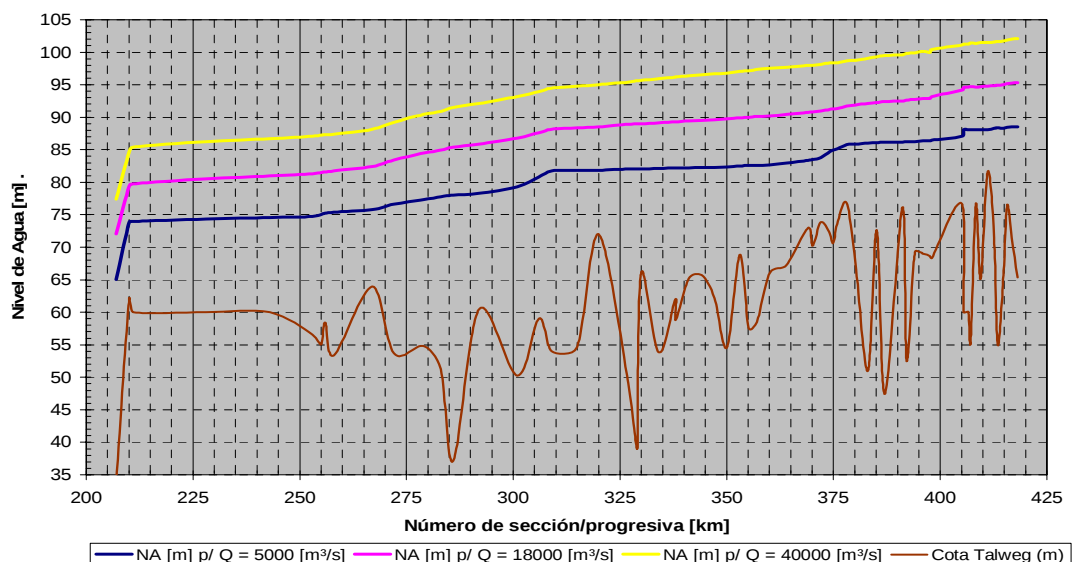


Figura II 3. Perfil hidráulico y del lecho del río Madera entre Santo Antonio (81) y Jirau aguas abajo (207)



NA= Nivel de la superficie del agua (m)

Fuente: Elaboración propia

Figura II 4. Perfil hidráulico entre secciones de Jirau aguas abajo (207) y cachuela Madera aguas abajo (418.1)

La diferencia promedio de niveles de agua entre los caudales de 5000 y 40000 m³/s, que corresponden aproximadamente a los niveles mínimo y máximo medio anuales, es de 13.4 m en el tramo Jirau-Cachuela Madera. Por tanto la variación estacional de esos niveles es mayor que en el tramo Santo Antonio-Jirau. Los niveles del agua varían más fuertemente en el tramo binacional (la variación se acerca a los 15 metros entre Abuná y Araras), mientras que inmediatamente aguas arriba de la cachuela de Jirau, la variación de niveles es de aproximadamente 11 metros.

Las figuras II.5 y II.6 ilustran la fuerte variación estacional de los niveles de agua esa variación. Son fotografías que muestran la Capitanía boliviana de Puerto Manoa, situada frente a la estación hidrométrica brasileña de Abuná-Vila. La primera fotografía se tomó el 31/8/07, cuando el caudal estimado del río Madera era de 4150 m³/s y la segunda el 17/3/08 cuando el caudal era de aproximadamente 36900 m³/s. Entre las dos fotografías la variación del nivel del agua es de 13.4 m.



Foto: SENAMHI

Figura II 5. Río Madera en Capitanía de Puerto Manoa, 31/8/07



Foto: SENAMHI

Figura II 6. Río Madera en Capitanía de Puerto Manoa, 17/03/08

II.2.2 Efecto de remanso de los embalses

La construcción de una represa provoca la elevación de los niveles de agua con respecto a los niveles naturales y como consecuencia la disminución de la velocidad de flujo. 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. Se describen los cambios que provocarán las represas de Jirau y Santo Antonio sin considerar la posible sedimentación. Representan por tanto el límite inferior de posibles cambios, es decir los que provocarían los impactos de menor magnitud.

El efecto de remanso en el río Madera debido a la posible instalación de las centrales hidroeléctricas de Jirau y Santo Antonio, fue determinado por medio de simulaciones con el modelo HEC-RAS. En el caso de Jirau se dio especial énfasis a la evaluación de los efectos sobre el tramo binacional del río Madera. Los impulsores del proyecto mencionan que “ante la posibilidad de que no se construyan los proyectos binacionales, se optó por la no inundación de territorio boliviano”, lo que obligó a considerar un régimen de operación con niveles variables a lo largo del año para el embalse de Jirau, que se muestra en la Tabla II.3.

Tabla II 3. Niveles de agua (m) junto a la represa de 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
CG	(m)	90.0	90.0	90.0	90.0	89.5	87.0	85.0	83.0	82.5	83.0	85.0	87.5
CN 210	(m)	81.1	82.4	83.4	82.6	80.8	78.7	76.5	74.7	74.1	74.7	76.4	78.9
CN 207	(m)	74.0	75.4	76.3	75.6	73.6	71.3	68.7	66.3	65.4	66.3	68.6	71.6

CG=Curva guía, CN 210=Nivel de agua en condiciones naturales en la sección 210 (cachuela Jirau aguas arriba), CN 207= Nivel de agua en condiciones naturales en la sección 207 (cachuela Jirau aguas abajo)

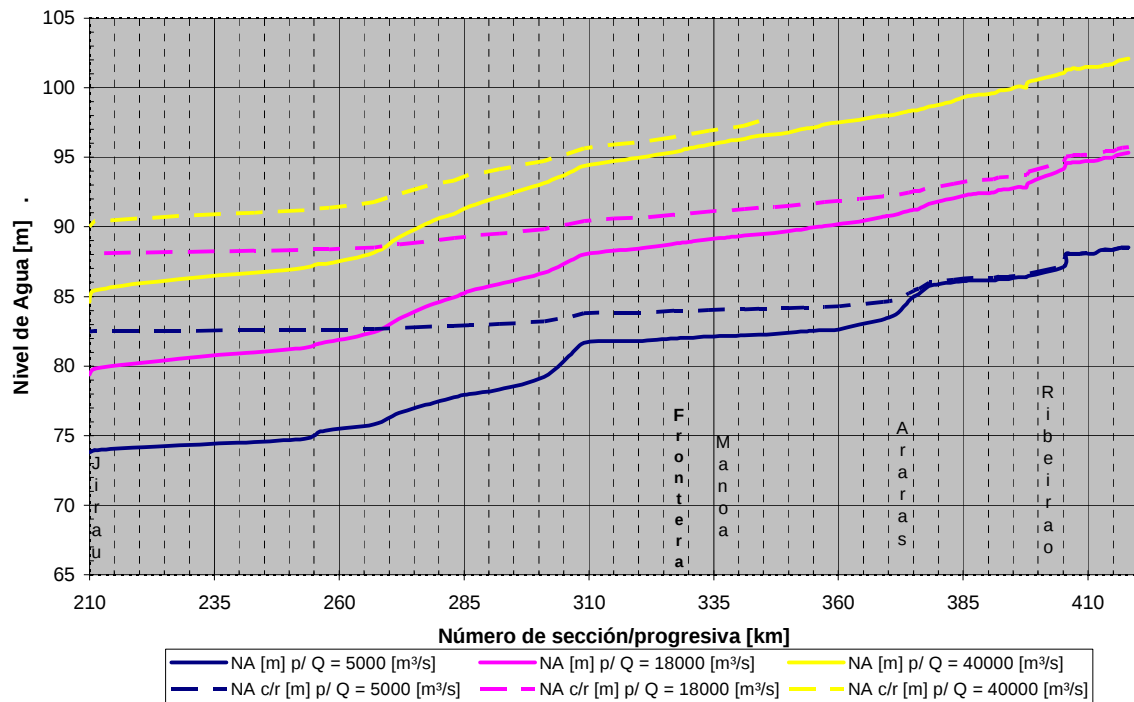
Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

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

Además de evaluar los efectos de remanso en todo el tramo afectado, en este subcapítulo se intentó responder dos preguntas:

- a) ¿La curva guía de operación del embalse de Jirau, citada en la resolución ANA 555, permitiría evitar la modificación del nivel natural del agua en el tramo binacional del río Madera, para todo el rango de caudales presentes en el río?
- b) Si la respuesta a la pregunta anterior es negativa, ¿existe alguna otra curva de operación del embalse de Jirau que permitiría evitar esa modificación?

La figura II.7 muestra el perfil hidráulico para el tramo Jirau-Cachuela Madera, en condiciones naturales y con represa, para tres caudales representativos: 5000, 18000 y 40000 m³/s. La primera consecuencia que se observa es la disminución de la variación estacional de niveles.



NA (m)=Nivel de agua en condición natural

NA c/r (m)= Nivel de agua con represa

Figura II 7. Perfil de la línea de agua entre Jirau (210) y cachuela Madera aguas abajo (418.1)

Para caudales bajos se observa que el efecto del embalse de Jirau llega hasta la cachuela de Araras y para caudales medios hasta la cachuela de Riberão, en territorio boliviano. La simulación para caudales altos solo se pudo realizar hasta la sección 344, situada 6 km aguas arriba de Puerto Manoa, por falta de datos topográficos de la parte superior de las secciones.

Aún con el régimen de operación variable, la variación estacional de niveles se ve afectada. La diferencia promedio de niveles de agua entre los caudales de 5000 y 40000 m³/s, que corresponden aproximadamente a los niveles mínimo y máximo medio anuales, es de 13.4 m en el tramo Jirau-Cachuela Madera. Esta variación se reduciría a 7.5 m en el tramo próximo a la represa y a aproximadamente 12.65 m al inicio del tramo binacional.

La figura II.8 muestra las velocidades con y sin represa a lo largo del tramo a ser afectado por el futuro embalse Jirau. Como era de esperar, la disminución de la velocidad es más grande en las cercanías del embalse. Sin embargo, se presenta una reducción moderada en el tramo binacional.

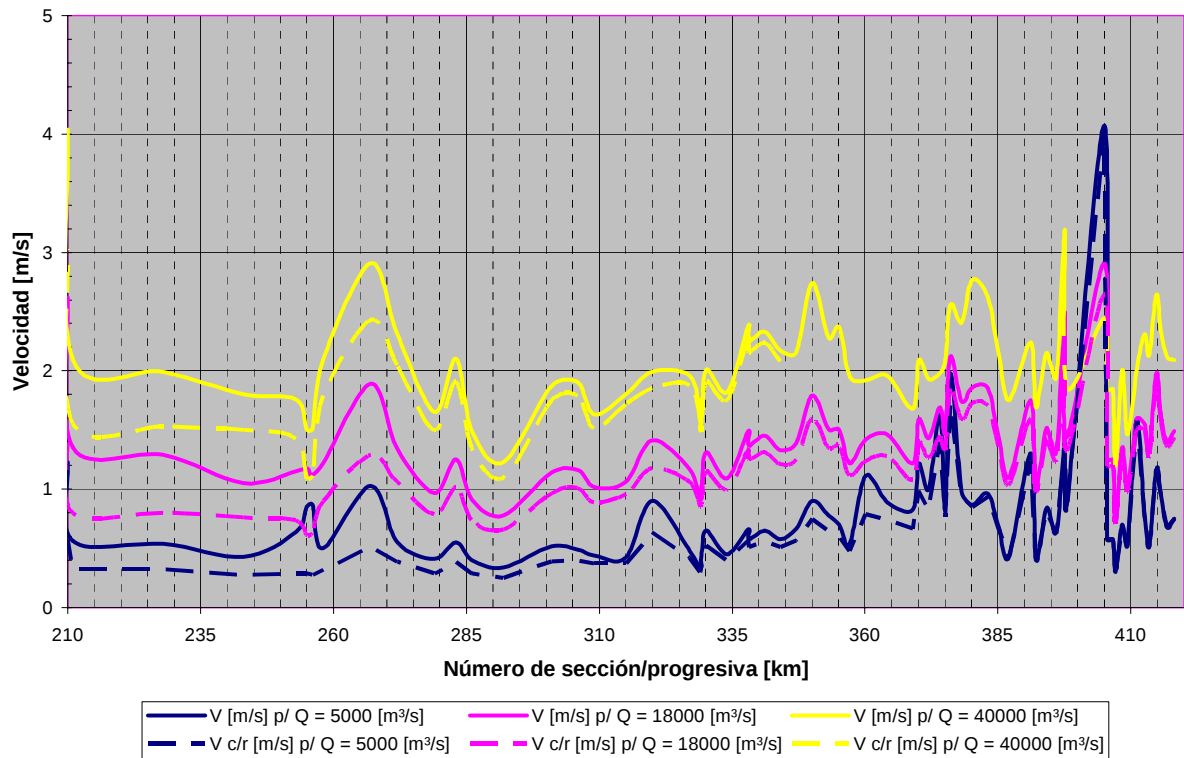


Figura II 8. Velocidad (m/s) entre Jirau (210) y Cachuela Madera (418.1)

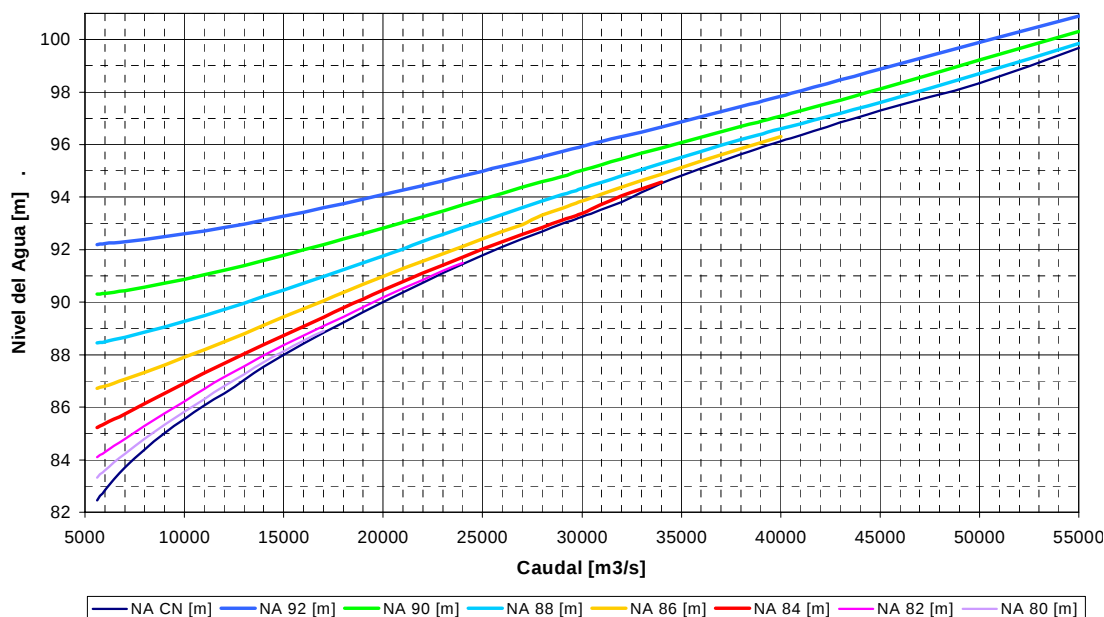
La figura II.7 evidencia que los niveles de agua en el tramo binacional serán afectados, aún considerando un régimen de niveles variables en el embalse de Jirau. La tabla II.4 muestra los niveles de agua (NA) naturales y con embalse para diversos caudales en la sección 338, donde está la sección hidrométrica de Abuná-Vila y Puerto Manoa. Se observa que la sobre-elevación causada por el embalse está en el rango de 1.60 a 2.26 m para caudales bajos y medios y un poco menos de 1 m para caudales altos.

Tabla II 4. Niveles de agua y sobre-elevación en Abuná-Vila

Caudal	5600	6800	10600	15900	16600	22700	23900	29100	33600	40000	48800
NA Natural	82.45	83.55	85.86	88.39	88.68	91.00	91.42	92.75	94.41	96.14	98.10
NA con embalse	84.34	85.14	87.57	90.13	90.57	93.16	93.68	94.83	95.79	97.09	98.97
Sobre-elevación	1.89	1.59	1.71	1.74	1.89	2.16	2.26	2.08	1.38	0.95	0.87

La figura II.9 muestra los niveles de agua que se producirían en la estación hidrométrica de Abuná-Vila considerando diversos niveles de operación de Jirau (entre 80 y 92 m) y diversos caudales. Como se observa en esa figura, existe influencia del embalse para todo el rango de caudales.

Curva Nivel de agua-Caudal con influencia del embalse de Jirau



Fuente: Elaboración propia

Figura II 9. Río Madera en Abuná-Vila (sección 338)

En resumen, la respuesta a la primera pregunta planteada al inicio del subcapítulo, es que la curva guía de operación del embalse de Jirau con niveles variables, citada en la resolución ANA 555, modificará el nivel natural del agua en el tramo binacional del río Madera, para todo el rango de caudales registrados en el río.

La otra pregunta, consecuencia de la anterior, es si existe alguna otra curva de operación del embalse de Jirau que permitiría evitar ese efecto de remanso. La figura 2.9 muestra que con un nivel de operación de 78.0 ya no habría efecto de remanso en la estación de Abuná para ese caudal. Un nivel de operación de 80.0 evitaría el efecto de remanso para caudales iguales o superiores a 15000 m³/s, según la figura 2.9. Un nivel de operación de 82.0 evitaría ese efecto para caudales iguales o superiores a 23000 m³/s, un nivel de 84.0 para caudales iguales o superiores a 33000 m³/s y un nivel de 86.0 no produciría remanso para caudales iguales o superiores a 40000 m³/s.

Por tanto, es posible construir una curva de operación del embalse de Jirau, que no produzca efecto de remanso hidráulico en el tramo binacional. El problema es que la nueva curva estaría alrededor de 4 metros por debajo de la curva guía de la tabla 2.1, lo que reduciría mucho la energía generada por la central hidroeléctrica. Más aún, para evitar el efecto de remanso el nivel de operación máximo normal del embalse debería limitarse a 86.0 y no a los 90.0 propuestos.

Con toda probabilidad, la nueva curva haría económicamente inviable a la central hidroeléctrica de Jirau.

II.3 Sedimentación

El estudio de Molina *et al.* (2008) también evaluó la posible sedimentación inducida por los embalses, especialmente en el tramo binacional entre Abuná y la confluencia del río Beni. Para ello se usó un modelo matemático de transporte y deposición de sedimentos: el módulo Sediment Transport Analyses (STA) de la versión 4.0 del HEC-RAS. Los principales resultados se presentan a continuación.

II.3.1 Transporte de sedimentos

Para evaluar la sedimentación se requiere datos de la carga y tamaño de los sedimentos transportados por el río Madera. Esa evaluación es especialmente relevante en el presente caso, debido a que el río Madera es la fuente principal de sedimentos en suspensión y sólidos disueltos de la cuenca amazónica.

La tabla II.5 muestra valores promedio del caudal sólido en suspensión (Q_{ss}) y el caudal sólido total (Q_{st}), estimados por Vauchel (2008) en Porto Velho. El caudal sólido total se obtuvo multiplicando por 1.06 el caudal sólido en suspensión. Los valores de la tabla 2.5 se obtuvieron aplicando una relación $Q_{ss}=f(Q)$, donde Q es el caudal líquido.

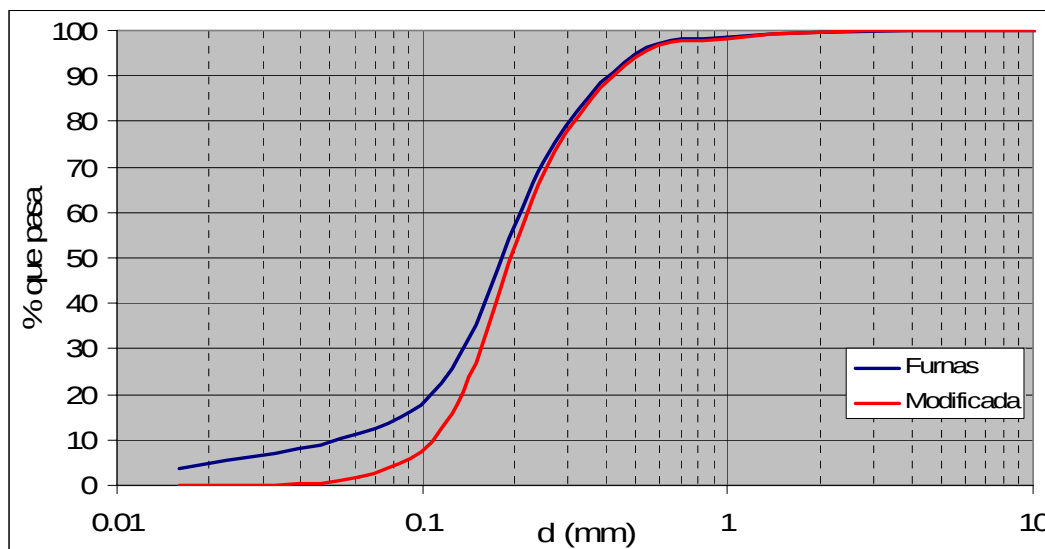
Tabla II 5. Caudal sólido medio en suspensión (miles ton/día), río Madera en Porto Velho

Periodo	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Media
1967-07	1761	2885	3915	3729	2157	995	371	118	70	107	288	784	1432
1967-07	1859	3036	4123	3903	2276	1063	401	127	76	115	300	818	1508

Un análisis complementario (Molina *et al.*, 2008) no permitió confirmar una posible tendencia al aumento del caudal sólido y las concentraciones en Cachuela Esperanza, Guayaramerín y Porto Velho después de 1990, que había identificada por Furnas-Odebrecht (2005). Si es que el aumento de las concentraciones existe (la falta de la serie de datos y el desconocimiento de la metodología usada en Porto Velho impiden probarlo), ese aumento estaría asociado al comportamiento hidrológico e hidrodinámico de la zona de llanura de los ríos Beni y Mamoré.

Para las simulaciones se usó la curva granulométrica del sedimento del lecho que se muestra en rojo en la figura II.10. Tiene un $d_{50}=0.196$ mm. Esta también es una aproximación para todo el tramo de estudio.

Con respecto al tamaño del sedimento total transportado (de fondo y suspensión), un análisis de los datos de Furnas-Odebrecht (2005, 2007) y Guyot (1995) llevó a usar una curva granulométrica compuesta de 18% de arcilla, 66% de limo y 16% de arena. Guyot (1992) no encontró una relación entre el tamaño del sedimento transportado en suspensión y el caudal líquido para el río Beni. Esto se tomó en cuenta en la tabla granulométrica de caudal sólido total que se proporciona al modelo como información de entrada.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Furnas (2005)

Figura II 10. Curvas granulométricas medias del lecho del río Madera en Porto Velho

II.3.2 Sedimentación en el embalse de Jirau

Usando toda la información topobatimétrica y de caudal líquido y sólido descrita anteriormente, se realizó un análisis de estabilidad del lecho del río Madera. El perfil del lecho estabilizado fue asumido como la geometría inicial para el resto de las corridas con represa.

El modelo STA se usó para estimar los efectos que la represa de Jirau tendría sobre los procesos de erosión/sedimentación en el tramo entre Jirau (sección 210) y Ribeirao (sección 405). Se consideró dos alternativas para los niveles de operación del embalse de Jirau: a) nivel variable según la curva guía de la tabla 3.4, b) nivel constante a 90.0 m. Las diferencias entre ambos casos fueron muy pequeñas, por lo que se describe solamente los resultados del primero.

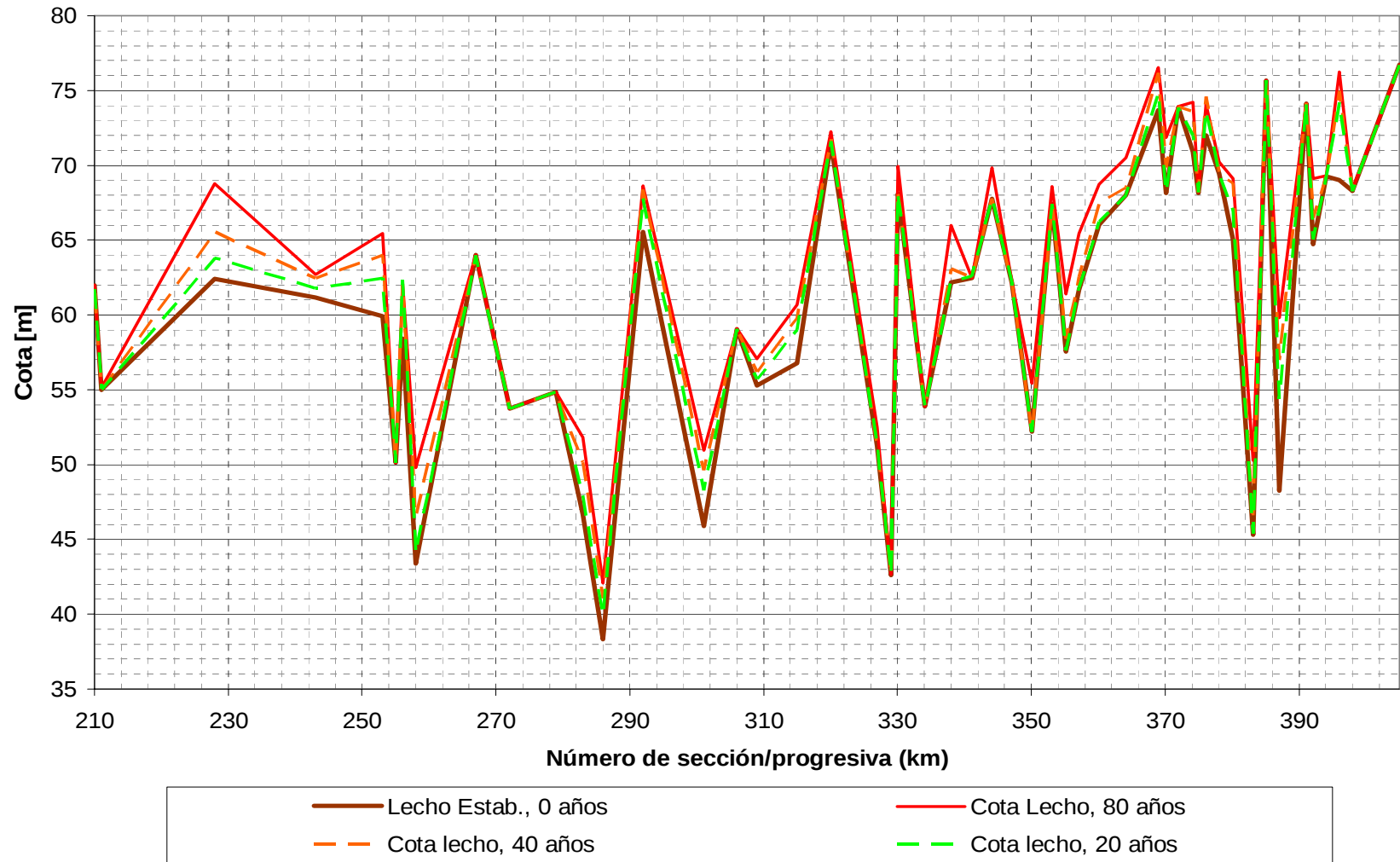
Una corrida inicial mostró que el proceso de sedimentación no se detiene al cabo de 40 años, por lo que se decidió simular un periodo de 80 años, repitiendo los datos del periodo 1967-07.

La figura II.11 muestra la evolución del lecho del río Madera con el embalse de Jirau operando a nivel variable, para tiempos de 20, 40 y 80 años. Se puede observar que el proceso de sedimentación es relativamente lento, pero no se detiene al cabo de 40 años. Entre los años 40 y 80, la tasa de sedimentación es solamente algo menor que entre los 0 y 40 años. Por otro lado, la sedimentación no se produce en todo el tramo: en varias secciones no se producen cambios en los niveles del lecho, ni aún para 80 años. La tabla II.4 muestra esa evolución en valores numéricos.

Los perfiles del lecho calculados con STA fueron llevados a HEC-RAS para calcular los perfiles hidráulicos correspondientes. La figura II.12 muestra los niveles del lecho y del agua al cabo de 80 años, para el embalse operando a nivel variable y tres caudales: 5000, 18000 y 40000 m³/s. Se incluyeron también los niveles de agua estimados en el inciso 2.2 sin considerar sedimentación. Se observa que los niveles de agua con sedimentación (líneas segmentadas) están por encima de los niveles de agua con embalse pero sin sedimentación. La diferencia es mayor para caudales medios y altos que para caudales bajos.

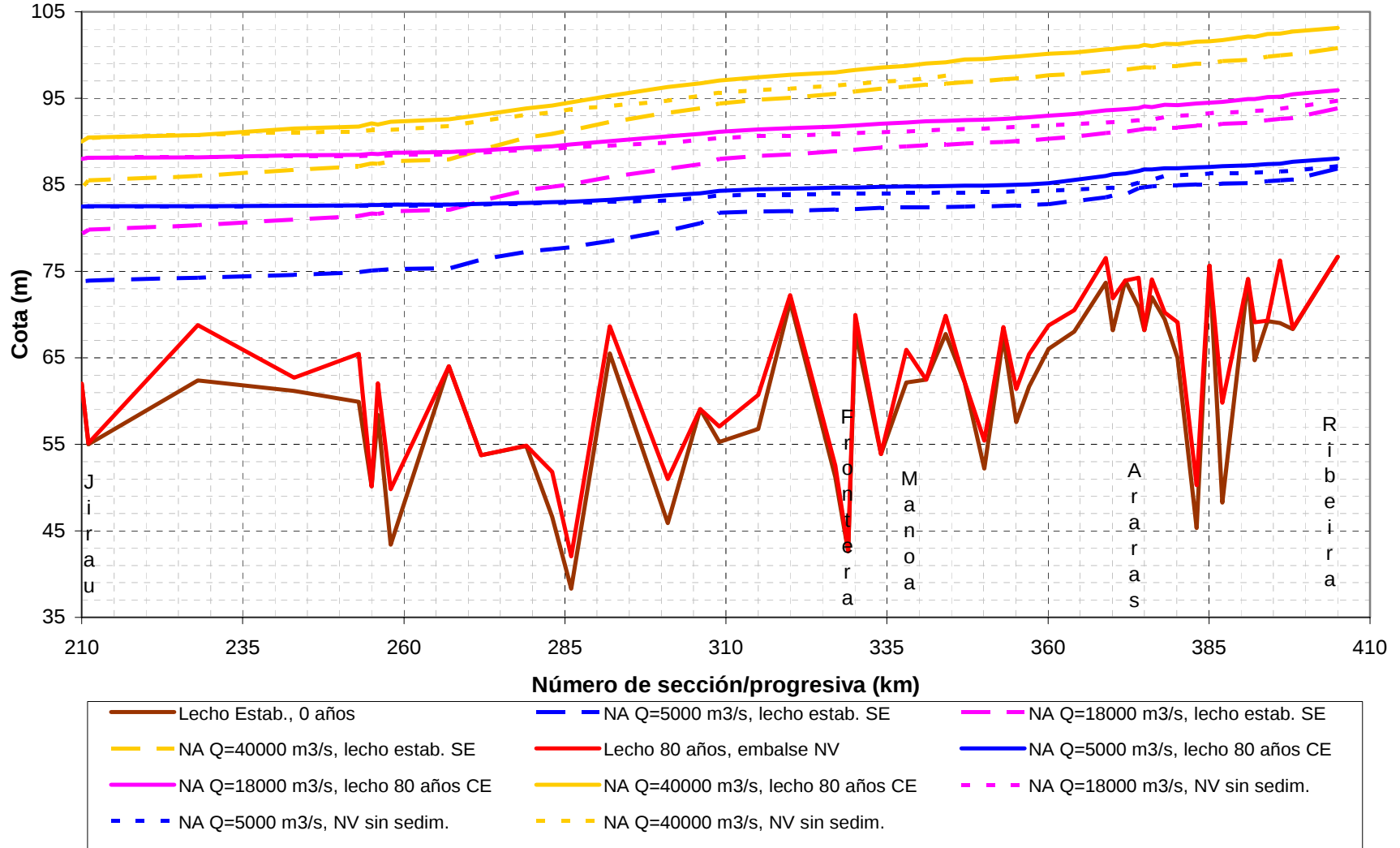
Otra característica a destacar en la figura II.12 es que la sobre-elevación del nivel del agua atribuible a la sedimentación es casi uniforme a lo largo del tramo binacional, entre la frontera y Riberão. Por ejemplo, en la sección 338 (Manoa/Abuná Vila) los niveles del agua para el caudal medio de 18000 m³/s son 89.42 (natural con lecho estabilizado), 91.19 (embalse sin sedimentos) y 92.18 m (embalse con sedimentos). En la sección 398 al pie de la cachuela de Jirau, los niveles correspondientes son 92.70, 93.98 y 95.45 m. Para embalse con sedimentos, la sobre-elevación es de 2.76 m en la sección 338 (92.18-89.42) y de 2.75 m en la sección 398 (95.45-92.70).

La tabla II.6 muestra los niveles de la línea de agua para diferentes condiciones, desde la actual hasta el embalse sedimentado al cabo de 80 años, para el caudal de 40000 m³/s, próximo a la crecida media anual. El efecto de la sedimentación sobre los niveles de agua es imperceptible solamente en los 20 km más cercanos a la represa. A partir de allí va aumentando gradualmente: en la sección 329 situada en la frontera, el incremento del nivel de agua pasa de 1.15 m sin sedimentos, a 1.74, 2.14 y 2.64 m a los 20, 40 y 80 años de operación del embalse, respectivamente. El efecto es más grande en el tramo binacional: en la sección 398 al pie de la cachuela de Ribeirão, el incremento del nivel de agua pasa de 0.32 m sin sedimentos, a 0.98, 1.49 y 2.28 m a los 20, 40 y 80 años de operación del embalse, respectivamente. Además se puede observar que si bien la tasa de sedimentación es lenta, el proceso no se detiene a los 40 u 80 años. Una consecuencia de lo anterior es que los riesgos de desborde e inundación se incrementarán con el tiempo, a medida que el sedimento se deposite en el lecho del río. Para evaluar esos riesgos y el área sujeta a inundación en el tramo binacional, se necesita información topográfica detallada, que aún no está disponible.



Embalse con nivel variable (curva guía)

Figura II 11. Nivel del lecho del tramo Jirau-Riberão para diferentes periodos, caso N-NV



SE=sin embalse, CE=con embalse, NV=nivel variable en el embalse

Figura II 12. Nivel del lecho para 0 y 80 años y nivel del agua NA para diferentes caudales

Tabla II 6. Perfil hidráulico e incremento del nivel de agua entre Jirau y Riberão, condición actual y con embalse de nivel variable, $Q = 40000 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	NA actual	NA Embalse sin sediment.	Incremento NA Embalse sin sedimentos	NA con embalse sediment. a los 20 años	Incremento NA con embalse sediment. a los 20 años	NA con embalse sediment. a los 40 años	Incremento NA con embalse sediment. a los 40 años	NA con embalse sediment. a los 80 años	Incremento NA con embalse sediment. a los 80 años
405	101.07	101.35	0.28	101.93	0.86	102.40	1.33	103.15	2.08
398	100.42	100.74	0.32	101.40	0.98	101.91	1.49	102.70	2.28
396	100.09	100.65	0.56	101.16	1.07	101.68	1.59	102.47	2.38
394.1	99.86	100.52	0.66	101.09	1.23	101.62	1.76	102.42	2.56
392.1	99.79	100.21	0.42	100.81	1.02	101.33	1.54	102.12	2.33
391.1	99.59	100.20	0.61	100.80	1.21	101.33	1.74	102.15	2.56
387.1	99.48	100.07	0.59	100.50	1.02	100.96	1.48	101.72	2.24
385.1	99.31	99.81	0.50	100.31	1.00	100.81	1.50	101.61	2.30
383.1	99.07	99.80	0.73	100.30	1.23	100.79	1.72	101.53	2.46
380.1	98.78	99.57	0.79	100.02	1.24	100.48	1.70	101.27	2.49
378.1	98.65	99.60	0.95	100.08	1.43	100.55	1.90	101.33	2.68
376.1	98.40	99.41	1.01	99.84	1.44	100.26	1.86	101.05	2.65
375	98.38	99.45	1.07	99.90	1.52	100.35	1.97	101.15	2.77
374.1	98.33	99.37	1.04	99.80	1.47	100.21	1.88	100.98	2.65
372	98.15	99.19	1.04	99.63	1.48	100.04	1.89	100.87	2.72
370.1	98.02	99.11	1.09	99.55	1.53	99.93	1.91	100.70	2.68
369	98.00	99.07	1.07	99.50	1.50	99.86	1.86	100.66	2.66
364.1	97.70	98.78	1.08	99.23	1.53	99.58	1.88	100.30	2.60
360.1	97.52	98.65	1.13	99.10	1.58	99.43	1.91	100.14	2.62
357.1	97.35	98.43	1.08	98.89	1.54	99.23	1.88	99.94	2.59
355.1	97.16	98.34	1.18	98.81	1.65	99.14	1.98	99.81	2.65
353.1	97.04	98.24	1.20	98.72	1.68	99.06	2.02	99.72	2.68
350.1	96.76	98.08	1.32	98.56	1.80	98.91	2.15	99.52	2.76
347.1	96.66	97.99	1.33	98.48	1.82	98.84	2.18	99.47	2.81
344.1	96.54	97.67	1.13	98.19	1.65	98.56	2.02	99.16	2.62

Evaluación preliminar de impactos del complejo hidroeléctrico del río Madera - 34

341.1	96.18	97.46	1.28	97.99	1.81	98.37	2.19	99.01	2.83
338	96.14	97.25	1.11	97.80	1.66	98.17	2.03	98.74	2.60
334.1	95.91	97.07	1.16	97.63	1.72	98.01	2.10	98.57	2.66
330.1	95.65	96.78	1.13	97.37	1.72	97.76	2.11	98.26	2.61
329	95.56	96.71	1.15	97.30	1.74	97.70	2.14	98.20	2.64
327	95.38	96.52	1.14	97.13	1.75	97.53	2.15	98.00	2.62
320	94.95	96.17	1.22	96.81	1.86	97.23	2.28	97.69	2.74
315	94.76	95.97	1.21	96.57	1.81	96.98	2.22	97.43	2.67
309	94.39	95.62	1.23	96.21	1.82	96.61	2.22	97.05	2.66
306	93.89	95.22	1.33	95.85	1.96	96.28	2.39	96.73	2.84
301	93.14	94.84	1.70	95.45	2.31	95.86	2.72	96.29	3.15
292	92.15	94.16	2.01	94.58	2.43	94.91	2.76	95.30	3.15
286	91.49	93.62	2.13	93.91	2.42	94.18	2.69	94.54	3.05
283	90.93	93.36	2.43	93.61	2.68	93.82	2.89	94.14	3.21
279	90.47	93.09	2.62	93.34	2.87	93.54	3.07	93.85	3.38
272	89.24	92.28	3.04	92.55	3.31	92.76	3.52	93.10	3.86
267	88.17	91.67	3.50	91.96	3.79	92.20	4.03	92.56	4.39
258	87.39	91.52	4.13	91.81	4.42	91.99	4.60	92.27	4.88
256	87.32	91.43	4.11	91.52	4.20	91.70	4.38	91.98	4.66
255	87.25	91.45	4.20	91.62	4.37	91.80	4.55	92.09	4.84
253	87.05	91.27	4.22	91.37	4.32	91.51	4.46	91.74	4.69
243	86.72	91.05	4.33	91.13	4.41	91.24	4.52	91.48	4.76
228	86.24	90.72	4.48	90.74	4.50	90.75	4.51	90.76	4.52
211	85.44	90.48	5.04	90.48	5.04	90.48	5.04	90.48	5.04
210	84.63	90.00	5.37	90.00	5.37	90.00	5.37	90.00	5.37

Según el modelo STA, el sedimento que se depositaría en el lecho del río Madera al entrar en operación la represa de Jirau está formado ante todo por arenas del mismo orden de tamaño que el lecho original. El tamaño varía de una sección a otra, lo que es razonable por la variación en las condiciones hidráulicas. En el subtramo inferior más cercano a la represa, entre las secciones 211 y 309, el sedimento depositado es

más fino ($d_{50}=0.12$ mm) que en el subtramo superior ($d_{50}=0.24$ mm). Todo el material transportado grueso (arenas gruesas y gravas finas) se deposita en este último.

La figura II.13 muestra la variación de los niveles de agua con el tiempo en la sección 338, que corresponde a la estación de Abuná-Vila. El incremento brusco que se observa el primer año corresponde a la entrada en operación de la represa, por efecto del remanso hidráulico estudiado en el capítulo 3. Esa sobre-elevación inicial es más importante para caudales bajos y medios.

Lo destacable es que la sedimentación inducida por el embalse afecta más a los niveles de agua que se producen para caudales altos. Por ejemplo, en la sección 338 la sobre-elevación atribuible al remanso hidráulico sin sedimentos era de menos de 1 m para el caudal de $40000\text{ m}^3/\text{s}$ (tabla II.4) y estaba cerca de 2.0 m para los caudales de 5000 y $18000\text{ m}^3/\text{s}$. La figura 2.13 muestra que a partir del año 1, la sobre-elevación del nivel de agua para el caudal de $40000\text{ m}^3/\text{s}$ se incrementa con el tiempo, hasta alcanzar en 80 años los 2.75 m. En cambio, para el caudal de $5000\text{ m}^3/\text{s}$ el incremento con el tiempo del nivel de agua es mucho más modesto: de algo menos de 2 m el año 1 a un poco más de 2.5 m el año 80.

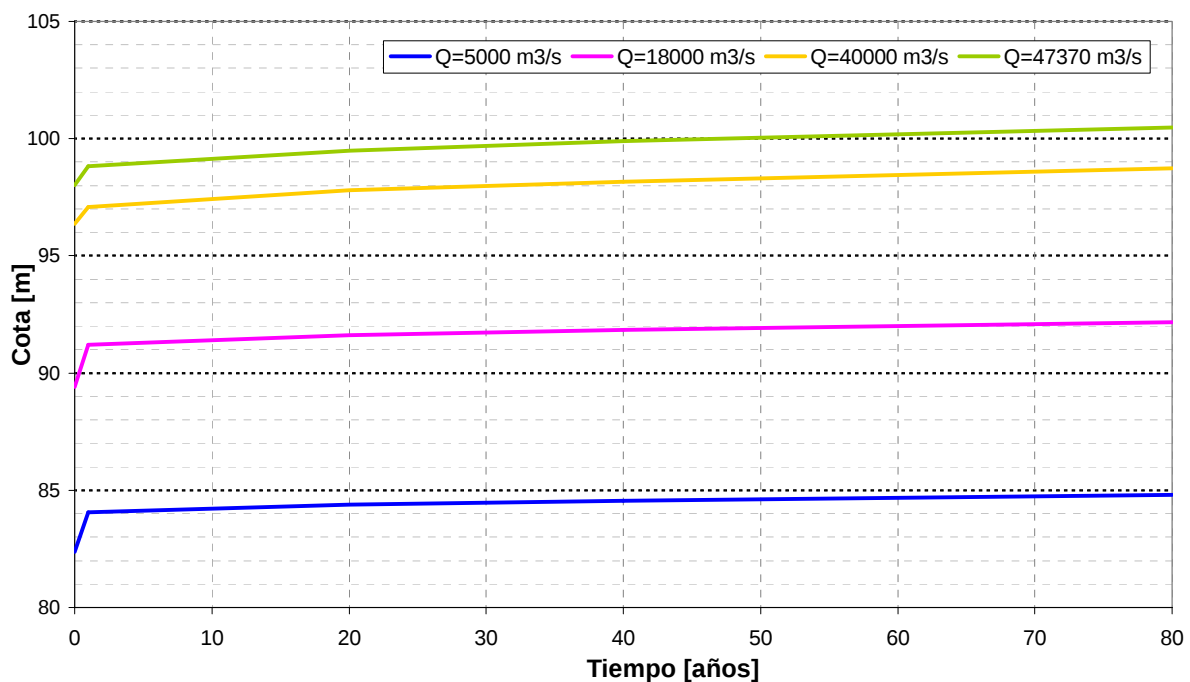


Figura II 13. Evolución del nivel de agua del río Madera en Abuná-Vila (sección 338) después de la instalación de la central de Jirau

Se realizó también un análisis de sensibilidad para el caudal sólido y el tamaño de los sedimentos. De los varios casos estudiados, merece destacarse el de aumento de caudal sólido en un 50%. El valor de 50% proviene de los resultados de Filizola *et al* (1999) para el río Madera en Fazenda Alegre. El lecho calculado con el modelo STA para ese caudal se llevó a HEC-RAS para calcular los perfiles hidráulicos correspondientes. Como ejemplo, en la sección 338 el incremento del nivel de agua con respecto al nivel de agua actual es de 3.76 m para $Q=40000 \text{ m}^3/\text{s}$, de 3.80 m para $Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$ y de 3.67 m para el caudal de $47370 \text{ m}^3/\text{s}$. Estos valores están alrededor de 1 m por encima de los niveles estimados para el caudal sólido medio (tablas II.6 y figura II.13).

II.4 Conclusiones

II.4.1 Sobre el efecto de remanso hidráulico de las represas

Sin considerar la posible sedimentación en los embalses, las principales conclusiones fueron:

- El embalse de Jirau, aún sin considerar sedimentación y aplicando la curva de operación con niveles variables, afectará los niveles de agua y velocidades en el tramo binacional, entre la confluencia con el río Abuná (sección 329.2) y la cachuela Riberão (sección 398), y muy probablemente hasta la cachuela Madera (sección 418.1).
- Debido al efecto de remanso hidráulico provocado por la represa, la sobre-elevación de los niveles de agua en el tramo binacional es más grande para caudales bajos y medios que para caudales altos. En la confluencia con el río Abuná (sección 329), en el extremo aguas abajo de ese tramo, se estimó una sobre-elevación de 1.95 m para los caudales de $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ (mínimo medio mensual) y $18000 \text{ m}^3/\text{s}$ (cercano al medio anual). En esa sección y para el caudal de $40000 \text{ m}^3/\text{s}$ (ligemente mayor a la crecida media anual), la sobre-elevación estará en el orden de 1.15 m.
- Para caudales bajos y la curva de operación de niveles variables, el efecto de remanso hidráulico del embalse es perceptible solamente hasta la cachuela de Riberão (sección 405), es decir 75 km aguas arriba de la confluencia con el río Abuná. Para caudales medios y altos, la sobre-elevación del nivel de agua se extiende más allá, al menos hasta el pie de la cachuela Madera (sección 418.1), aunque es atenuada a partir de Riberão.

- La sobre-elevación de los niveles en el tramo binacional tendrá dos consecuencias directas:
 - a) Disminuir la carga hidráulica y por tanto provocar la pérdida de energía potencial del tramo binacional. Un cálculo preliminar basado en los caudales medios mensuales permite estimar en 2137 GWh la energía media anual que perdería el tramo binacional. En términos de potencia eso equivale a un valor de 244 MW. La constitución brasileña en su artículo 20, define a la energía potencial hidráulica como un “bien de la Unión”, junto con las corrientes de agua en su territorio o que provengan o sirvan de límite con un territorio extranjero, por lo que la pérdida que sufrirá Bolivia viola la propia constitución brasileña.
 - b) Incrementar los riesgos de inundación en el tramo binacional. Esto se puede ilustrar con el caso de la Capitanía boliviana de Puerto Manoa (figuras II.5 y II.6), situada frente a la estación hidrométrica de Abuná-Vila (sección 338). El desborde en Puerto Manoa se inicia con un caudal de aproximadamente 40000 m³/s. La figura II.9, con la curva correspondiente a un nivel de operación de 90.0 m en el embalse de Jirau, muestra que el desborde se produciría con un caudal de solamente 35000 m³/s, que se presenta con más frecuencia (o que tiene una probabilidad de ocurrencia más alta).

En resumen, aún sin considerar sedimentación y aplicando un nivel de operación variable en el embalse de Jirau, las características hidrodinámicas del tramo entre Santo Antonio y Villa Bella cambiarán considerablemente. Habrá también una sobre-elevación del nivel del agua en el tramo binacional para todos los caudales, lo que quitará carga hidráulica e incrementará los riesgos de inundación en ese tramo.

II.4.2 Sobre el efecto de sedimentación inducido por el embalse de jirau

- No se observa una tendencia a la sedimentación para el conjunto del tramo Jirau-Riberão en condiciones naturales. No es posible comparar o evaluar los resultados de los estudios de Furnas-Odebrecht (2005, 2006), que sí detectan esa tendencia, porque esos estudios no especifican condiciones fundamentales de la modelación, como por ejemplo la ecuación de transporte empleada.
- La represa de Jirau, operada según una curva guía que establece un régimen de nivel variable, favorecerá un proceso de sedimentación para el conjunto del tramo Jirau-Riberão. Ese proceso no es uniforme a lo largo del tramo, lo que se explica en primer lugar por la variación espacial de las condiciones hidrodinámicas que se presentan tanto en condiciones naturales como con represa. Habrá sectores donde existirá deposición de sedimentos y otros en que no.

- No se observó diferencias significativas en la magnitud de la sedimentación, entre la condición de embalse funcionando a nivel variable y la condición de funcionamiento a nivel constante de 90.0 m. Probablemente esto se debe a que la curva guía establece un nivel de 90.0 m durante los meses de enero a abril y de 89.5 m en mayo, meses en que el río transporta 84% de la carga anual de sedimentos.
- La modelación con STA predice una tasa de sedimentación relativamente baja en el embalse de Jirau, lo que significa que el proceso de sedimentación será relativamente lento. Se estimó una tasa considerablemente más baja que los estudios de Furnas-Odebrecht (2005, 2006), sin que sea posible una comparación por las mismas razones expuestas anteriormente.
- Debido en parte a esa baja tasa de sedimentación, el proceso de deposición inducido por el embalse no se detendría al cabo de 20 años, como lo estimaron inicialmente los estudios de factibilidad (2004). El proceso continuaría más allá de los 80 años del periodo de simulación de 80 años que se usó en el estudio. La tasa de sedimentación se reduce con el tiempo, pero a un ritmo lento.
- Por las condiciones impuestas al modelo y por las características morfológicas del lecho del río, el sedimento depositado está formado por arenas. El tamaño varía según la distancia a la represa. Las arenas más finas se depositarían cerca de la represa, mientras que en el extremo superior o “cola” del embalse predomina la deposición de arenas medias y del material más grueso que transporta el río. La cola del embalse de Jirau se extiende al tramo binacional, al menos hasta la cachuela de Riberão, donde habrá también deposición de sedimentos inducida por el embalse.
- Como consecuencia de la sedimentación, existirá una sobre-elevación de los niveles de agua, adicional a la que provoca el embalse no sedimentado. Esa sobre-elevación será especialmente notoria en el tramo binacional arriba de la confluencia con el río Abuná.
- La sobre-elevación de los niveles de agua atribuible a la sedimentación es gradual en el tiempo. Es decir el nivel del agua irá aumentando con el paso de los años a medida que aumenta el nivel del lecho del río como resultado de la deposición. Es probable que ese aumento sea casi imperceptible en los primeros años de funcionamiento del embalse.
- Por las características hidráulicas del río y del proceso de sedimentación, la sobre-elevación será más grande para caudales medios y altos que para caudales bajos. Por ejemplo, para un caudal de 40000 m³/s, próximo a la crecida media anual, el modelo predice una sobre-elevación del nivel del agua

al pie de la cachuela de Riberão de 2.28 m, frente a los 0.32 m de sobre-elevación en el caso de embalse sin sedimentos.

- La sobre-elevación de los niveles de agua en el tramo binacional atribuible a la sedimentación, amplificará las dos consecuencias directas que fueron identificadas para el caso de embalse no sedimentado. Es decir provocará una pérdida más grande de energía potencial en el tramo binacional, que podría superar el equivalente de 400 MW medios al cabo de 80 años. Por otro lado incrementará los riesgos de inundación en crecidas, al subir aún más los niveles de agua para caudales equivalentes. Para evaluar la magnitud de esos riesgos y ubicar las zonas más expuestas se necesitan datos topográficos más completos, que aún no están disponibles.

Los resultados del análisis de remanso hidráulico para el caso de embalse no sedimentado pueden ser sustentados cuantitativa y cualitativamente. Es decir, su rango de incertidumbre es pequeño. Además debe destacarse que los efectos del embalse en este caso serán evidentes desde el primer año de operación de los embalses.

En cambio, los resultados del análisis de sedimentación en el embalse de Jirau tienen un grado de incertidumbre más grande, debido también a la incertidumbre en la información de entrada. Sin embargo, los resultados obtenidos con la modelación son consistentes, incluyendo las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad. Es decir, existe una alta probabilidad de que las predicciones del análisis sean válidas, al menos cualitativamente. A diferencia del caso anterior, el efecto sobre los niveles de agua será gradual en el tiempo.

II.5 Referencias

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

Guyot, J.L., 1992: Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, Francia.

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.

Guyot, J.L., Filizola, N. Laraque, A. Seyler, P., 1999. La variabilité saisonnière des flux sédimentaires dans le bassin de l'Amazonie. Proceedings of the Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus 99.

Filizola, N., Guyot, J.L., Boaventura, G. 1999. Fluxo de sedimentos em suspensão na Amazônia - uma análise a partir da base de dados da ANEEL. Proceedings of the Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus 99.

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

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

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

Furnas, Odebrecht, 2005. Estudos de Impacto Ambiental, Rio Madera – RO. Mayo 2005.

Furnas, Odebrecht, 2006. Complementação e adequação dos estudos ambientais dos aproveitamentos hidrelétricos Santo Antônio e Jirau, Rio Madeira, Rondônia, Tomo I: Meio Físico. Agosto 2006.

Furnas, Odebrecht, 2007. Estudos de Viabilidade do AHE Santo Antonio, Relatório Complementar. Marzo 2007.

Molina, J., Ledezma, F., Vauchel, P., 2008. Estudio del río Madera: Remanso hidráulico y sedimentación. La Paz, Bolivia, julio 2008.

Reid, L.M y Dunne, T., 1996. Rapid Evaluation of Sediment Budgets, Geo-Ecology Texts, Catena-Verlag, Reiskirchen, Germany, 1996, pp 93-112.

SENAMHI-ENDE, 2007. Secciones transversales en los ríos Madera y Abuná. Topografía y batimetría. Noviembre 2007.

Vauchel, P., 2008. Estudio hidrológico de la confluencia del Río Madera, informe interno. Mayo 2008.

III - Evaluación de las llanuras de inundación por teledetección

Alex Ovando & Jean-Michel Martínez

III.1 Introducción

La comprensión y conocimiento de los procesos concernientes a la dinámica de inundaciones en los ríos tributarios del Madera es de enorme relevancia para visualizar los posibles impactos de proyectos hidroeléctricos en la región. Varios estudios demuestran que los complejos ecosistemas resultantes de la interacción agua, suelo y vegetación juegan un papel trascendental en la amazonia: las diferentes unidades de vegetación están relacionadas en gran medida a la temporalidad de las inundaciones (Martinez & Le Toan 2007; Navarro & Ferreira 2007). Asimismo, importantes procesos biogeoquímicos y ecológicos están gobernados por las dinámicas de inundaciones, tal como el transporte de nutrientes y el ciclo del carbono (Richey *et al.* 2002 citado por Martinez & Le Toan 2007). También los flujos de sedimentos al interior de las cuencas amazónicas se encuentran ligados a las inundaciones ya que las llanuras de inundación se constituyen en espacios naturales de deposición de sedimentos, aspecto que también está en íntima relación con la movilización de metales pesados (Guimaraes, Meili *et al.* 2000; Roulet & Grimaldi 2001; Ovando 2008)

Estableciendo diferentes escenarios de cambios hidrológicos y de dinámica de las inundaciones (duración y extensión), en todo el tramo susceptible a ser influenciado por los proyectos hidroeléctricos, se avanza en sentido de brindar elementos de decisiones y estrategias orientadas a un adecuado manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos.

III.2 Área de estudio

El área considerada en este estudio comprende a la porción Noreste de la cuenca del río Madera, a partir de la confluencia de los ríos Madera y Abuna en el Norte, el río Beni al Oeste, la confluencia Mamoré-Itenez al Sur y las subcuencas de los ríos Pakaa y Ouro Preto al Este.

Con una extensión total de 97800 km², abarca aproximadamente hasta 417 km aguas arriba del futuro sitio de emplazamiento de la represa Jirau. Comprende porciones de las cuencas de 10 diferentes tributarios principales y secundarios del río Madera: Madera (Bolivia-Brasil), Abuna (Bolivia-Brasil), Beni (Bolivia), Mamoré (Bolivia), Itenez (Bolivia-Brasil), Ouro Preto, (Brasil), Pakaa (Brasil), Madre de Dios (Bolivia), Orthon (Bolivia) y Yata (Bolivia).

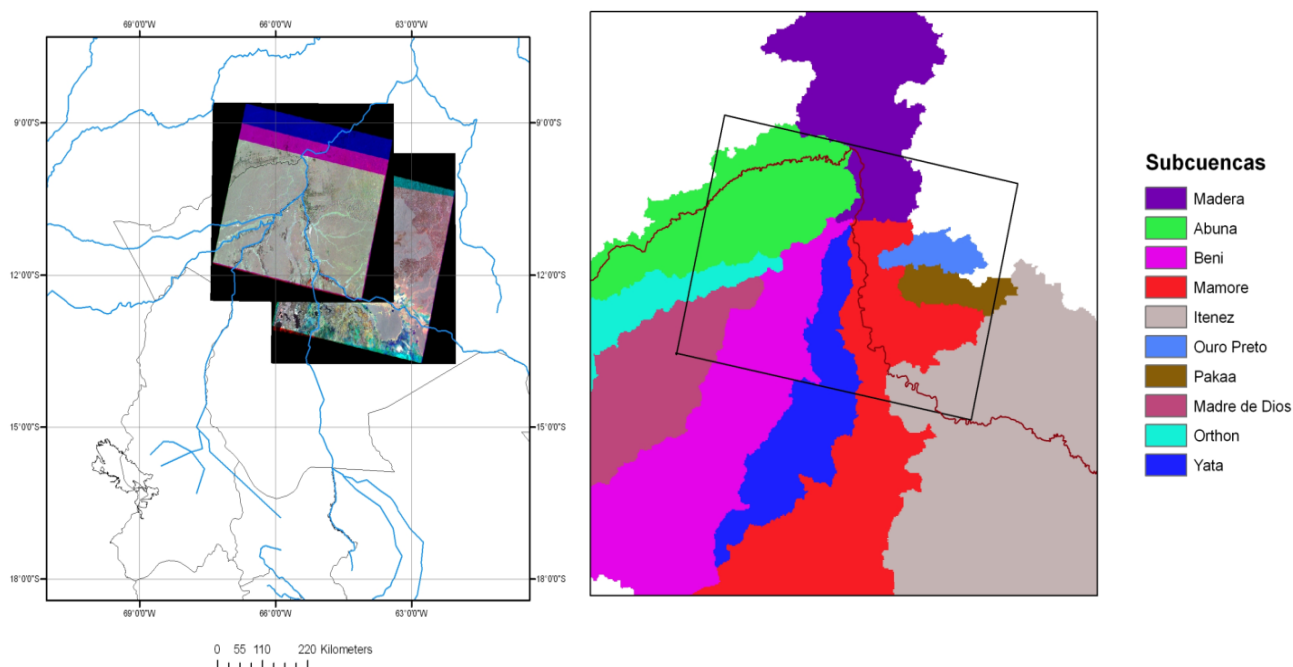


Figura III 1. Cobertura de estudio y subcuencas

III.3 Método

Conceptualmente el enfoque metodológico del presente estudio está centrado en dos etapas: la primera relativa al estudio de las condiciones actuales (escenario sin proyecto) de la dinámica de inundaciones en ríos tributarios del Madera y la segunda correspondiente al análisis de las posibles variaciones de estos ciclos naturales debido a la implementación del complejo hidroeléctrico proyectado.

La identificación y cartografía de las diferentes unidades de vegetación y la dinámica de inundaciones se realizaron mediante la clasificación y análisis multitemporal de imágenes radar del sensor ALOS-PALSAR¹. Utilizando una serie de 12 imágenes

¹ Sensor PALSAR “Phased Array L-Band Syntethic Aperture Radar” montado en el satélite ALOS de la Agencia Japonesa de prospección espacial JAXA

teniendo una cobertura temporal del 11/11/06 a 29/03/08. Una de las más notorias características de las inundaciones en la porción baja de los tributarios del río Madera es que las extensas llanuras de inundación interactúan temporalmente con la vegetación existente, grandes extensiones de bosques ribereños y sabanas están sujetas a inundaciones temporales, es por ello que la utilización de datos radar, sensibles a detectar agua por debajo del dosel de la vegetación, se adecua al propósito de identificar la dinámica de inundaciones en estas unidades.

Inicialmente, en base a cálculos estadísticos de los valores digitales de la serie temporal de imágenes, se efectuó un proceso de segmentación del área de estudio a fin de contar con unidades espaciales de análisis, que corresponden en gran parte a tipo de vegetación o de uso de suelo. Posteriormente, se calculó la media del coeficiente de retrodispersión, en decibeles (dB), del conjunto de píxeles de cada unidad espacial y para cada fecha de la serie temporal, estos valores permitieron calcular el indicador de la intensidad de cambio correspondiente a cada unidad espacial. Paralelamente la interpretación de la respuesta espectral de la serie de imágenes expresada dB en diferentes zonas de interés, permitió establecer rangos para la identificación de las diferentes clases de vegetación. Finalmente en base a los rangos mencionados y al indicador de la intensidad de cambio, se asignó una clase a cada unidad espacial (agua, bosque inundable, bosque no inundable, sabana o área deforestada no inundable, sabana no inundable, sabana o bosque inundable, sabana inundable, bosque o sabana permanentemente inundada)

Es así, que a partir de las imágenes radar, se produjeron dos tipos de clasificación: 1) mapa de la extensión máxima de las inundaciones 2) mapas de la dinámica de las inundaciones en relación a los niveles de agua para diferentes ríos (Abuna, Madera, Mamoré, Itenez Guaporé).

Datos de caudales y niveles de agua, tanto de mediciones in situ como de sensores remotos (datos altimétricos satelitales (Envisat), sobre diversos puntos en ríos del área de estudio son utilizados a fin de poder caracterizar el componente hidrológico de los diferentes ríos en el área de estudio y relacionarlo con la dinámica de inundaciones (Figura III.2). En tal sentido se utilizaron series temporales niveles de agua de las estaciones de Guayaramerin en el río Mamoré, Placido Casim en el río Abuna, Príncipe da Veira en el río Itenez y Porto Velho en el río Madera.

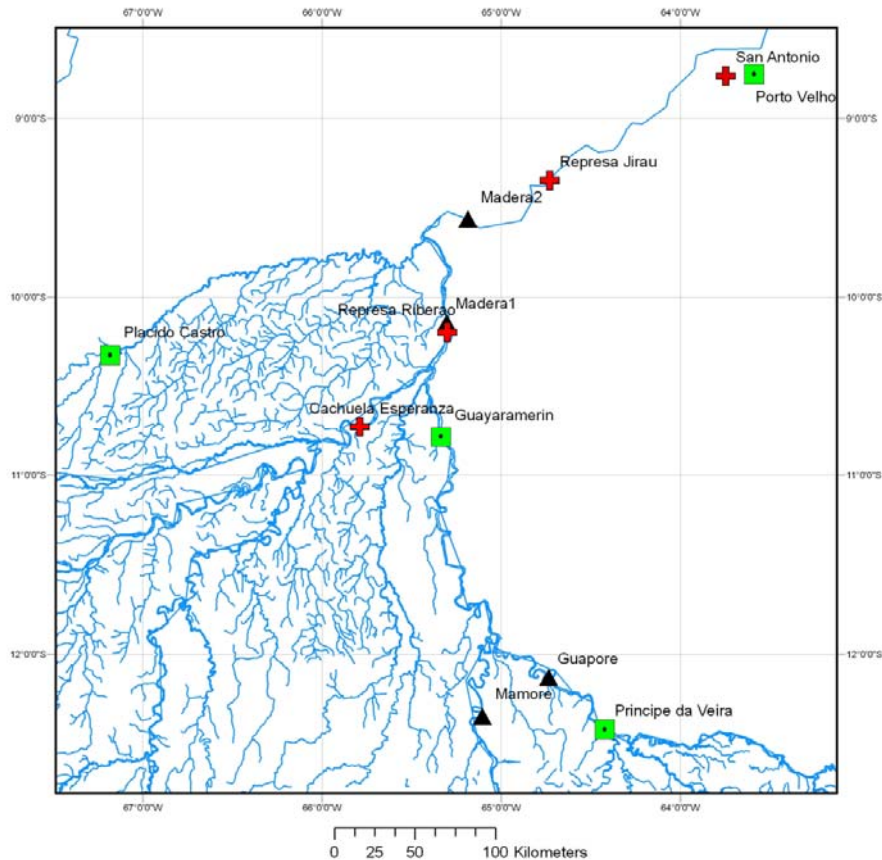


Figura III 2. Localización de estaciones limnimétricas y estaciones virtuales (Envisat)

Cuadrados = estaciones limnimétricas; triángulos = estaciones virtuales altimétricas; cruces = localización de las represas proyectadas

III.4 Ciclo hidrológico

Las mediciones altimétricas puntuales del satélite Envisat muestran similitudes y diferencias entre los ciclos hidrológicos de los ríos en el área de estudio, si bien todos se caracterizan por tener una marcada temporada de aguas altas y bajas, cada uno de ellos presenta rangos de niveles bastante bien diferenciados. La figura II.3 presenta las variaciones de nivel absolutas de los principales ríos considerados en este estudio. Se puede apreciar el descenso de los niveles desde los puntos más altos Mamoré y Guaporé (Iténez) hasta el punto “Mamoré2”, que se encuentra en territorio brasileiro (figura II.2, p. 46), que es el más bajo presentando también variaciones menos marcadas. En los puntos “Madera1” y “Guaporé”, cerca de la confluencia de estos ríos, la variación de los niveles durante el ciclo hidrológico es

más notable. Los niveles absolutos altimétricos Envisat están referenciados en un sistema distinto al usado en los estudios de factibilidad y de impacto ambiental, lo que dificulta el uso de estos datos para la interpretación de la dinámica de inundación pero reflejan las variaciones de altitud a lo largo del ciclo hidrológico de manera precisa. En la figura II.3 también se observa gráficamente la cobertura temporal de la serie de imágenes ALOS-PALSAR utilizadas (números 1 al 7).

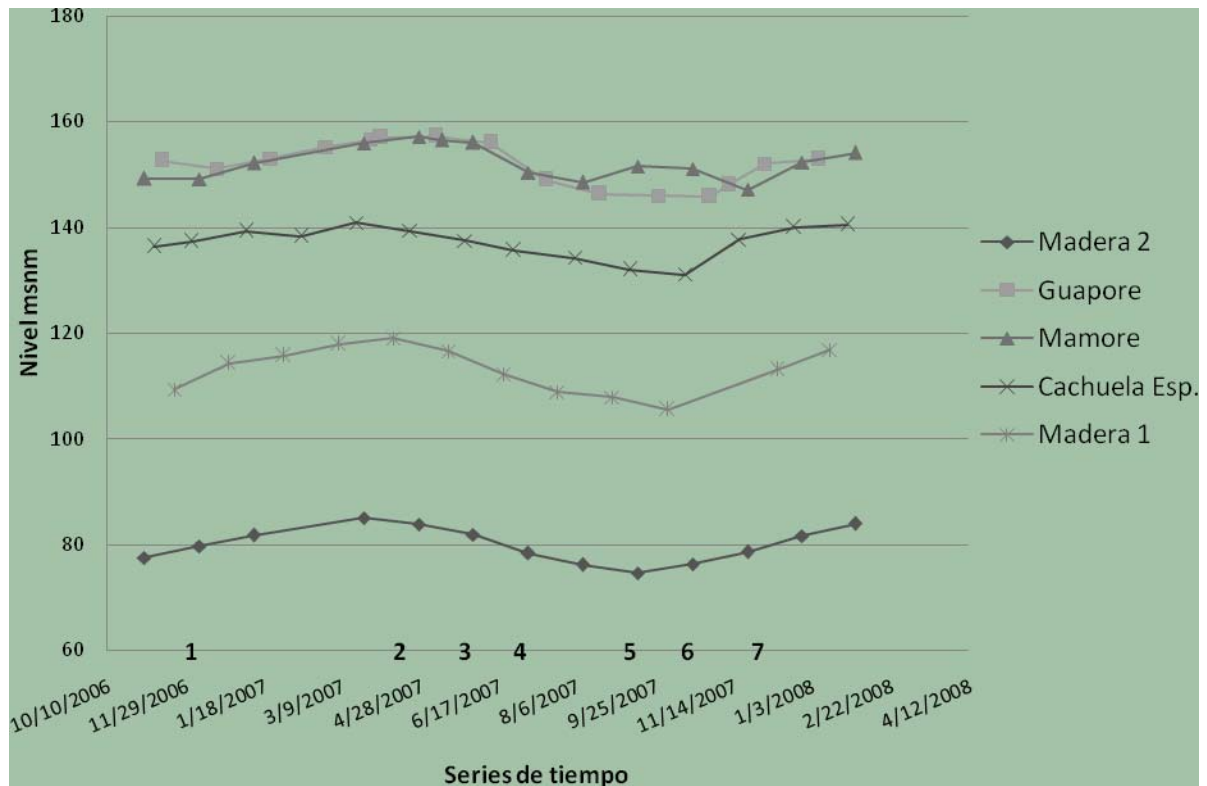


Figura III 3 Variación anual del nivel de agua en diferentes ríos datos altimétricos (Envisat)

El comportamiento temporal de los ríos Abuna y Madera representado en base a mediciones limnimétricas, se muestra en la figura III.4. Se observa una diferencia entre los picos de ambos gráficos: en el río Madera los niveles máximos son alcanzados en Abril mientras que en el río Abuna se tienen los más altos niveles en Marzo. Se observa también una diferencia con los ciclos hidrológicos del Mamoré cuyo pico es en Mayo. Estas diferencias apuntan a que la dinámica de inundaciones a lo largo del tramo comprendido entre ambos puntos de medición varía también en función de los niveles del río en la escala temporal.

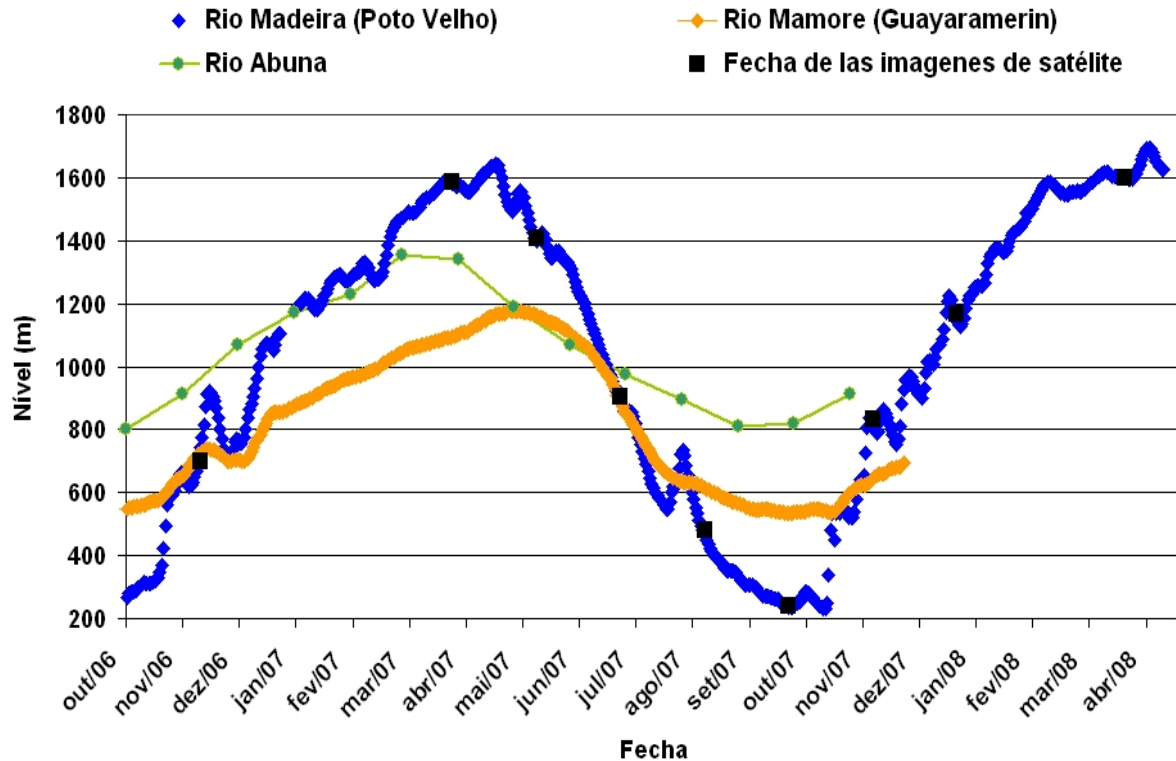


Figura III 4. Variación anual del nivel de agua ríos Abuna y Madera

III.5 Respuestas espectrales en las áreas inundadas

Luego de un primer análisis de los rasgos espectrales de las imágenes, se pueden observar diferentes patrones de comportamiento, representados como coeficiente de retrodispersión (dB), para diferentes unidades de vegetación. Estas diferencias se atribuyen principalmente a las variaciones de rugosidad de la superficie determinadas por la cobertura vegetal existente. Las variaciones del mencionado coeficiente a lo largo de un ciclo hidrológico para una misma unidad de vegetación se deben principalmente a la presencia de agua en el suelo, provenga esta de inundaciones de desborde del río, lluvias o elevados niveles de la capa freática. En la figura III.5, se pueden observar estas variaciones diferenciándose claramente la respuesta de un bosque no inundable otro bosque sujeto a inundaciones temporales y suelo sin cobertura.

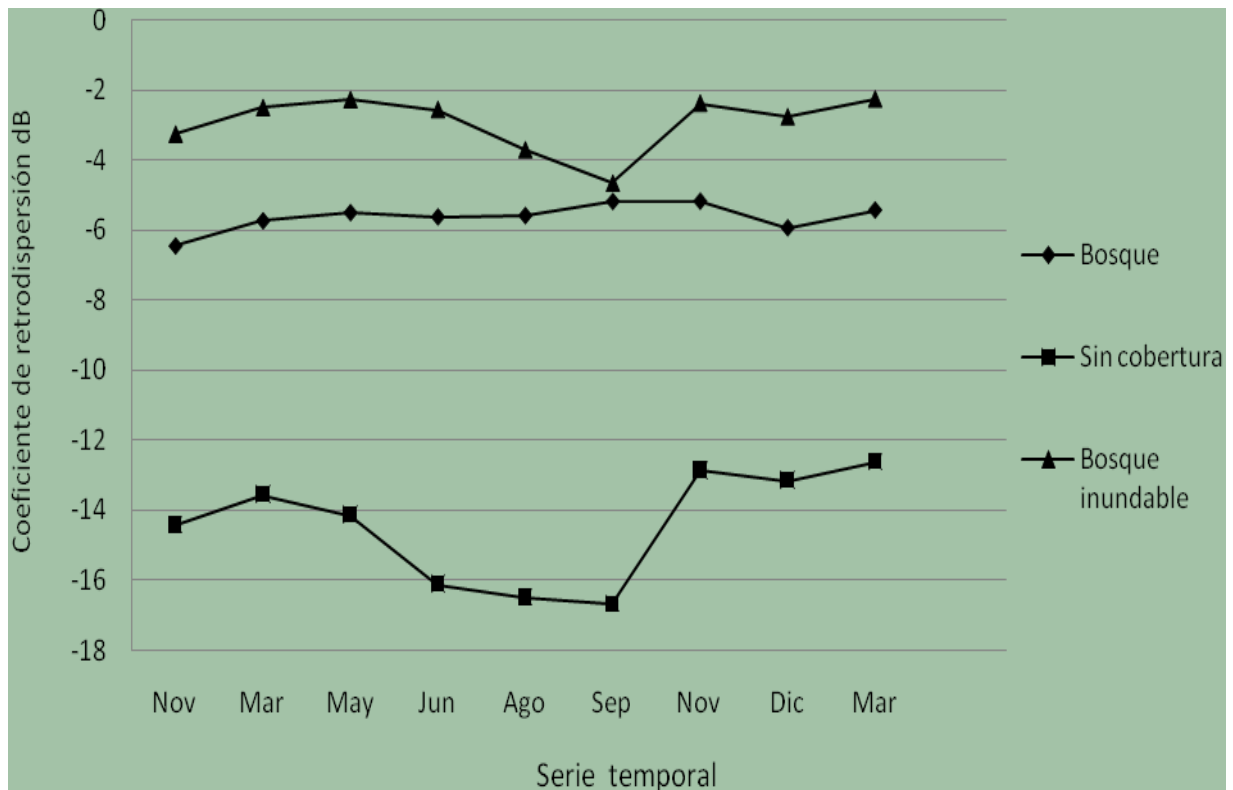


Figura III 5. Variaciones del coeficiente de retrodispersión a lo largo de la serie tiempo para diferentes unidades de terreno.

Asimismo, existen diferentes respuestas espectrales de las unidades de vegetación entre cada uno de los ríos considerados. Verificándose de esta manera, diferentes dinámicas de inundación entre los ríos del área de estudio. La respuesta temporal de los bosques inundables indica claramente esta situación, de acuerdo a la figura III.6, puede interpretarse que los bosques del río Mamoré permanecen inundados por más tiempo y no presentan un descenso marcado de las aguas como ocurre entre Marzo y Agosto en los otros ríos. En el caso del río Guaporé las inundaciones permanecen hasta el mes de mayo y empieza el descenso alcanzando niveles entre -7 y -6 dB entre Agosto y Diciembre, valores que (en bosques) indican que no hay inundación.

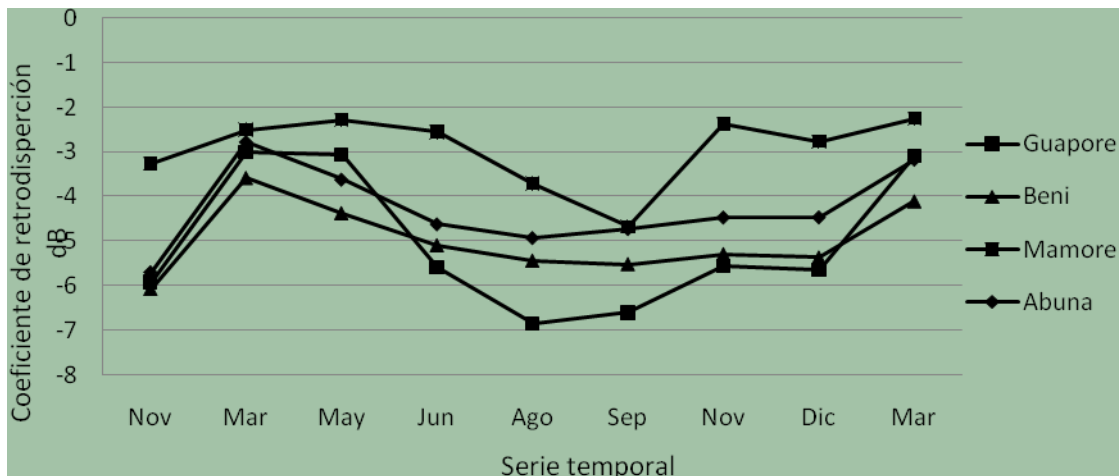


Figura III 6. Variaciones del coeficiente de retrodispersión a lo largo de la serie temporal para unidades de bosque inundado en diferentes ríos

Estas observaciones sirven de base para clasificar las zonas de inundaciones a partir de las imágenes radar. Permittiéndonos producir dos tipos de clasificación: 1) mapa de la extensión máxima de las inundaciones para cada río 2) mapas de la dinámica de las inundaciones en relación a los niveles de agua para cada subcuenca (Abuna, Beni, Madera, Yata; Guaporé).

III.6 Cobertura y extensión de las inundaciones

Los resultados de la clasificación de la serie de imágenes, se muestran en la figura III.7), donde se pueden apreciar las diferencias en cobertura (unidades de vegetación) y la extensión máxima de las inundaciones. A fin de simplificar la visualización y reducir fuentes de error en cálculos posteriores, se han excluido las áreas con intensa intervención antrópica (principalmente en el lado brasileiro) y con pendientes pronunciadas. Es evidente que la extensión de terreno susceptible de inundarse, es de gran magnitud a lo largo de toda el área de estudio, se observa que las zonas inundables se encuentran, en algunos casos, a una considerable distancia de los ríos (hasta 30 km de ambas orillas), situación que indica la amplia difusión de la inundación con respecto al cauce principal de los ríos, asimismo unidades de bosque inundable se encuentran distribuidas a mayores distancias de los cauces principales, señalando la influencia de tributarios menores o acuíferos en los ciclos de inundación.

También es posible observar que existe mayor complejidad en la distribución espacial de las diferentes unidades y mayor superficie inundable en las zonas cercanas a la zona de confluencia Itenez-Mamoré. Ello señala que la compleja interacción de flujos entre estos ríos tiene un efecto en la difusión de las inundaciones y consecuentemente en la distribución de las diferentes unidades de vegetación. Una situación similar, aunque en menor escala, se puede ver en otras zonas de confluencia como la de Beni, Madre de Dios y Orthon.

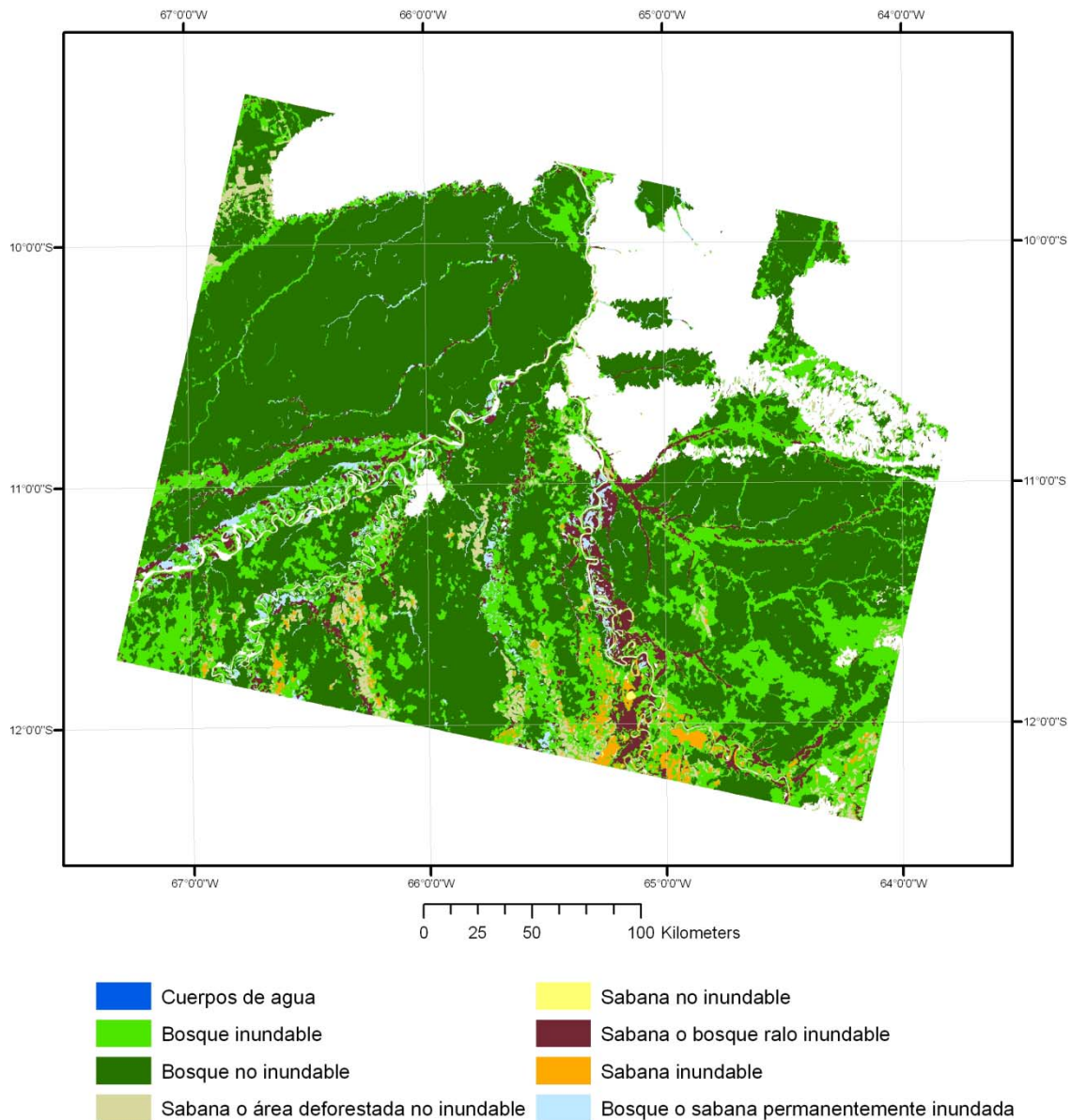


Figura III 7. Mapa cobertura y extensión de las inundaciones

A continuación se muestra un resumen de la información mostrada en el mapa precedente, se pueden ver detalles de la distribución de cada una de las unidades de vegetación en cada una de las subcuencas comprendidas en el área de estudio.

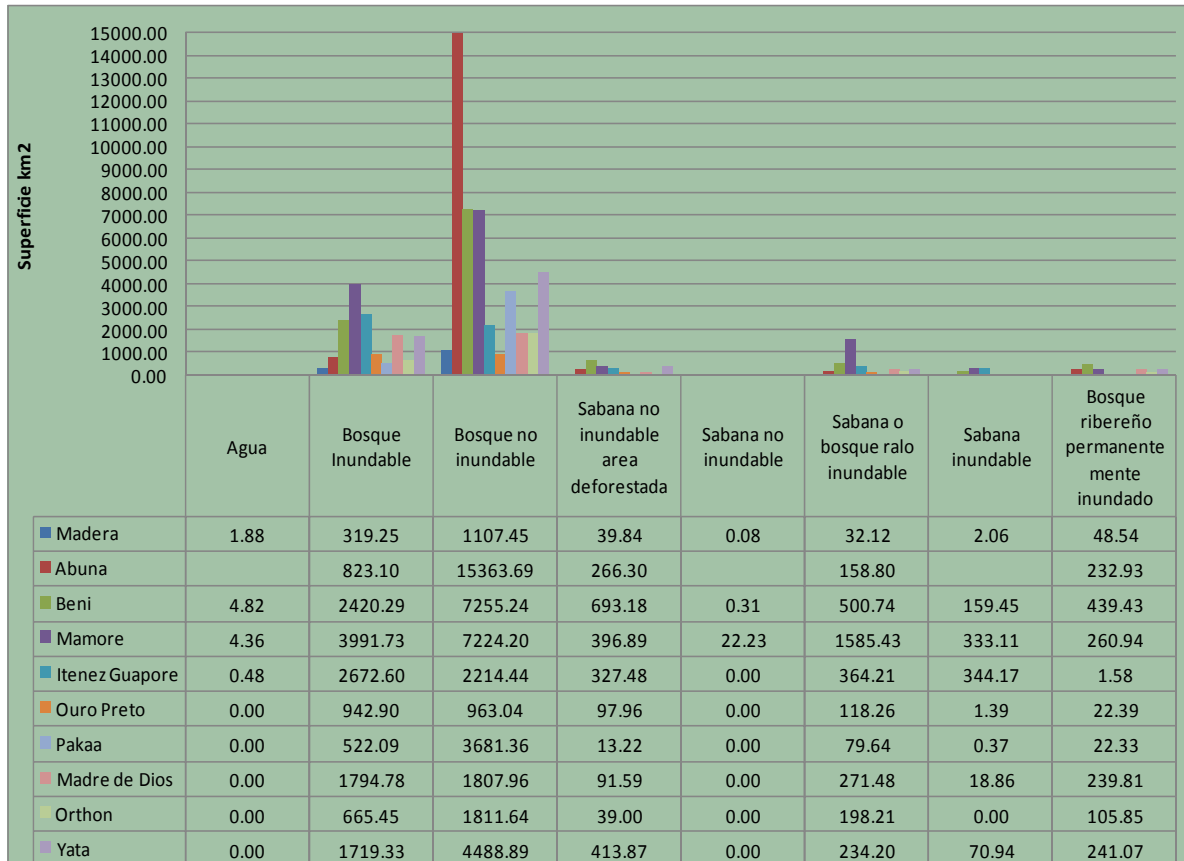


Tabla III 1. Resumen de cobertura y extensión de las inundaciones por subcuenca en el área de estudio

III.7 Dinámica de las inundaciones

El comportamiento de las inundaciones a lo largo del ciclo hidrológico se muestra en la figura III.8. Si bien el mapa precedente representa las áreas susceptibles a ser inundadas, aquí se incluye el factor temporal identificando cuándo estas áreas se inundan en respuesta a incrementos de caudales y consecuentemente niveles de agua en los diferentes ríos. Bajo una secuencia lógica, las extensiones inundadas se extienden a medida que los niveles de agua suben en los ríos, llegándose prácticamente a cuadruplicar en el punto alto del ciclo (Marzo).

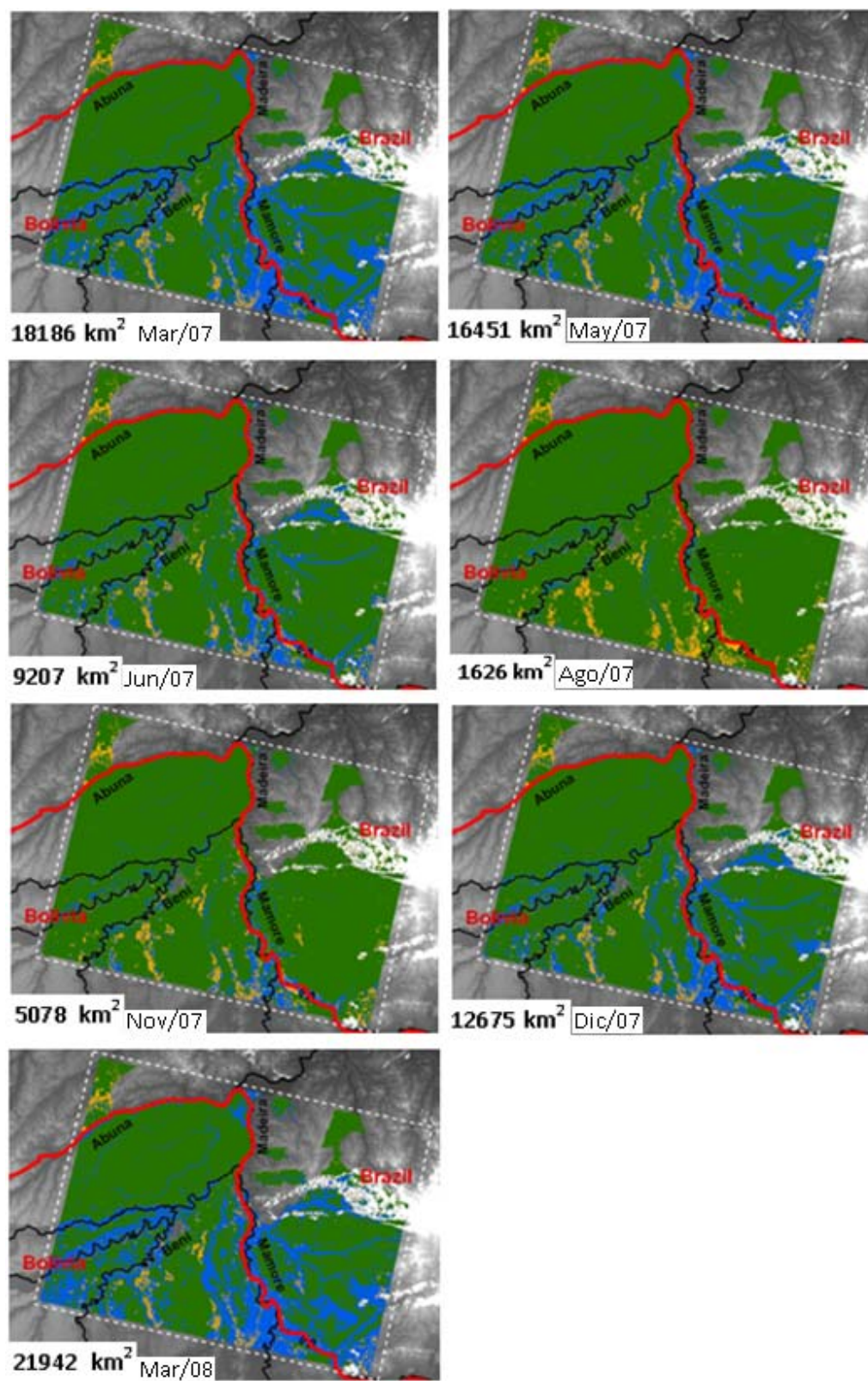


Figura III 8. Dinámica de inundaciones

La superficie inundada por subcuenca alcanza porcentajes de gran magnitud en algunas de ellas, tal el caso de la subcuencas Madre de Dios (55%), Ouro Preto (48%), Mamoré (44%). Cifras que muestran que prácticamente la mitad del área de estas subcuencas (comprendidas en el área de estudio) se inunda por algún periodo del año. Detalles de las superficies totales y porcentajes por subcuenca se muestran en la siguiente figura III.9.

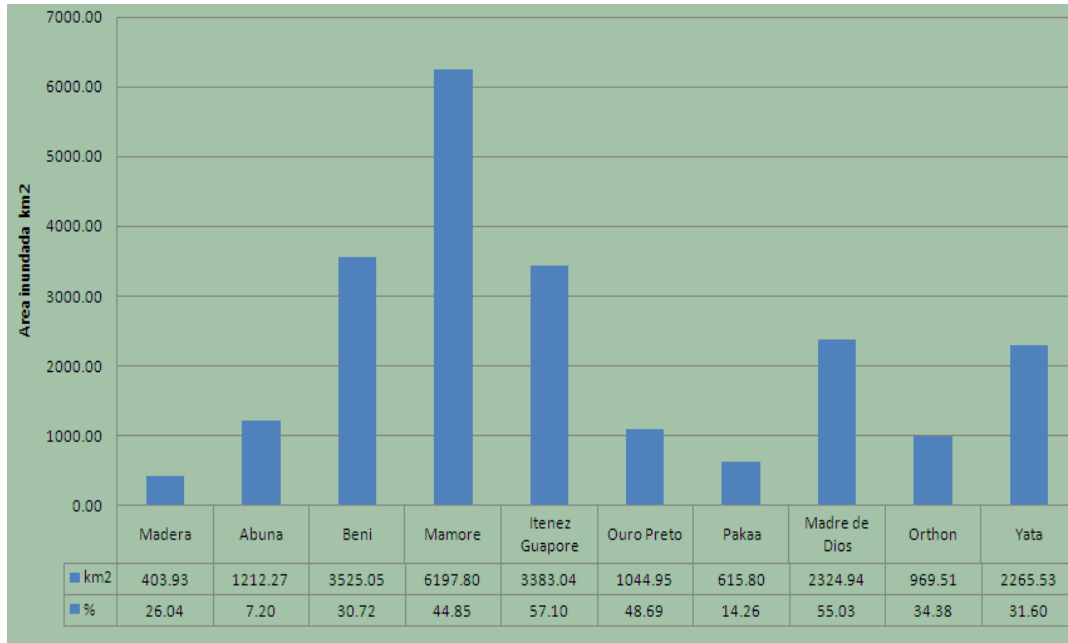


Figura III 9. Área inundada por subcuenca en el área de estudio.

El área de estudio no corresponde a la superficie total de las subcuencas pero se encuentra en sus partes más bajas que presentan mayor zona de inundación.

Como mencionamos anteriormente, existe una estrecha relación entre los incrementos de niveles de agua en los ríos y las superficies inundadas. En base a datos de estaciones limnimétricas localizadas en diferentes ríos (ver figura III.2), y a los datos de la dinámica de inundaciones por subcuencas, es que se puede obtener dicha relación. Por el momento, debido a la falta de datos limnimétricos de otros ríos y a que los datos de altimetría satelital (Envisat) se encuentran en proceso de calibración, el análisis se limita a las subcuencas Madera, Abuna, Mamoré e Itenez. A continuación presentamos gráficos de área inundada vs. nivel de agua para las dichas subcuencas.

En estos gráficos (Figuras III. 10-13) es posible distinguir el ascenso progresivo de los niveles de agua y el incremento de las áreas inundadas como también el descenso de ambos parámetros (de acuerdo a las flechas). Nótese que para un

determinado nivel de agua la correspondiente área inundada puede ser mayor durante el ascenso de las aguas o viceversa, ello representa la respuesta de la cuenca en términos de velocidad de drenaje y la influencia de las variaciones de los regímenes hídricos (precipitación y caudales) entre cada ciclo. Cuando para un determinado nivel de agua la línea de drenaje (descenso) se ubica por encima de la línea de llenado (ascenso) se interpreta como un retardo o poca capacidad de drenaje de la cuenca (en respuesta a la precipitación y caudales), la situación opuesta, línea de ascenso encima de la línea de drenaje, señala una rápida evacuación de las aguas.

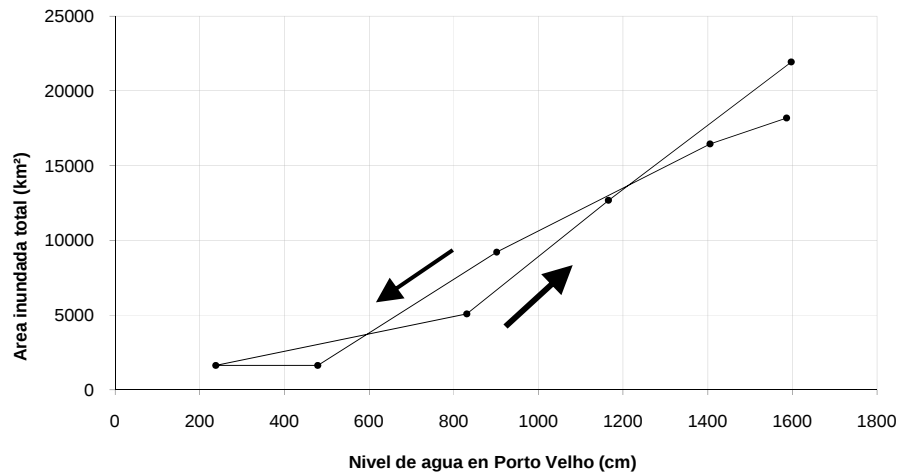


Figura III 10. Nivel de agua río Madera vs. área inundada en el área de estudio

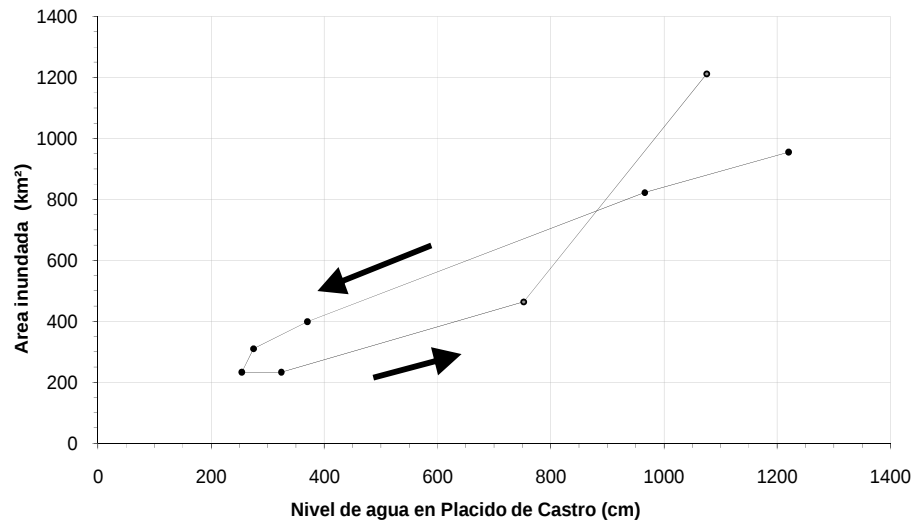


Figura III 11. Nivel de agua vs. área inundada (subcuenca Abuna)

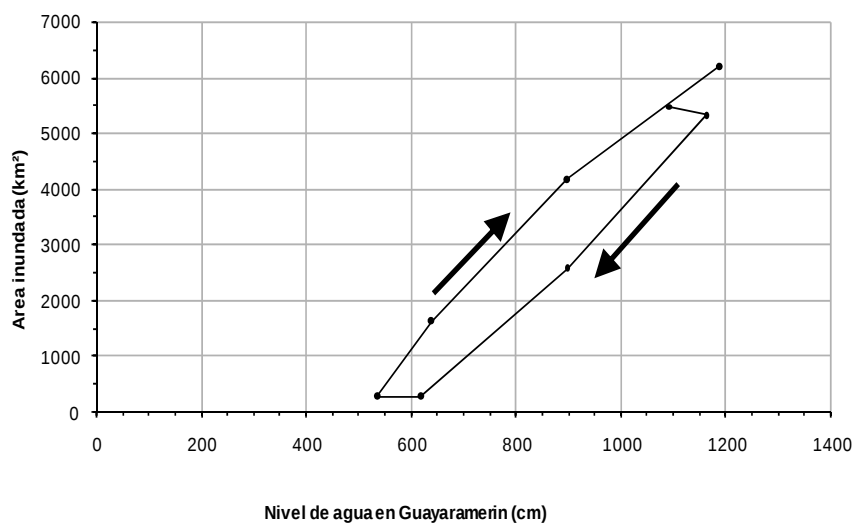


Figura III 12. Nivel de agua vs. área inundada (subcuenca Mamore)

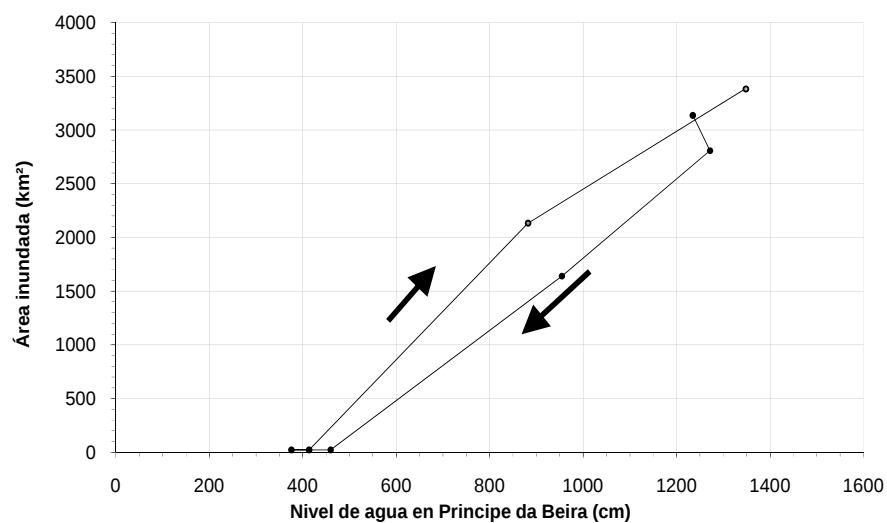


Figura III 13. Nivel de agua vs. Área inundada (subcuenca Itenez)

III.9 Variaciones en la extensión y dinámica de las inundaciones (Escenario con proyecto)

Hasta este punto, hemos abordado diversos factores que hacen en su conjunto la compleja dinámica de inundaciones en su situación actual (sin proyecto). En base a ello, brindaremos elementos de análisis para la generación de escenarios futuros (con proyectos) a fin de identificar las variaciones en los ciclos naturales.

Áreas inundadas por los proyectos hidroeléctricos

El impacto que inicialmente se puede vislumbrar a raíz de la construcción de una represa, es la generación de una superficie totalmente inundada que corresponde al vaso de la represa y que determina su capacidad generadora de energía. La retención de agua en un determinado tramo del río implica una modificación en las variaciones naturales de los niveles de agua.

En una primera instancia, a objeto de identificar la extensión tanto del vaso de las represas como del alcance de las modificaciones directas en las características del río, es menester el cálculo del área inundada para cada una de las represas proyectadas. Debido a la carencia de datos topográficos adecuados para tal efecto, se utilizó un Modelo de Elevación Digital SRTM (USGS, 2004) Obteniéndose los datos que se muestran en la figura III.14.

Aunque los datos obtenidos del DEM SRTM, no gozan de precisión adecuada en extensión lateral² de la inundación debido al embalse, nos dan una idea del alcance de los potenciales impactos a las características de los ríos sin tomar en cuenta los efecto de remanso y de sedimentación (ver capítulo II). En la figura III.13 se observa la extensión de las potenciales modificaciones del perfil hidráulico: la represa Cachuela hasta 150 km aguas arriba de los ríos Madre de Dios y Beni; la represa Riberão hasta 50 km sobre los ríos Beni (hasta Cachuela Esperanza) y Mamoré (hasta muy cerca de Guayaramerin); el complejo Jirau-San Antonio 180 km, prácticamente hasta la frontera con Bolivia.

² El modelo de elevación digital SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) de la NASA (2000), que representa la elevación del terreno, en sitios con bosque denso reporta el nivel del dosel del bosque y no el nivel del terreno, por tanto el gradiente de altitud que presenta entre las superficies de agua y los bosques densos ribereños es falso y se requiere de un proceso de optimización para quitar este efecto.

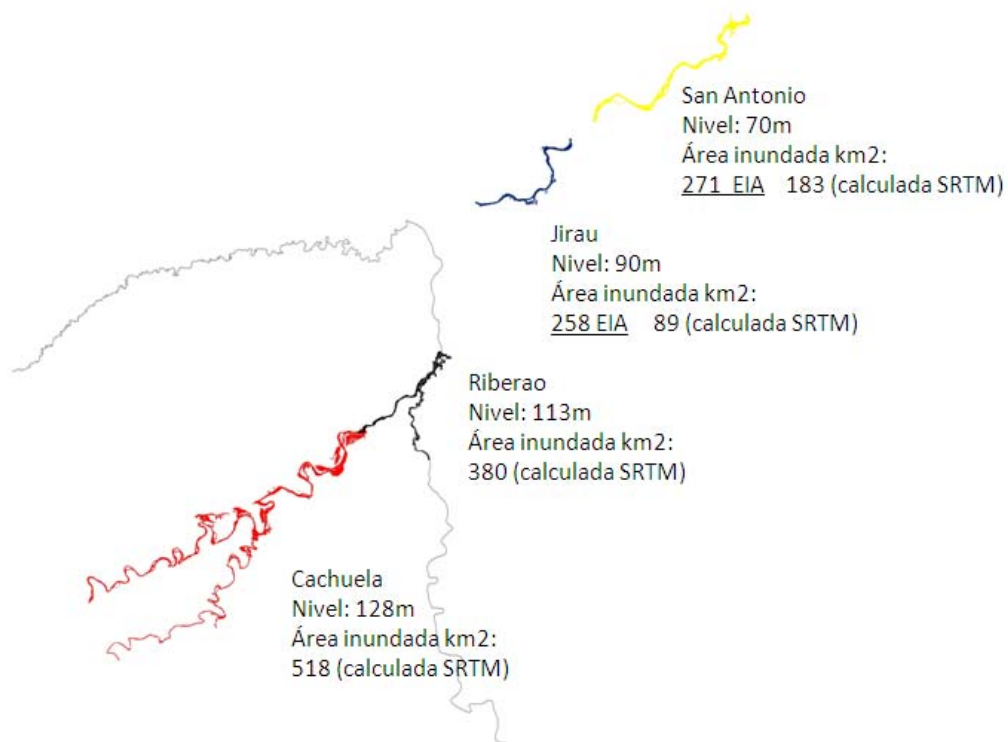


Figura III 14. Áreas inundadas por los proyectos hidroeléctricos

El proceso de análisis no concluye al identificar las modificaciones directas a las características naturales de los ríos mediante el cálculo del área del reservorio, es necesario evaluar los potenciales impactos de estas modificaciones en la dinámica de inundaciones y en la extensión lateral de esas inundaciones que van a tener mayores impactos sobre la vegetación existentes.

Impactos en la dinámica de inundaciones

Como se señala en el capítulo II, la simulación del efecto de remanso hidráulico, originado por los proyectos hidroeléctricos a lo largo del río fue realizada mediante el programa HEC-RAS durante la fase de estudio de impacto ambiental. Esto da elementos de análisis en el componente longitudinal, sin embargo es necesario complementar e integrar con el componente lateral (inundaciones) aspecto que en los estudios ambientales existentes se limita al cálculo del área inundada por el reservorio. Una limitante para simulación lateral de las inundaciones provocadas por los represas, es la carencia de información topográfica a escala adecuada que sirva de entrada para una precisa modelación.

En la sección 7 (dinámica de las inundaciones) mostramos la relación entre las superficies inundadas y las variaciones temporales de los niveles de los ríos, en base a ello no es difícil inferir que una modificación en la variación natural de los niveles de agua (por el efecto de remanso hidráulico), significaría también modificaciones a los ciclos de inundaciones y generara áreas inundadas más extensas y por más tiempo).

La figura siguiente muestra claramente este fundamento, se trata de la grafica *nivel de agua vs. área inundada* para la porción del río Madera, considerada en el área de estudio. Donde asumimos que el efecto remanso de la represa Riberão origina una variación de +2 m en el nivel mínimo, ello originaria que una superficie de 1000 a 2000 km² adicionales permanezcan inundados durante la bajada y subida de las aguas respectivamente.

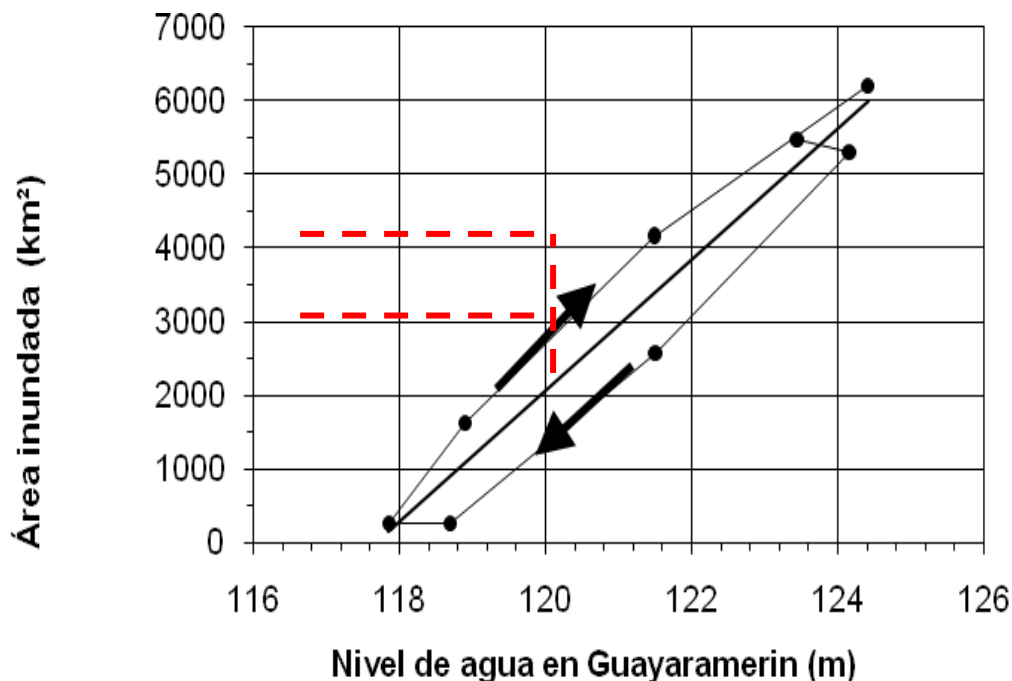


Figura III 15. Ejemplo de posible variación de los niveles de agua y su relación con el área inundada en la subcuenca Mamoré

El ejercicio mostrado en la figura III.15 ilustra sobre las posibilidades y utilidad del método utilizado, para identificar y/o monitorear los impactos en la dinámica de inundaciones, para cada una de las subcuencas comprendidas en el área de estudio. No obstante, por el momento existen algunas limitantes: los valores de altura absolutos correspondientes a cada nivel de las reglas en las diferentes estaciones limnigráficas (bolivianas y brasileras) no se encuentran calibrados en relación a un

mismo geoide; la cobertura de información limnigráfica es escasa; la posibilidad de complementar datos limnigraficos con información altimétrica satelital requiere también de un proceso de calibración y adecuación.

III.10 Conclusiones

El método aplicado, basado en el procesamiento y análisis de la serie temporal de imágenes radar ALOS PALSAR, demuestra su potencial para monitorear e identificar áreas de inundación independientemente de la cobertura existente y poder relacionarlas a las variaciones de los niveles de agua en los ríos.

Se ha logrado identificar que las áreas susceptibles a inundaciones, en el escenario actual (sin proyectos), representan una extensión considerable en cada una de las subcuencas contempladas en el área de estudio y que las inundaciones se propagan, en proporción directa a la subida de niveles de los ríos, hasta varios kilómetros en dirección lateral a ambas orillas.

Esta inicial caracterización, demuestra que las alteraciones al curso natural de las aguas a raíz de la implementación de los proyectos hidroeléctricos, significaría potenciales cambios en la extensión de las inundaciones temporales y en la dinámica de las mismas. Hasta el momento se ha identificado que el efecto de remanso hidráulico debido a las represas de Jirau y San Antonio, alcanzaría al tramo binacional del río Madera, el alcance del remanso hidráulico que originarían las represas Riberao y Cachuela Esperanza no ha sido estudiado aún debido a la carencia de estudios preliminares detallados de estos. Sin embargo, un escenario más complejo y potencialmente más riesgoso se vislumbra al añadir los potenciales impactos de estas.

Está claro que, en lo que se refiere a las inundaciones, el enfoque para la evaluación de los impactos potenciales de las represas proyectadas no debe limitarse al área del embalse, los impactos sobre las extensas áreas inundadas, que tienen una diversidad de formaciones vegetales y ecosistemas, debe ser incluida.

A fin de optimizar la precisión y los alcances del método utilizado en este trabajo, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones: i) la red de estaciones limnimétricas actual puede ser optimizada a fin de tener más información sobre las variaciones de los niveles de los ríos en función a los potenciales impactos de las represas (ubicación de reglas de medición en sitios clave) ii) información altimétrica satelital de estaciones virtuales adecuadamente distribuidas sería de gran utilidad y complemento a la red de estaciones limnimétricas iii) información topográfica en

escala apropiada permitiría la modelación de los planos de inundación (de los futuros reservorios) de manera precisa iv) la ampliación de la serie temporal de imágenes radar ALOS PALSAR permitirá ampliar el conocimiento de las dinámica de inundaciones, asimismo validaciones en campo bridarán mayor precisión en la clasificación de las imágenes.

III.11 Referencias

Guimaraes, J. R. D., M. Meili, *et al.* (2000). "Mercury net methylation in five tropical flood plain regions of Brazil: high in the root zone of floating macrophyte mats but low in surface sediments and flooded soils." The Science of The Total Environment **261**(1-3): 99-107.

Martinez, J.-M. & T. Le Toan (2007). "Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data." Remote Sensing of Environment **108**(3): 209-223.

Navarro, G. and W. Ferreira (2007). Mapa de Vegetacion de Bolivia, The Nature Conservancy.

Ovando, A. (2008). Behind the pathways of mercury in the Itenez-Guapore basin, mapping the potential deposition - transformation zones. Water Resources. Enschede, ITC. **Msc.**

Richey, J. E., J. M. Melack, *et al.* (2002). "Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂." Nature **416**: 617 - 620.

Roulet, M. and C. Grimaldi (2001). Le mercure dans les sols d'Amazonie. Origine et comportement du mercure dans les couvertures ferrallitiques du basin amazonien et des Guyanes. Mercury in the Amazon - Importance of human and environmental, health hazards: 121-167.

USGS (2004), Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second scene SRTM_u30_n008, Unfilled Unfinished 2.0, Global Land Cover Facility, U. Maryland, College Park, Maryland, February 2000.

IV – Potenciales impactos indirectos de las represas del río Madera. Una comparación con las represas hidroeléctricas en Sud América.

Leslie Córdova, Marc Pouilly & Laurence Maurice

IV-1. Introducción

Las represas hidroeléctricas son construidas como un medio importante para satisfacer necesidades tales con servicios de agua y energía y como inversiones estratégicas a largo plazo con capacidad para proporcionar múltiples beneficios (WCD 2000). Sin embargo estas pueden presentar algunos tipos de impactos ambientales como por ejemplo inundación de áreas vecinas a la represa, aumento de nivel en ríos, formación de islas (fragmentación del hábitat), cambio en el curso del río, pérdida de bosque, etc.

Actualmente existen debates sobre los lugares donde serán construidas las represas hidroeléctricas, tales como la *Comisión Mundial de Represas*, un centro importante que se ocupa de la toma de decisiones. Esta comisión considera que el fin de todo proyecto de represas debe ser la mejora sustentable del bienestar humano, si una gran represa alcanza este bienestar la comisión mundial brinda su apoyo para la construcción de dicha represa (Filho 2004). La evaluación de los impactos ambientales de esas grandes represas sigue siendo un reto por lo que no existe un sistema de predicción en particular ya que estos pueden generarse indirectamente a raíz de otros tipos de impactos como por ejemplo la sedimentación y la inundación de bosque.

En Sud América existen numerosas grandes represas hidroeléctricas³. Considerando aquellas que se encontraban catastradas hasta el año 2000 (WCD 2000) en los países de la cuenca Amazónica: Bolivia presenta 6 represas, Perú 43, Ecuador 11, Colombia 94 y Brasil más de 300, demostrando la heterogeneidad de las situaciones nacionales pero al mismo tiempo el probable potencial de desarrollo en países como Bolivia y Ecuador. La mayoría de las grandes represas están ubicadas en la parte baja de la Amazonía, como por ejemplo en Brasil y que generan más conflicto acerca de su pertinencia en relación costo-beneficio, en especial debido a los grandes impactos ambientales y sociales que estas represas han generado en varias partes del mundo.

³ Según ICOL son consideradas como grandes las represas que sobrepasan más de 15m de altura

Este capítulo tiene dos objetivos:

- 1- compilar la información acerca de las condiciones ambientales de cada región y los impactos observados en cada una de estas represas de Sud América. Con esa información se buscará detectar los factores que pueden generar o agravar impactos en el caso de las represas proyectadas en el marco del complejo hidroeléctrico del río Madera (Cachuela Esperanza, Riberão, Jirau y Santo Antonio).
- 2- presentar datos existentes del Norte Amazónico boliviano para establecer un reporte preliminar (pero no exhaustivo) de la sensibilidad de esta región a los impactos reportados en otras represas.

IV-2. Entorno regional de las grandes represas en Sud América

Suramérica y en especial la cuenca Amazónica presenta un gran número de represas tropicales de diferentes tamaños construidas en diferentes regiones de Brasil y de sus países limítrofes: regiones Norte, Nordeste y Sudeste de Brasil, Guyana Francesa, Uruguay y Argentina. Estas regiones se caracterizan por diferentes entornos ambientales y antrópicos que pueden en parte servir de marco explicativo a los impactos que se observan en las represas (Tabla IV.1).

De estas regiones, la región Norte del Brasil es la que presenta mayor semejanza con el Norte Amazónico boliviano (provincia Acre Madre de Dios) y el río Madera brasileiro donde está proyectado la construcción de las cuatro represas del complejo hidroeléctrico del río Madera. Esta región es considerada como la de mayor potencial hidroeléctrico de Brasil (Dantas 2008) y alberga varias de las grandes represas hidroeléctricas del continente, entre las cuales son Tucuruí (en servicio desde 1984) y Balbina (1989). Por lo tanto tomaremos especial atención a los impactos que surgieron en las represas de esta región.

A nivel ecológico, se considera que toda esta región pertenece a una misma hidroecoregión Mamoré – Madre de Dios, Guaporé – Iténez y Madera (Abell *et al.* 2008, Figura IV.1).

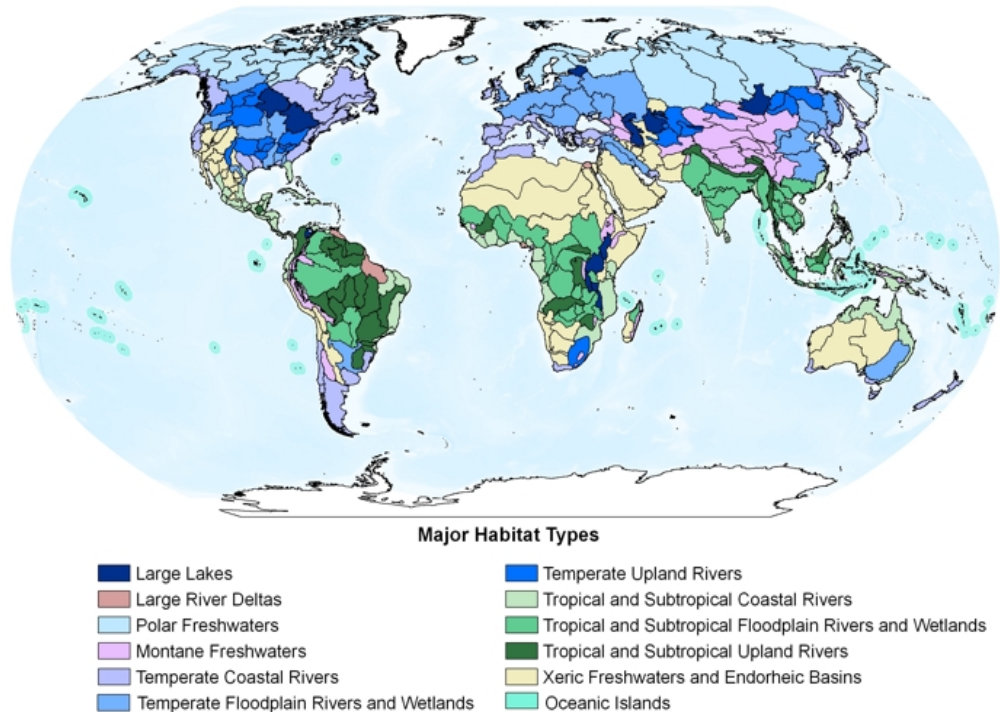


Figura IV 1. Ecoregiones del mundo, hidroecoregion tropical y ríos subtropicales de Planalto para las represas modelo de Sud América (Fuente: www.feow.org.) La Cuenca Amazónica esta divide entre las principales ecoregiones de ríos alto amazónicos tropicales, subtropicales y río de planicie, humedales tropicales y subtropicales.

Las principales características ambientales que actúan sobre la ecología de estos sistemas son:

- *Clima ecuatorial*: temperaturas medias de 24 hasta 30°C, bastante estable a lo largo del año y una constante humedad pero con una época de lluvia marcada de noviembre hasta marzo.
- *Vegetación*: selva tropical, con variaciones según la localidad en relación al grado de humedad del suelo que permite diferenciar vegetación que está a la rivera de los ríos (iguapó, várzea) o inundadas ocasionalmente o de tierra firme.
- *Hidrología*: régimen unimodal presentando una estacionalidad marcada entre aguas altas y aguas bajas.
- *Desarrollo económico*: aprovechamiento de recursos tanto del bosque (explotación forestal en general, látex, castaña), del río (pesquería) y de los suelos (minería, agricultura y ganadería). La densidad poblacional no es muy alta pero tiene una tasa de incremento importante a través de la deforestación y la abertura de caminos.

Tabla IV 1. Características generales de las grandes regiones neotropicales de Brasil, Guayana Francesa, Uruguay, Argentina y Bolivia.

Regiones	Clima	Relieve	Principales cuencas	Vegetación	Desarrollo económico	Población	Represas (MW) mas importantes
Región Norte del Brasil	Ecuatorial y Tropical	* Planicies y Tierras Bajas Amazónicas * Planalto de las Guainas * Planalto Central. (Iguapó, Várzea y Bajos)	* Cuenca Amazonas * Cuenca de Tocantins	Selva tropical amazónica	Explotación de látex, açaí, castaña, oro, diamantes y estaño	15.023.331	Tucuruí (3.980), Balbina (250)
Región Nordeste del Brasil	Equatorial Húmedo Litoráneo Húmedo Tropical Tropical Semi-árido	* Planaltos y Borborema	* Cuenca de San Francisco * Cuenca de Parnaíba * Cuenca de Atlántico Este	* Bosque Atlántico o bosque tropical húmedo * Bosque de Cocais (formación vegetal de transición entre climas semi-árido, ecuatorial y tropical) * Cerrado * Xerófito * Vegetación Litoránea y Bosques Ciliares (mangues)	Caña de azúcar, algodón, tabaco, caju, uvas finas, manga, melão, acerola, frijoles. Criación de ganado, caprinos.	52.191.238	Paulo Afonso (2.460), Sobradinho (1.050), Moxotó (439,2), Itaparica (1.500), Xingó (3.162) <i>Estas represas se sitúan en serie sobre un mismo río y forman un complejo, tal como se proyecta en el Madera</i>
Región Sudeste del Brasil	Tropical y subtropical	* Planicies y Tierras Bajas Costeras * Planaltos de Este y Sudeste * Planalto Meridional * Planalto Arenito-basáltico	* Cuenca de Paraná. * Cuenca de San Francisco * Cuenca de Este * Cuencas de Sudeste-Sul	* Bosque Atlántico * Bosque tropical	Cultivos de caña de azúcar, naranja y café. Criación de rebaño bovino y aves.	77.857.758	Ilha Solteira (3.230), São Simão (1.715) Agua vermelha (1.380), Porto Primavera (1.854)
Región Sur del Brasil	Tropical y subtropical	* Planicie Costera o Litoránea * Campo Gaúcha o Pampa * Planalto Atlántico * Planalto meridional.	Cuenca del río Paraná y cuenca del río Uruguay	Bosque de Araucárias y grande pampa gaúcho	Trigo, soya, arroz, maíz, frijol y tabaco	26.729.883	Itaipú (6200), Foz de Areia (2511), Salto Osório (1.050)
Guayana Francesa	Tropical húmedo	* Planalto y Planicies	Ríos mas importantes: Oiapoque, frontera con Brasil, Maroni, que limita con Suriname, Orapu, Comté y Mana.	Selva ecuatorial	Pesca y minera	209.000	
Uruguay (Salto)	Templado	Planicies y colinas bajas.	Cuenca del Río Uruguay	Bosque del Alto Uruguay (Bosque Atlántico)	Rebaños, bovinos y ovinos. Carne, lana y piel de bovinos y ovinos.	123.120	Baygorra (108), Rincon del Bonete (160), Palmar
Argentina (Provincia Entre ríos - Región Noreste)	Subtropical, áridos y fríos	Formación de lomas (planos), Lomada Grande (al este) y Lomada de Montiel al oeste)	Cuenca del Plata	Sabana subtropical y selva.	Cultivos de: algodón, arroz, frutos subtropicales, maíz, soja y tabaco.	1.242.547	Yaciretá (3200)
Bolivia (norte amazónico) Prov. Acre Madre de Dios	Puviestacional	Alturas o tierra firme, llanuras aluviales (semialturas y bajuras) inundadas con aguas negras, blancas y mixtas	Cuencas de los ríos Alto Acre, Abuná, Orthon, Madre de Dios, medio y bajo Beni, alto Madera, bajo Mamoré y bajo Iténez.	Selva tropical y sabanas	Explotación de la Castaña, Goma y madera. Pesquería		

A comparación (Tabla IV.1), la región nordeste del Brasil, donde se ubica el complejo de represas (Paulo Afonso, Sobradinho, Moxotó, Itapirica y Xingó) construidas en el río San Francisco, presenta el clima, vegetación, relieve e Hidrología característicos de zonas litorales. La región Sudeste del Brasil que alberga las represas hidroeléctricas Ilha Solteira, São Simão y Agua Vermelha, presenta también características ambientales típicas de ambientes costeros. La región Sur del Brasil, donde se ubica Itaipú, una de las represas mas grandes del Brasil, así que otras como Foz de Areia y Salto Osorio, y las regiones de Guyana Francesa, Uruguay y Norte de Argentina presentan una semejanza de clima tropical y subtropical al igual que el Norte Amazónico de Bolivia pero se diferencian por otros criterios.

IV. 2- Método de comparación entre condiciones ambientales e impactos observados

Se utilizó por el estudio de comparación a 11 de las más grandes represas hidroeléctricas ubicadas en Suramérica. Estas represas se escogieron con los siguientes criterios: *potencial de energía generada, ubicación geográfica y área de inundación*, pero también en relación a la disponibilidad de información y estudios sobre los impactos observados. Cabe recalcar que esa información se genera más en forma de literatura gris de difícil alcance lo que limita la posibilidad de sistematización de esa información a corto plazo y no da una visión exhaustiva de los impactos. Los mismos estudios generales de gran alcance como WDC (2000) o Ledec & Quintero (2003) no han logrando completar esta información, aunque, debido a la gran importancia del debate público sobre los impactos de las represas, es más que probable que exista esa información, que se queda generalmente sin oportunidad de ser publicada.

Como se menciono anteriormente, se busco enfocar más sobre las represas que se ubican en el la región Norte de Brasil, debido a que las características ambientales que presentan esta región son las mas semejantes a las del Norte Amazónico boliviano. Estas represas son distribuidas en las diferentes regiones descritas anteriormente (Tablas IV.1 y IV.2):

- Norte del Brasil: Tucurui (río Tocantins), Balbina (río Uatumã) y Samuel (Jamarí).
- Nordeste de Brasil: complejo de represas, de las cuales se tomaron como ejemplo a Xingó, Itapirica, Sobradinho y Paulo Afonso IV todas ubicadas en el río São Francisco.
- Sudeste de Brasil: Ilha Solteira (rio Paraná)
- Sur del Brasil: Itaipú (rio Paraná).

- Uruguay-Argentina: Salto Grande
- Guyana Francesa: Petit Saut.

Dichas represas se utilizaron con el fin de evaluar los diferentes impactos ambientales que se presentaron en cada una de ellas para posteriormente tomar como ejemplo/indicador para los impactos que podrían presentarse en las represas proyectadas en el río Madera.

Los conocimientos generales indican que los impactos de las represas son mayores cuando mayor es el área de inundación y que son agravado por la construcción en serie en un mismo río de varias represas (WDC 2000, Ledec & Quintero 2003). También parece importante tomar en cuenta el tipo de agua por lo que tiene una importante influencia sobre la composición, la productividad y el funcionamiento del ecosistema. Por lo tanto, además de la región donde se ubica la represa se usó tres indicadores para poder comparar la situación de cada represa con las condiciones del río Madera y de la llanura de inundación del Beni: 1) las características de los ríos en relación a su carga sedimentaria (tipo de agua ver Tabla IV. 3) 2) las características de la represas en relación a su área de inundación y 3) su pertenencia a una serie o complejo de represa (Tabla IV. 2).

El total de sedimentos transportados por el río Madera es de cerca de 500 millones de toneladas por año (Ministerio de Minas y Energía 2007), lo que deja imaginar un crítico problema de sedimentación y de contaminantes asociados como el mercurio (cf. parte IV.5). A pesar que este factor de carga sedimentaria nos parece de crucial importancia, no hemos encontrado muchos argumentos bibliográficos para apoyar nuestra preocupación. Estudios mas detallados podrían desarrollarse para poner en evidencia la importancia de este factor.

IV. 3- El caso de la represas del Madera acerca de los principales impactos indirectos observados en Sud América

Dentro de los impactos indirectos reportados por estas represas, cinco temas principales surgen y se repiten en diferentes represas, temas que se deberían primero investigar y evaluar en los estudios de impactos ambientales del complejo hidroeléctrico del río Madera. A continuación presentamos estos temas y intentamos dar algunos elementos de cómo podrían afectar al Norte Amazónico boliviano: 1) emisión de gases, 2) área de inundación de bosque, 3) ictiofauna, y los impactos ambientales que pueden afectar a la salud: 4) malaria y 5) mercurio. Estos impactos no consideran los aspectos sociales y no son exhaustivos, solo representan aquellos

que son más reportados para las 11 grandes represas tropicales sudamericanas para las cuales se ha podido encontrar información lo suficientemente consistente.

Tabla IV 2. Características generales de 11 grandes represas hidroeléctricas del trópico Sudamericano y de las cuatro represas del proyecto de complejo hidroeléctrico del río Madera.

	Represa	Río	Área de Cuenca hidrográfica (Km2)	Tipo de agua	Año de Inicio	Año de conclusión	Generación de Energía (MW)	Reservorio Km2 (Área de inundación)	Altura (m) Caída de agua	Volumen del embalse (10 ⁶ m ³)		Caudal de salida m3/seg.
Brasil										Ac.	Útil	Media
NORTE	Tucuruí	Tocantins (Pará)	967.059	Claras	1976	1984	8370	2430	78	50275	38982	43.000 x 10 ⁶
	Balbina	Amazona/Uatumã	19590.7	Negra	1985	1989	250.000	2360		19959	10223	267
	Samuel	Amazona/Madera/Jamari	30879.1	Blancas	1982	1996	216.000	730	87	4	3	366
	Jirau	Amazona/Madera	7472.9	Blancas	En proyecto		3.300	258	35.5	1686.6	806.5	82.6
	San Antonio	Madera	17022.7	Blancas	En proyecto		3.150	271.3	55	60	2075.1	84000
NORDESTE Estas 4 represas forman un complejo	Xingó	São Francisco	631.000	Clara	1987	1994	3162	1360	196	3800	41	62.2
	Itaparica (Luis Gonzaga)	São Francisco	631.000	Clara	1979	1988	14979.2	835	140	10782	3549	33
	Sobradinho	São Francisco	631.000	Clara	1973	1979	1050.3	4214	105	34117	28669	2.06
	Paulo Afonso IV	São Francisco	616.000	Clara	1967	1974	2462.4	16	41	1277	209	2.06
SUDESTE	Ilha solteira	Paraná	879.86	Blanca	1974	1978	3444	1230	80	8965	8965	34116
SUR	Itaipú	Paraná	879.86	Blanca	1975	1983	6200	1540	5.6	33475	5807	38.300.00.
Uruguay-Argentina	Salto Grande	Uruguay	385000	Clara	1973	1979	102	783		78	47	4.622
Guyana Francesa	Petit Saut	Sinnamary	6000	Clara	1989	1994	26	350		3500		230
Bolivia Norte Amazónico	Cachuela Esperanza	Amazona/Madera/Beni	100000	Blanca	En proyecto		800					
	Riberão	Amazona/Madera	100000	Blanca	En proyecto		3000					

Tabla IV 3. Características del tipo de agua según clasificación de Sioli.

Tipo de aguas	Color de agua	pH	Química del agua	Conductividad
Claros	Transparente (poca cantidad de material en suspensión)	4,5 a > 7,0	Bajo contenido de Ca, Na, P, Carbonatos, Sulfatos, Silice disuelto elevado	Baja (10 - 171 $\mu\text{S/cm}$)
Negras	Café (sustancias húmicas)	3,8 a 4,9	Na 40 %, K 30%, Ca 20%	Baja (1 - 44 $\mu\text{S/cm}$)
Blancas	Turbias (ricos en material particulado en suspensión)	6,2 a 7,2	Ca 60%, Na 20%, Mg 10% y K 10%	Mayor que aguas Claras y Negras(>50 $\mu\text{S/cm}$)

Fuente: Navarro & Maldonado 2005

IV. 3.1- Emisión de gas

La emisión de gases (en especial gases de efecto invernadero como CO_2 y CH_4) esta relacionado con la descomposición de la materia orgánica y la cantidad de carbono procedente de la cuenca río arriba. Estos gases son considerados como responsables del calentamiento global. Según la WCD (2000) se estima que las emisiones brutas de los embalses pueden representar entre el 1% y el 28% del potencial de calentamiento global de las emisiones de gases de efecto invernadero. En la actualidad la emisión de gases y en especial del Carbono se esta volviendo un impacto económico por lo que los últimos acuerdos internacionales (protocolo de Kyoto) consideran que estas emisiones se deberían monetizar.

Se estima que la despresurización del agua a nivel del vertedero y de las turbinas, es el fenómeno que más emisión de gases produce (Galy-Laceaux *et al.* 1999, Fearnside 2002, 2004). Este proceso se puede explicar por el hecho de que el agua que entra con presión en las turbinas sale despresurizándose y libera los gases mediante burbujas. Una parte de estos gases son normalmente consumidos por bacterias oxidantes, pero por el hecho de la despresurización rápida estas no tienen el tiempo de actuar. Las áreas de inundación que se dan por la construcción de represas llevan a la perdida de grandes áreas de bosques y/o a la formación de pequeñas islas que favorecen la descomposición de la vegetación. El metano liberado tras la descomposición de la materia orgánica es 21 veces mayor que la tasa de CO_2 inicialmente fijada por las plantas (Kemenes *et al.* 2006).

Según la comisión mundial de represas las emisiones de gases son favorecidas por las condiciones ambientales tropicales (WCD 2000). Las represas aisladas como

Tucuruí, Balbina e Itaipú generan altas cantidades de gases que son en relación a su tamaño y a su área de inundación (Tabla IV.4, Figura IV.3). En sus primeros años de funcionamiento, Tucuruí presentó un mayor desarrollo de macrófitas generando tasas de emisiones de metano mas elevadas (Fearnside 2002). En la represa de Petit Saut se observó que durante los primeros años de ser cerrada (1994) las propiedades químicas del agua cambiaron debido al llenado de agua en el reservatorio (Mérona & Philipe 1999). La concentración de O_2 fue disminuyendo, llevando a la presencia de gases tóxicos como H_2S y NH_4 , este fenómeno se reguló bastante rápidamente.

En el caso del complejo de represas del río San Francisco (Xingó, Itaparica, Sobradinho y Paulo Afonso IV) se demostró que cada una de las represas generan pequeñas cantidades de gases pero que la emisión total es acumulativa, entonces aumenta con el numero de represas y la superficie total inundada, y al final genera una elevada emisión de gas (30996000 Kg/día de CO_2 y 194750 Kg/día de CH_4) por un total de 8153.9 MW de energía (Tabla IV.4, Figura IV.2).

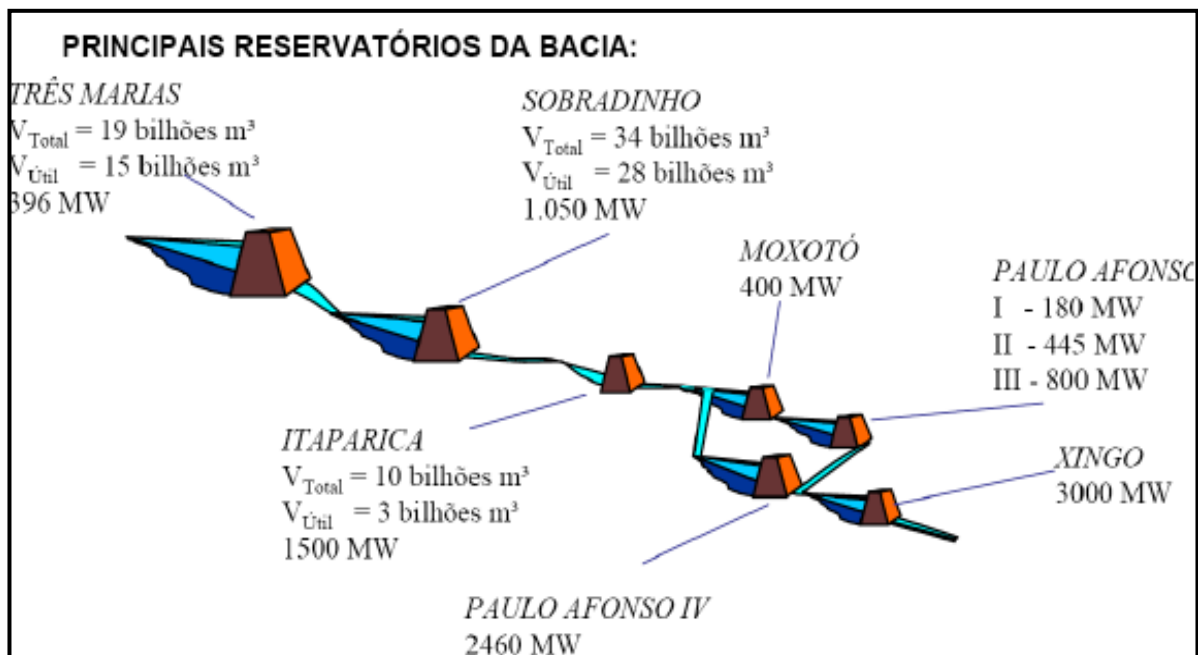


Figura IV 2. Represas hidroeléctricas formando un complejo sobre el río San Francisco (Brasil)

Tabla IV 4. Emisión de Gases en Represas modelo de Sud América.

Región	Represa	Tipo de aguas	Área de inundación	Emisión de CO ₂ Kg/día	Emisión de CH ₄ Kg/día	Emisión total de Carbono (t/día)
NORTE	Tucuruí	Clara	2635	22331625	295120	631117
	Balbina	Negra	2824	2393400	316288	6763.85
	Samuel	Blanca	730	4904870	75920	1394.5
NORDESTE Complejo de represas	Xingó	Clara	60	362880	2280	100.67
	Itaparica	Clara	835	5050080	31730	1400.95
	Sobradinho	Clara	4214	25486272	160132	7070.21
	Paulo Afonso IV	Clara	16	96768	608	26.84
SUDESTE	Ilha solteira	Blanca	1230	4785930	27060	1325.42
SUR	Itaipú	Blanca	1549	264213	32188	96.19
Uruguay Argentina	Salto Grande	Clara	6	25450.4	893.2	7.61
Guayana Francesa	Petit Saut	Clara	350	240		

Fuente: Santos M. (2000)

En algunos casos (Balbina y Petit Saut por ejemplo) soluciones técnicas fueron encontradas para reducir la emisión de gases. Por el tipo de turbinas que fue instalado, Balbina presenta una emisión de CO₂ menor de lo esperado en relación a su área de inundación, pero la emisión de CH₄ es mayor a lo esperado (Figuras IV.3 y IV.4, Kemeses *et al.* 2006). Las emisiones de gases de Petit Saut son también bajas (Tabla IV.4), debido a la instalación de vertederos artificiales que permiten reoxigenar el agua (uno de los mayores problemas ecológicos que afecta el río debajo de esta represa) pero al mismo tiempo favorecen la liberación del CH₄ en la atmosfera (Richard *et al.* 2005) lo que permite mejorar la calidad del agua río abajo. Este ejemplo demuestra el dilema que genera la contaminación de las aguas en el embalse, dejando al gestor de elegir entre una mayor contaminación de las aguas río abajo o una mayor emisión de gas a efecto invernadero.

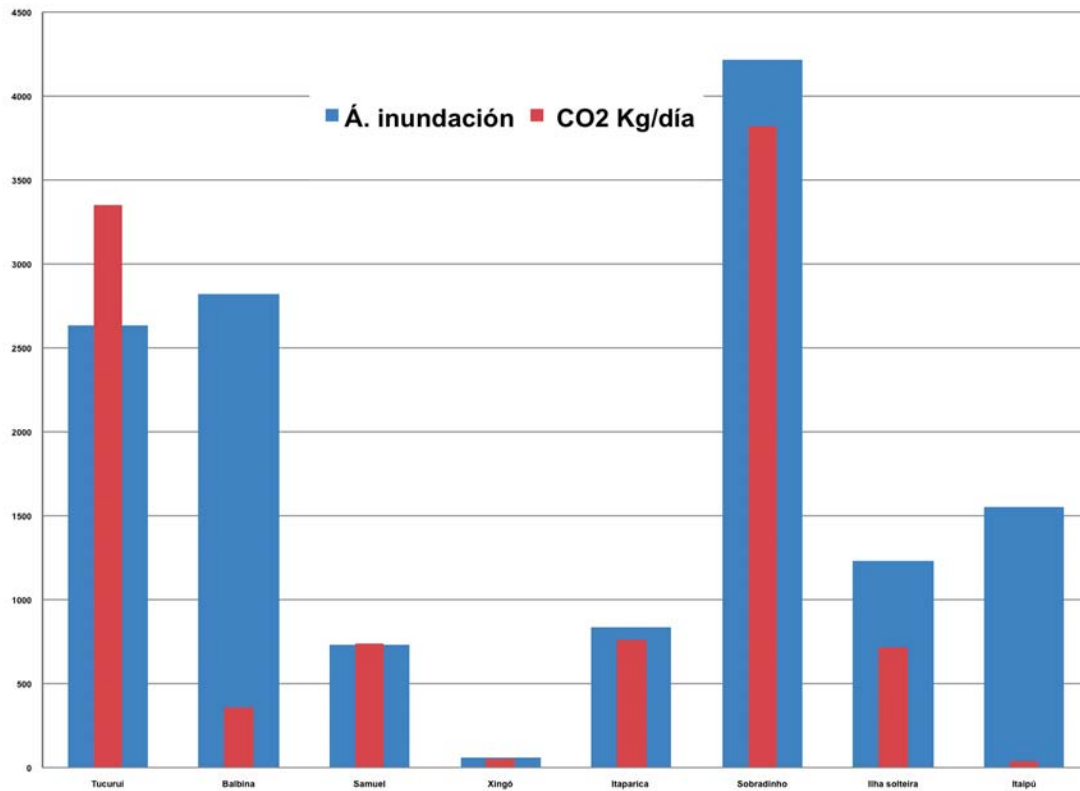


Figura IV 3. Área de inundación vs. Emisión de CO₂ Kg/día en las represas modelo de Sud América.

Las represas planeadas en el complejo hidroeléctrico del río Madera contemplan grandes áreas de inundaciones (258 Km² por Jirau, 271.3 Km² por San Antonio, no estimada por las dos represas bolivianas) y por lo tanto están en una categoría de posibles grandes emisiones de gases. Como en el caso del complejo del río San Francisco la evaluación debería realizarse sobre el conjunto de las represas. En los estudios de impacto ambiental de las represas brasileiras no se mencionan cálculos de emisiones de gases. Las represas Cachuela Esperanza y Riberão no tienen estimación de áreas de inundación y mucho menos de las probables emisiones de gases. Estudios acerca de este tema son imprescindibles para la evaluación de los impactos ambientales así también que por la evaluación económica del proyecto.

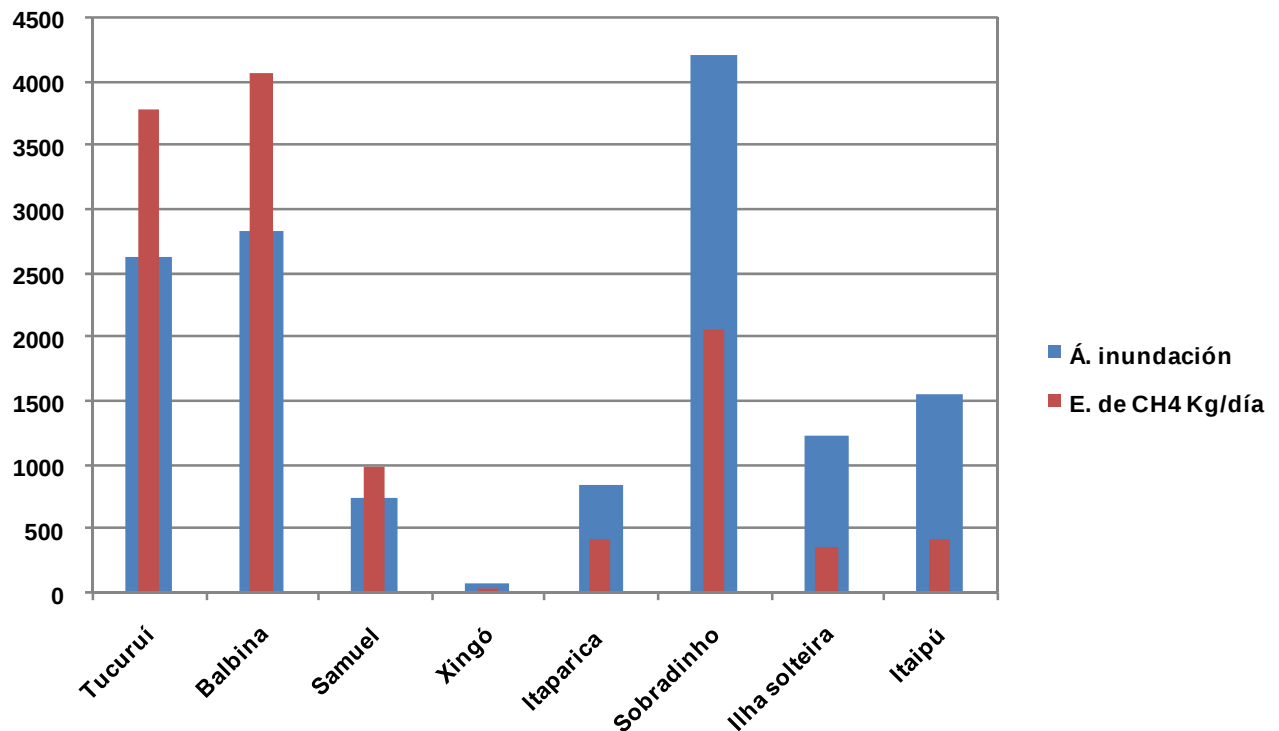


Figura IV 4. Área de inundación vs. Emisión de CH₄ Kg/día en las represas modelo de Sud América.

IV. 3.2- Área de inundación de bosque

Es reconocido que el área de inundación es uno de los principales indicadores de impactos de las represas (WDC 2000, Lebel & Quintero 2003). Generalmente mayor es la superficie afectada y mayor son los impactos en especial cuando la zona de inundación es cubierta por vegetación. Existen áreas de inundaciones naturales, como es el caso del Norte Amazónico boliviano, que son aprovechadas para el uso de producción agrícola y de recursos silvestres. Para mitigar el efecto de las inundaciones sobre estas actividades se puede construir represas de regulación río arriba de las zonas inundables. A contrario las represas ubicadas a la salida de la cuenca pueden ocasionar grandes áreas de inundación, llevando consigo pérdida de bosque y de terreno utilizados por actividades humanas.

Existe una relación directa entre el área de inundación y la pérdida de bosque (Figura IV.5) que muchas veces corresponden también a zonas de explotación maderera y

extracción de recursos silvestres. En caso de la represa Balbina la generación de energía es poca (250 MW) pero el área de inundación fue bastante grande (2360 Km²) y tuvo impactos sobre la sustitución de algunas macrófitas como *Salvina* por *Utricularia carnívora* (Fearnside 1989, Walker 2004), una especie de carnívora que alteró la composición de las comunidades acuáticas y el funcionamiento ecológico de la zona. En Tucuruí, en lugar del bosque afectado (de una superficie de 1.783 Km²) surgieron macrófitas (UNESP, 2000) cuya extensión produjo una alteración en la producción de especies nativas como el açaí y otras especies de valor agrícola (WCD, 1999).

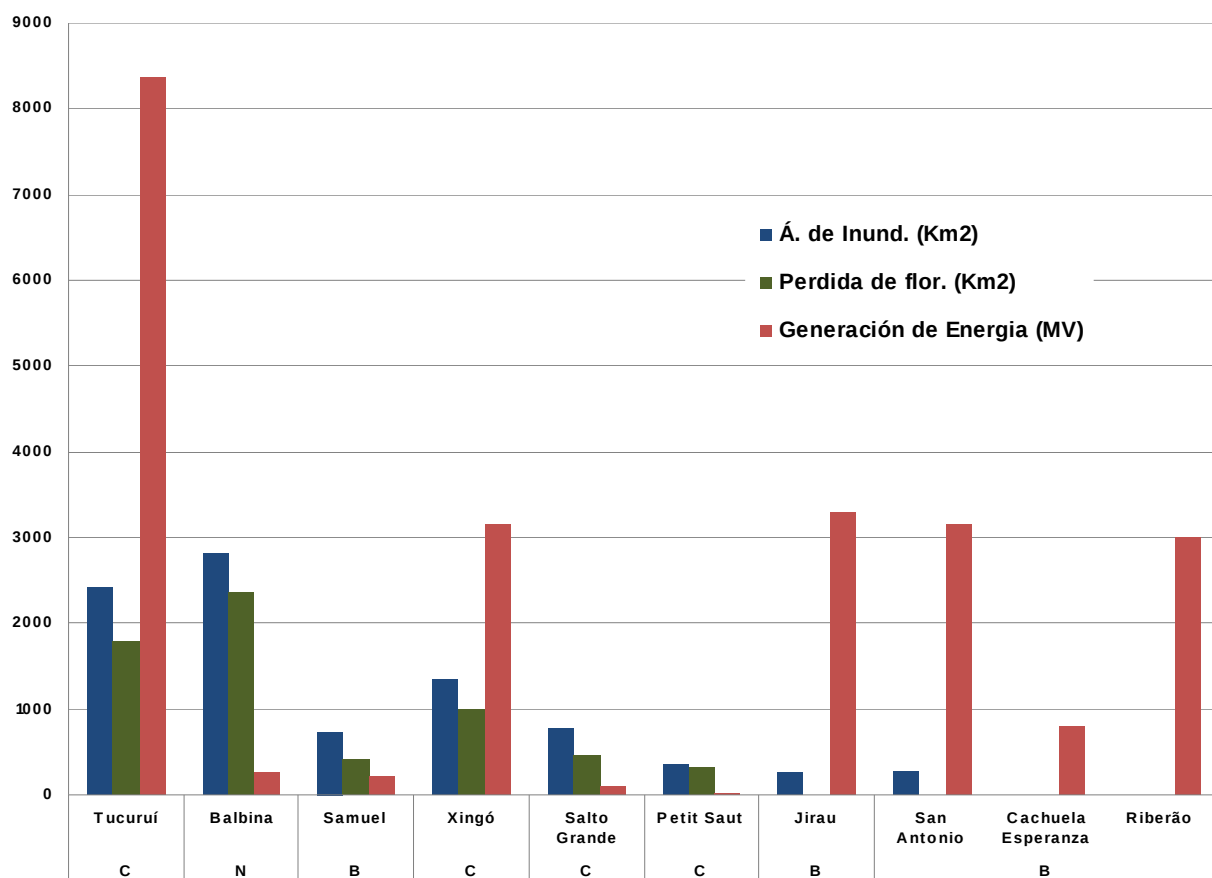


Figura IV 5. Área de inundación, Perdida de Floresta en represas modelo y Capacidad de generación de energía, en represas modelo de Sud América.

Para Bolivia, el Norte Amazónico boliviano que podría ser afectado por las inundaciones debidas a las represas cuya ubicación corresponde a una zona de intensa explotación maderera y de producción de castaña y goma (Figura IV.6).

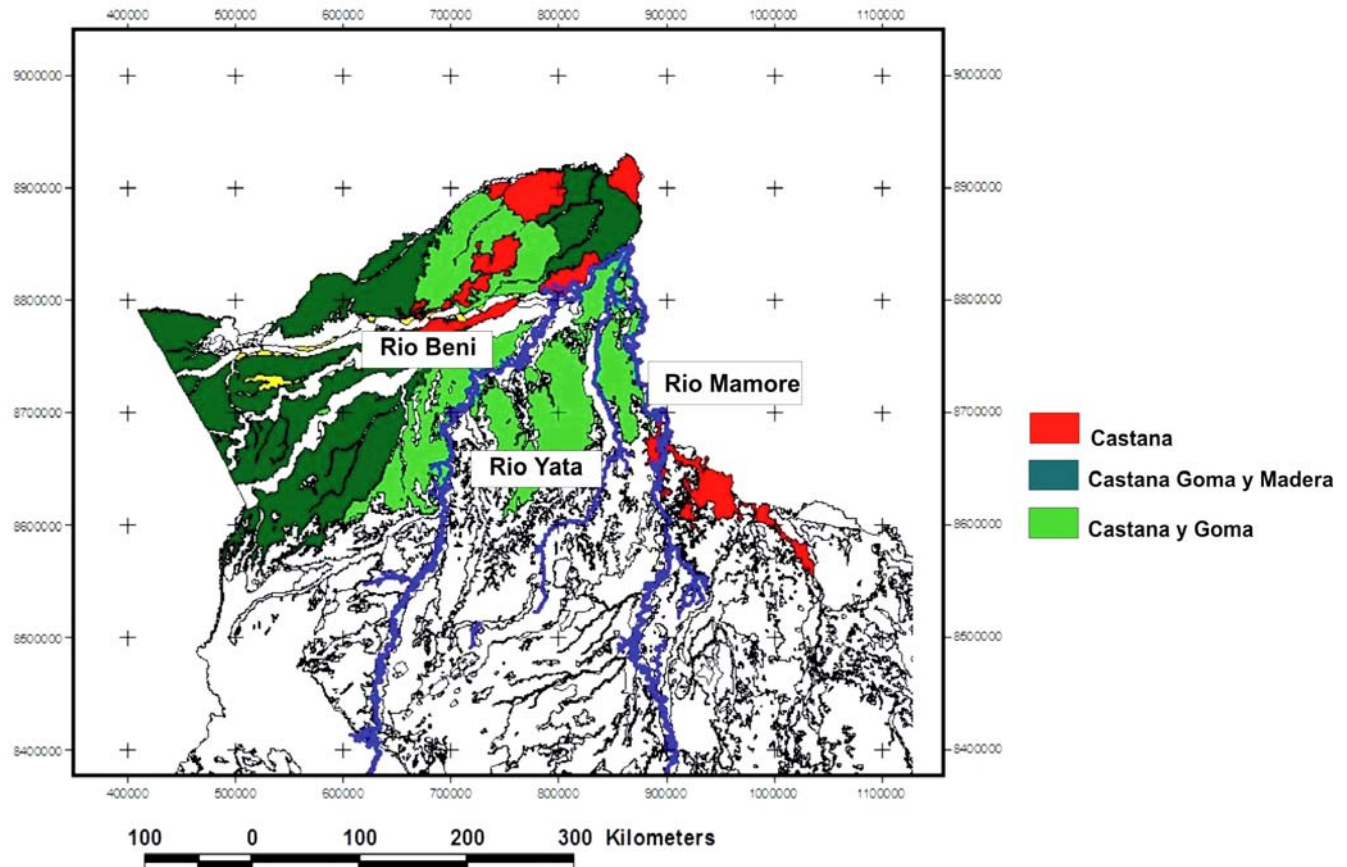


Figura IV 6. Mapa con áreas de vegetación con valor económico rodeando los posibles ríos que serán afectados en el norte amazónico de Bolivia.

Según las áreas del Norte Amazónico boliviano que serán inundadas por las represas, se puede prever un impacto ecológico directo sobre el bosque y su biodiversidad así también que un impacto económico por lo que esta zona esta rodeada por vegetación de aprovechamiento como la goma, castaña y otros árboles maderables que son parte importante de la economía local.

IV. 3.3- Ictiofauna

Uno de los impactos mas reportado de las represas concierne la ictiofauna que puede ser afectada tanto a nivel de su composición como de su producción (Figura IV.7). La mayoría de las represas (Tucuruí, Samuel, Itaipú, Salto Grande y represa en proyecto de construcción San Antonio) generan una interrupción de las rutas migratorias de grandes bagres. Los otros impactos corresponden a la desaparición de especies que no logran a pasar a través de los sistemas de traspasos o al contrario al surgimiento de especies invasoras que logran utilizar estos sistemas, la disminución y/o mortalidad de algunas especies y el aumento de otras y la contaminación de las especies por contaminantes que se almacenan en el embalse (como por ejemplo el mercurio). A parte de estos impactos ecológicos que pueden modificar el equilibrio ecológico de la zona, la perdida de producción pesquera es un impacto económico y social a veces reportado. Todas las represas estudiadas presentan por lo menos uno de estos impactos y a veces como Itaipú y Salto grande varios de ellos (Figura IV.7).

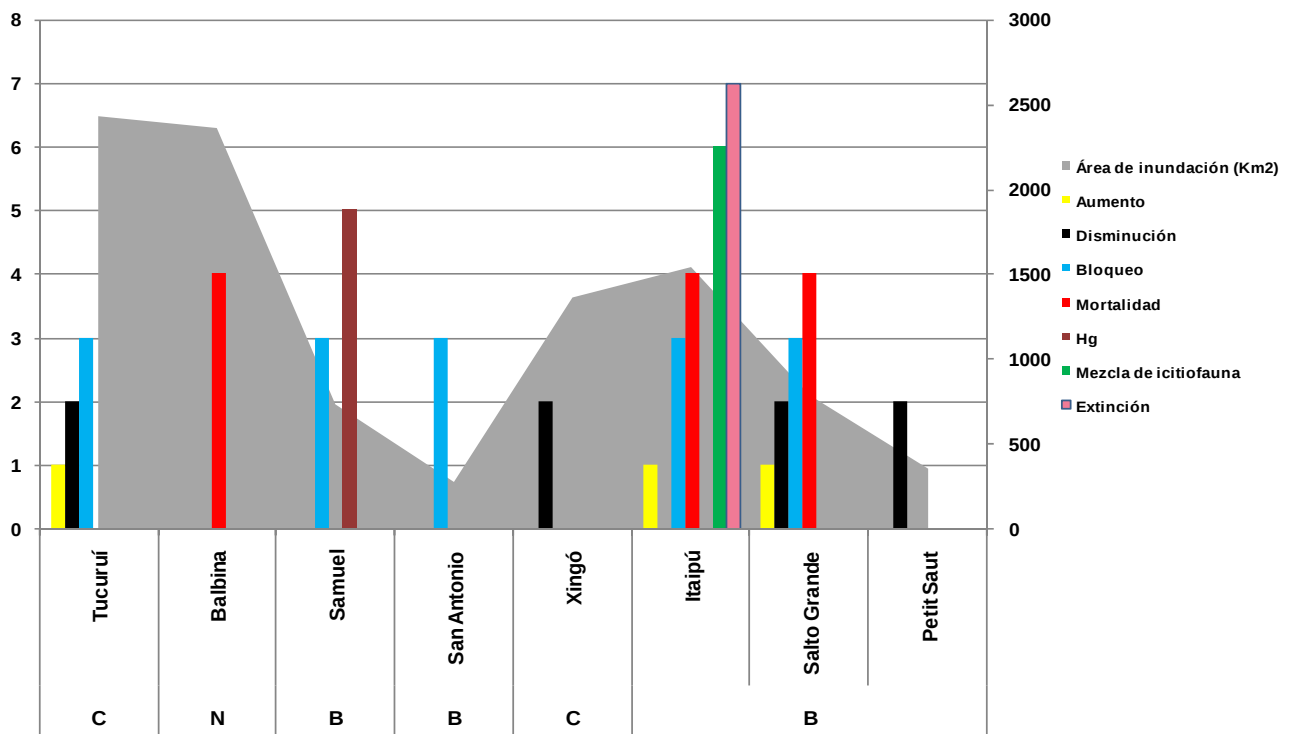


Figura IV 7. Efectos del área de inundación sobre los peces en represas modelo en Suramérica.

El Norte Amazónico boliviano presenta una alta diversidad de ictiofauna con alrededor de 354 especies (Maldonado 2002) con algunas especies migratorias de Pimelodidae y Characidae y con un fuerte endemismo en relación al resto de la amazonia (a consecuencia de la barrera física que ocasiona las cachuelas naturales del río Madera). Esta ictiofauna sostiene un importante sector pesquero dejando ver la sensibilidad de esa región a impactos tales como se han reportados en las otras represas. Estudios de estos impactos en el Norte Amazónico boliviano fueron desarrollados por Van Damme *et al.* (2008).

IV. 3.4- Malaria

Aquellas represas que son construidas en zonas tropicales presentan condiciones ecológicas favorables para la emergencia de enfermedades, tales como aquellas transmitidas por mosquitos (malaria, fiebre amarilla, dengue, etc.). Las áreas de inundación con baja profundidad y producción vegetal favorece la proliferación de los mosquitos.

En 2002, 99% de los casos de malaria reportado por Brasil ocurrieron en la Amazonía debido a las condiciones ecológicas y geográficas (Barbosa 2005). En zonas grandes de inundación, los aglomerados urbanos tales como Manaus y Porto Velho presentaron alrededor de 27% de casos de malaria en 2004 (Barbosa 2005). Estos casos demuestran que el problema de malaria es sensible y presenta niveles altos en condiciones naturales, la zona constituyéndose como zona endémica o hyperendémica por esa enfermedad (Figura IV.8).

En 1980 en la represa de Tucurui, se incrementó la masa de macrófitas acuáticas en la parte izquierda del lago, estas proporcionaron el aumento de insectos, generando una mayor transmisión de enfermedades y en especial de la malaria (CMB 1999). En la zona del río Madera, río tipo de aguas blancas, existen lugares con registros altos de malaria antes de la construcción de represas. Por ejemplo, Fearnside (2004) menciona que Ariquemes, ciudad donde esta ubicada la represa de Samuel, ya era conocida como “*capital mundial de la malaria*” y Porto Velho como “*campeón mundial de malaria*”. Se observó que después de la construcción de la represa de Samuel los casos de malaria aumentaron más allá de los extremos naturales (Fearnside, 2004). Los mismos efectos reportados para la represa Itaparica que además fue afectada

por otras enfermedades (dengue, encefalitis) que hicieron que muchas familias migran a otras áreas (Teixeira *et al.* 1993 In: Pilotto *et al.* 2007).



Figura IV 8. Zonas de Malaria en Brasil

En Bolivia las zonas de mayor riesgo en transmisión de malaria y mayores casos se encuentran en la zona del Norte Amazónico boliviano (Figura 9 y 10), teniendo una zona de *hiperendemia* en los departamentos de Beni, Pando y pequeña parte de La Paz. Las ciudades de Riberalta y Guayaramerín, las más cercanas de las represas del complejo hidroeléctrico del río Madera son las que muestran mayores registros de malaria, con más de 4000 casos en 2007 (Figura IV.10; Ministerio de Salud, 2007).

Debido al hiperendemismo de malaria en toda la zona del río Madera y en particular en el Norte Amazónico boliviano, existe un alto riesgo que las represas proyectadas ocasionaran un aumento en la transmisión de la malaria (y posiblemente de otras enfermedades). Las dos represas en el territorio boliviano (Cachuela Esperanza,

Riberão) podrían todavía sufrir un mayor impacto debido a que presentarán áreas de inundación más importante que las dos represas del territorio brasileiro (San Antonio y Jirau).

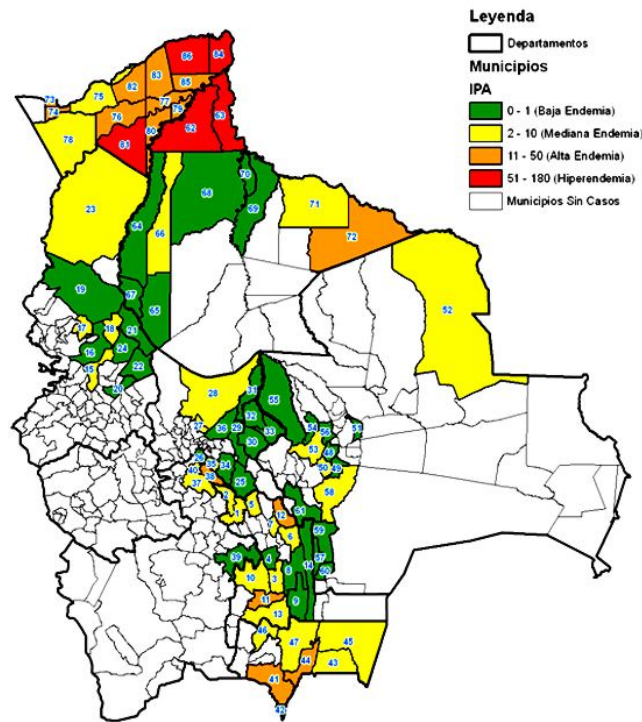


Figura IV 9. Situación epidemiológica de malaria en Bolivia gestión 2007 (Fuente: Ministerio de Salud y Deportes, Unidad Nacional de Epidemiología). Las represas del complejo hidroeléctrico del río Madera están proyectadas en las zonas de mayor endemismo, generando una situación muy sensible y de alto riesgo.

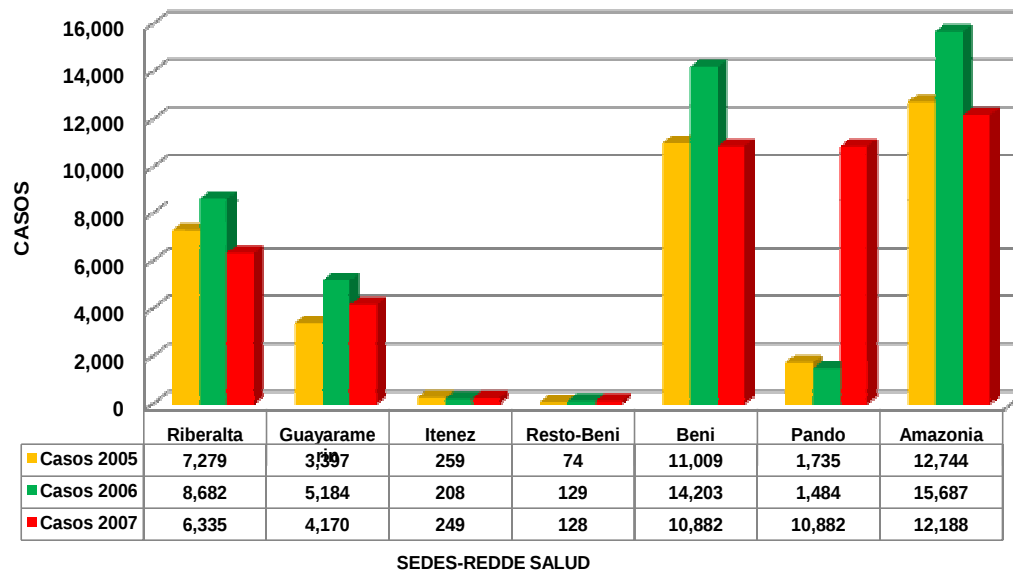


Figura IV 10. Casos de Malaria en el Norte amazónico de Bolivia (Fuente: Ministerio de Salud y Deportes Unidad Nacional de Epidemiología)

IV. 3.5- Mercurio

La contaminación por el mercurio es uno de los riesgos de impactos en las represas Sudamericana. Se han reportado un incremento de las concentraciones de mercurio en los peces en las represas de Samuel (Fearnside 2004), Tucuruí (Porvari 1995) y Petit Sault (Boudou 1995). En esa última se estimó que los peces del embalse contienen diez veces más mercurio que los peces de las mismas especies en los ríos arriba del embalse (Boudou 1995).

Si bien el mercurio tiene orígenes naturales, en especial en la región Amazónica donde su concentración en el suelo es elevada, las actividades antrópicas que provocan una erosión acentuada o que aportan mercurio exógeno (como la minería) han provocado contaminaciones a veces severas en distintas regiones del mundo. En el caso particular de Bolivia, el chaqueo, los modos de cultivo actuales sobre pendientes elevadas sin terrazas y las actividades de explotación auríferas, cada vez más numerosas en la Amazonía, se constituyen en las principales causas del incremento de la contaminación con mercurio en especial en los arroyos y río abajo de las minas auríferas en las faldas de los Andes. Las concentraciones de mercurio

analizadas en estas aguas superficiales superan hasta más de 500 veces el valor promedio mundial (Maurice Bourgoïn *et al.* 2001).

Las altas concentraciones y contaminación por el mercurio no se limitan a las zonas auríferas y subandinas. El mercurio liberado por las actividades antrópicas transita por el agua junto con los sedimentos y se deposita en las zonas de menor corriente en el río mismo o durante las inundaciones en las lagunas adyacentes al río. Los medios acuáticos lenticos, con poca velocidad de corriente, como las lagunas en la llanura de inundación natural, constituyen medios favorables a la metilación del mercurio, que se transforma entonces de una forma inorgánica a una forma orgánica (metil-mercurio) de alto potencial tóxico y que puede generar efectos graves sobre la salud. Esa sustancia entra en la cadena trófica y se acumula en los organismos a medida que crecen y que comen otros organismos contaminados. Los peces y en particular los de fin de cadena trófica, como las especies piscívoras, presentan concentraciones de mercurio más altas que los otros organismos como los invertebrados, y los hombres que comen estos peces pueden presentar todavía concentraciones mas altas de mercurio.

La llanuras de inundación naturales así también que las represas favorecen varios procesos naturales, en especial la descomposición de la materia orgánica y producción de plantas acuáticas⁴, que aumentan la tasa de metilación (Guimarães, 2001) y en consecuencia las concentraciones en metil-mercurio de los organismos acuáticos. En el caso de las represas este fenómeno es particularmente fuerte durante los primeros años siguiendo la inundación del embalse y a mas largo plazo va a depender de la cantidad de mercurio que llegara al embalse (en particular procedente del río y entonces de las actividades antrópicas que se llevan acabo en la parte subandina).

⁴- **descomposición de la materia orgánica**, sobre todo si los constructores no cortaron la vegetación antes de inundar la zona, y el consumo del oxígeno llevando una parte del embalse en condiciones hipóxicas y/o anóxicas. Las fuertes condiciones reductoras favorecen la liberación del Hg de los suelos y sedimentos de fondo, y su metilación bacteriana.

- **producción de plantas (macrófitas) acuáticas**. Se han medido tasas altas de metilación en las raíces adventivas (Guimarães *et al.*, 1998), hasta 30 veces superiores a las medidas en los sedimentos de fondo.

Los dos factores 1) tasas de ingreso y de sedimentación de mercurio y 2) tasa de transformación de este mercurio en metil-mercurio, explican porque las zonas bajas de los ríos y en especial en las llanuras de inundación deben ser consideradas como zonas muy sensibles a la contaminación por el mercurio. Una evaluación de la magnitud potencial de la contaminación por mercurio necesitaría una estimación de estos factores además de una estimación de la contaminación actual de elementos claves de la cadena trófica como son los peces por ejemplo. Existen datos parciales en la región amazónica pero que no son suficientes como para hacer una evaluación global, pero si por dar la medida de la sensibilidad de la región del Norte Amazónico boliviano al riesgo de contaminación por el mercurio.

Entre los grandes ríos de la Amazonía boliviana, el río Beni es el que presenta la mayor carga sedimentaria (datos IRD/Hybam, Figura IV. 11).

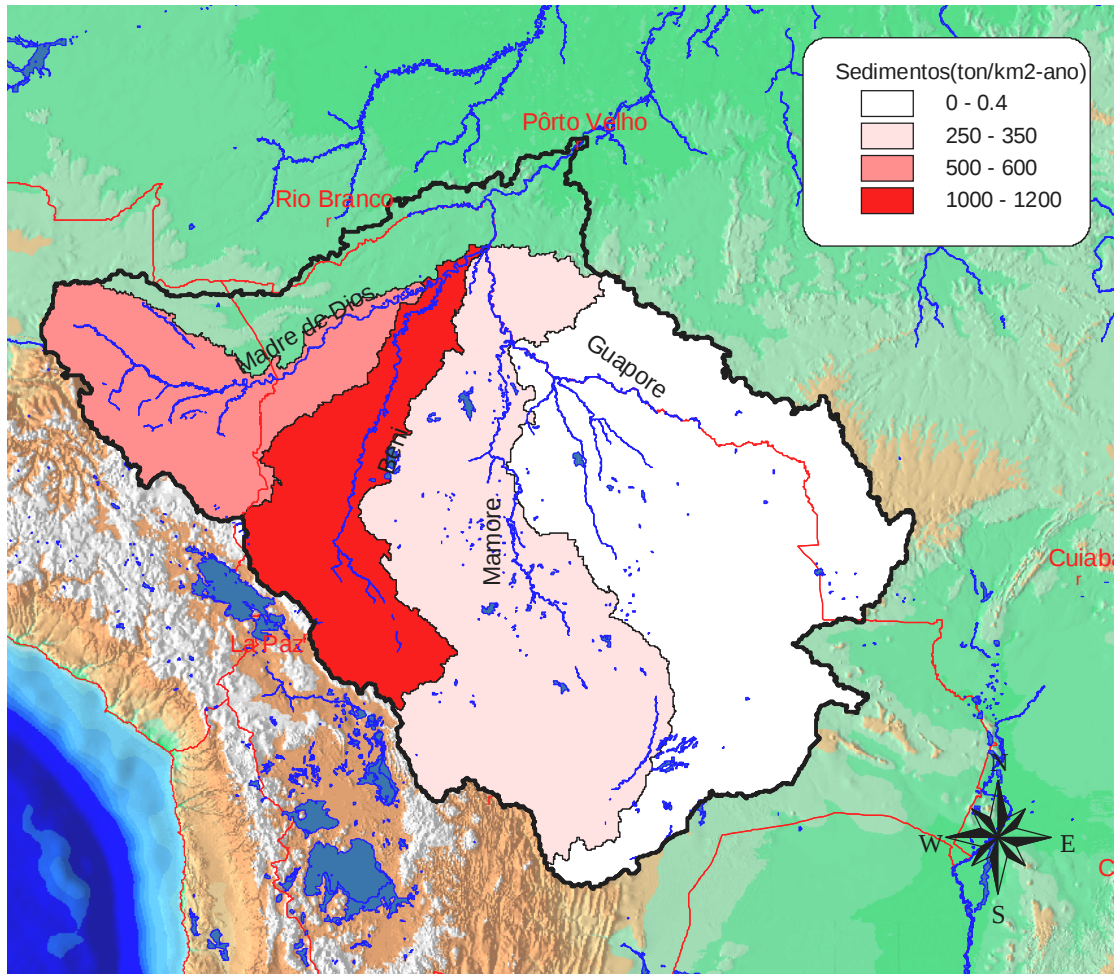


Figura IV 11: Carga sedimentaria de los grandes ríos de la Amazonia boliviana. Fuente J. Molina / IRD-Hybam.

Los aportes totales de mercurio en el río Beni están estimados entre 14 a 30 toneladas por año (datos IRD-Hybam). De forma general el ingreso de mercurio esta en relación directa con el volumen de agua y entonces probablemente de sedimento que circula por el río (Maurice, 2001; figura IV.12). Por lo tanto se pudo estimar que 80 a 88% del mercurio están exportados en época de lluvia, entonces cuando las inundaciones permiten que esta agua y mercurio pueden llegar hasta lagunas adyacentes al río.

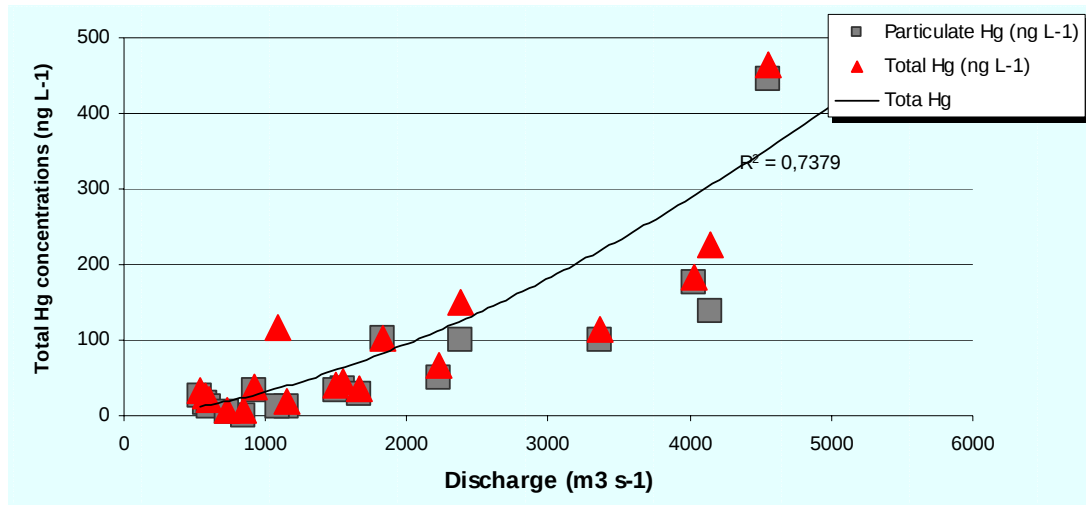


Figura IV 12. Control hidrológico de las concentraciones en Hg total (ng/L) en las aguas de superficie del río Beni (Maurice Bourgoïn, 2001).

El balanceo entre ingreso y sedimentación de los sedimentos (sólidos suspendidos transportado por el agua) y de mercurio inorgánico demuestran que actualmente en el río Beni, 40% del sedimento (Figura IV.13a) y 22,5% del mercurio (Figura IV.13b) esta retenido por la llanura de inundación (datos IRD-Hybam, no publicado). La construcción de represas en el borde de la llanura de inundación incrementará estos porcentajes de retención en especial en las represas localizadas más arriba en el complejo hidroeléctrico (Cachuela Esperanza y Riberão, si el proyecto se completa). Un análisis y una modelación hidráulica incluyendo los sedimentos permitirán evaluar el impacto de las diferentes represas sobre las tasas de sedimentación.

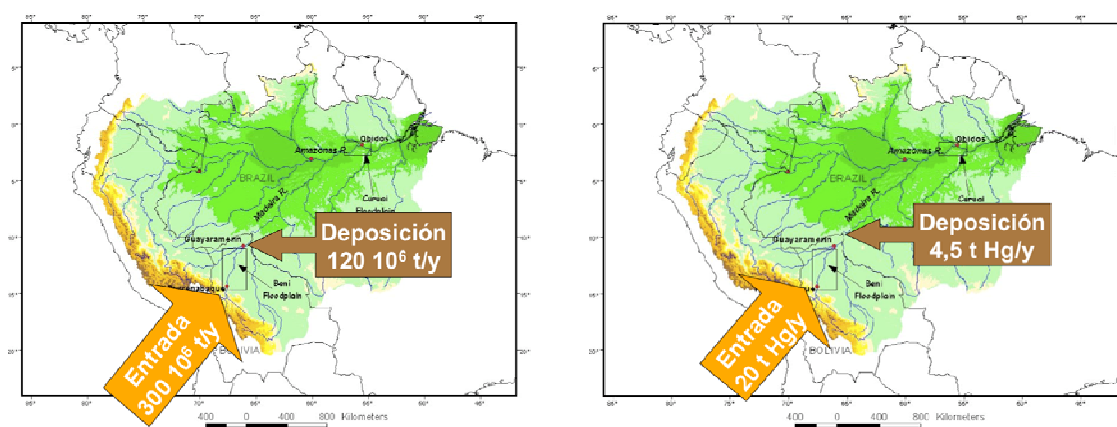


Figura IV 13- Balanceo de sedimentos y de mercurio en el río Beni. Fuente: IRD/Hybam

A largo plazo, esa situación no es constante por lo que, como mencionado anteriormente, depende del nivel natural de mercurio en los suelos en las partes mas altas de la cuenca, de la tasa de erosión natural, pero también de la tasa de erosión generada por las actividades antrópicas y de un eventual aporte en mercurio exógeno por la minería de oro por ejemplo. La evolución sobre cien años de las concentraciones de mercurio en los sedimentos de los ríos Mamoré y Beni demuestra que existe desde los años 1970-1980 un incremento de estos valores (Maurice-Bourgoin *et al.* 2004, Figura IV.14). Esa evolución se puede explicar por la intensificación de las actividades antrópicas y entonces es probable que la tendencia observada siga en las próximas décadas, incrementando al mismo tiempo los riesgos de una contaminación por el mercurio en la región.

No existen datos consistentes de tasa de metilación y de concentraciones de mercurio en los peces por la región. Sin embargo cuatro estudios presentan datos de concentraciones de mercurio en las poblaciones ribereñas de la zona de las cuales 3 presentan niveles que sin sobrepasar el nivel de toxicidad reconocido internacionalmente ($10 \mu\text{g/g}$, valores OMS) se acercan de este valor (Barberi 2006, Figura IV. 15).

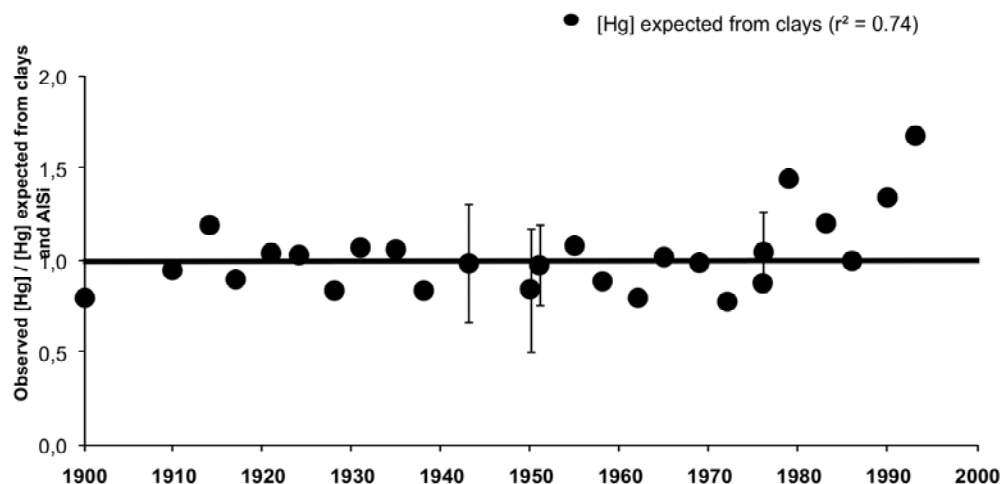


Figura IV 14. Evolución temporal (1900-2000) de las concentraciones de mercurio en el río Beni. Los valores corresponden a los valores observados divididos por los valores esperados en relación a la cantidad de arcilla contenido en testigos de sedimentos de los ríos Mamoré y Beni (Maurice-Bourgoin *et al.* 2004).

La sinergia entre un aumento de los aportes de mercurio debido al incremento de las actividades humanas en las cuencas altas y en la llanura, la retención del mercurio por los embalse y el aumento de condiciones ambientales favorable a la metilación del mercurio genera un entorno favorable y sensible por una potencial contaminación que tendrá repercusiones hasta la población humana, muy expuesta a tal riesgo por lo que el pescado es una de sus principales fuentes de alimentación. Cabe recalcar también que la bajada del estadio de salud general de las poblaciones, a raíz de otros riesgos potenciales debido al aumento de las superficies de inundación, como por ejemplo el paludismo, la fiebre amarilla o la dengue, aumenta su sensibilidad a la intoxicación por el mercurio.

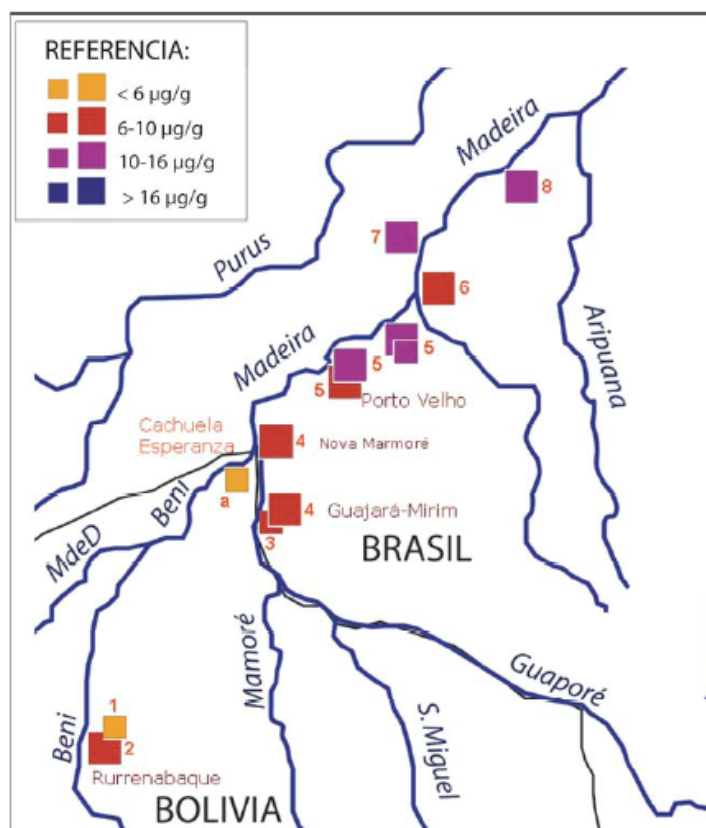


Figura IV 15. Concentraciones de mercurio observados en los cabellos de pobladores ribereños de la cuenca del río madera (Barberi 2006).

IV. 4. Conclusiones

El análisis de comparación de las condiciones ambientales y de los impactos directos e indirectos que se han producido en 11 represas tropicales de Sud América demuestran un panorama complejo, necesitando todavía una interpretación mas completa. Esa interpretación es debilitada debido a que la información que existe no se encuentra fácilmente accesible. Un trabajo a más largo plazo podría plantear una sistematización de la información gris no divulgada y disponible solo localmente sobre los principales temas de impactos (salud, emisión de gases, perdida biodiversidad, etc.) a nivel de la zona tropical de Sudamérica, para generar una línea base de evaluación de impactos más eficiente y pertinente.

Sin embargo aunque no existe evaluación ambiental detallada del proyecto de complejo hidroeléctrico del río Madera por el Norte Amazónico boliviano, nuestro análisis muestra que por los principales temas de impactos indirectos esa región presenta una situación sensible (emisión de gases a efecto invernadero, ictiofauna, perdida de bosque y de las actividades de aprovechamiento de los recursos silvestres) y a veces critica como en el caso de los impactos que pueden afectar la salud humana (mercurio y malaria). Los datos actualmente disponibles no permiten evaluar la magnitud de estos impactos y por lo tanto recomendamos que se incentive y realiza a corto plazo estudios que permitirán una evaluación más precisa y global del proyecto de complejo hidroeléctrico del río Madera enfocando en especial la parte boliviana.

IV. 5. Bibliografía

Abell R., Thieme M., Revenga C. *et al.* 2008. Freshwater Ecoregion of the World: A New Map of Biogeographic units for freshwater Biodiversity Conservation. *BioScience*. 58:5.

Boudou A., Maury-Brachet R., Coquey M., Durriex G., Cossa D. 2005. Synergic effect of goldmining and damming on mercury contamination in fish. *Environmental Science & Technology* 39, 2448-2454.

CMB 1999. Estudos de Caso da Comissão Mundial de Barragens. Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Brasil). Comissão Mundial de Barragens Estudo de Caso Brasileiro, UHE Tucuruí, Relatório de Escopo.

Dantas 2008. A Construção de Hidrelétricas na Região Amazônica e o Desenvolvimento Sustentável. Carbono Brasil.

Dos Santos M. 2000. Inventário de emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas. Tese de post-graduação. Rio de Janeiro.

Fearnside, P.M. 1989. Brazil's Balbina Dam: Environment versus the legacy of the pharaohs in Amazonia. *Environmental Management*. 13(4): 401-423.

Fearnside, P.M. 2002. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil Tucuruí Dam) and the energy policy implications. *Water, Air and Soil Pollution* 133, 69-96.

Fearnside, P.M. 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provided a springboard for rethinking a supposedly clean energy source, Editorial Comment. *Climatic Chang*. 66, 1-8.

Filho A, S. 2004. Conhecimento crítico das mega – hidrelétricas: para avaliar de outro modo alterações naturais, transformações sociais e a destruição dos monumentos fluviais. Comunicação apresentada ao GT Energia e Meio Ambiente, do 20 Encontro nacional da ANPPAS - Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, Indaiatuba, SP, maio de 2004. Guimarães J.R., 2001. Les processus de méthylation du mercure en milieu amazonien. In : Le mercure en Amazonie : Rôle de l'homme et de l'environnement, (Carmouze J.P., Lucotte M. and Boudou A., Eds.) IRD Publications (Expertise Collégiale), pp :273-297.

Galy-Laceaux, C., Delmas, R., Kouadio, G., Richard, S. and Gosse, P. 1999. Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions. *Global Biogeochemical Cycles* 13, 503-517.

Junk, W. J. 1997. The central Amazon floodplain. Ecology of a pulsing system. Berlin, Springer.

Kemenes A., Bruce R., Melack J. 2006. Gas release below Balbina Dam. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28. INPE, p. 663-667.

Ledec G. & Quintero J.D. 2003. Good dams and bad dams : environmental criteria for site selection of hydroelectric projects. The World Bank, Latin America and Caribbean Region, Sustainable Development Working Paper # 16. 19p.

Maurice-Bourgoin L., 2001. El mercurio en la Amazonia Boliviana – Síntesis del conocimiento sobre la distribución del mercurio en las aguas, los sedimentos y los peces – Impacto sobre la salud humana. IRD Publications, (L. Maurice-Bourgoin, Ed.), 80 p.

Maurice-Bourgoin L., Aalto R., Rhéault I. and Guyot, J.L. 2004. Use of 210pb geochronology to explore the century-scale Mercury contamination history and the importance of floodplain accumulation in andean tributaries of the amazon river. IV South American Symposium on Isotope Geology 449-452. <http://www.brasil.ird.fr/symplisotope/Papers/ST4/ST4-13-Maurice.pdf>.

Ministério de Minas e Energia. 2007. Projeto Rio Madeira - Estudos Hidráulicos e de Sedimentos Relatório Preliminar Brasília – DF – Brasil.

Porvari P. 1995. Mercury levels of fish in Tucuruí hydroelectric reservoir and river in river Mojú in Amazonia, in the state of Pará, Brazil. The Science of Total environment.. 175. p.109-117.

Sioli, H. 1975. Tropical River: The Amazon. In: Whitton, B.A, ed. River Ecology. Berkeley: U.C. p. 461-487.

Teixeira Mda G. Costa Mda C, de Carvalho V.L., Pereira Mdos S, Hage E. 1993. Gastroenteritis epidemic in the area of the Itaparica Dam, Bahia, Brazil. Bull Pan Am Health Organ 27(3):244–53. In: Pilotto, L. S. Chapter 29: Epidemiology of cyanobacteria and their toxins . Faculty of Medicine, University of New South Wales, Australia.

Walker I. 2004. Trophic interactions within the *Utricularia* habitat in the reservoir of the Balbina hydroelectric powerplant (Amazonas, Brazil). Acta Limnol. Bras., 16(2):183-191.

WCD. 2000. “Dams and Development. A new framework for decision-making”, The Report of the World Commission on Dams, Earthscan Publications, London, November.

WCD. 1999. “Dams and Development. Tucuruí Hydro-Power Complex (Brazil). Brazil Case study, Tucuruí Hydro-Power Complex, Scoping Report.

V - Recomendaciones y acciones técnicas a implementar para avanzar en la evaluación del proyecto

Marc Pouilly

Siguiendo los principios internacionales en vigencia, en la reunión de la comisión impulsora y del comité técnico “río Madera” que se realizó en la ciudad de La Paz el 3 de junio de 2008, el Sr. Presidente de la República de Bolivia, Evo Morales Ayma, manifestó su preocupación acerca de la evaluación ambiental del proyecto de las represas del río Madera. El Sr. Presidente denunció en primera instancia la aproximación de los trabajos de evaluación de los impactos ambientales en los cuales se describe potenciales impactos sin cuantificarlos realmente. Recalcó también la necesidad de plantear alternativas para lograr el objetivo del gobierno de generar energía para todos, y minimizar los impactos ambientales. Proponemos reflexionar recomendaciones sobre estas dos orientaciones:

V.1- Mejoramiento de la calidad de la evaluación ambiental de las represas del río Madera

Los primeros resultados demuestran que a nivel de los impactos directos, las dos represas de Cachuela Esperanza y Riberão podrían retener una gran parte de los sedimentos transportados por los ríos formadores del río Madera. En una lógica de proyectos integrados, estas dos represas tendrán un tiempo de vida útil más corto por el relleno de sedimento y aumentaran el tiempo de vida útil de las dos represas brasileras y posiblemente permitirán un rendimiento final mayor. Sin embargo, debido a las condiciones particulares de hidrología, calidad de agua y de relieve de la parte boliviana, esa configuración producirá impactos probablemente más fuertes en la llanura boliviana, donde las inundaciones serán de mayor alcance, alterando las condiciones económicas y ecológicas de esa región en mayor grado que las de la región del Alto-Madera Brasileiro.

La primera recomendación es considerar, también a nivel ambiental, que se trata de un proyecto integrado y entonces realizar la evaluación de impacto ambiental por el proyecto completo (cuatro represas) y no fase por fase. Al mismo tiempo debido a los impactos más importantes en el territorio boliviano, las medidas compensatorias deberían ser evaluadas en términos generales de costo y beneficio para los dos países, lo que será más complicado si los proyectos se tratan de forma separada.

Aunque la evaluación de impacto ambiental de las represas Brasileiras está muy avanzada, la evaluación de las represas de Cachuela Esperanza y Riberão no puede realizarse con precisión por la falta de datos. ***La segunda recomendación es de incentivar lo más pronto posibles estudios ambientales y sociales que permita tener una mejor resolución y pertinencia en la evaluación ambiental de estos proyectos.*** A raíz de las conclusiones establecidas en este informe proponemos como primeras orientaciones de estudios a realizar por orden de importancia y factibilidad:

- 1- *Hidrología / topografía-batimetría:* Obtener datos confiables y precisos de la dinámica hidrológica de los ríos y de las inundaciones así mismo que datos de topografía y batimetría que permitan mejorar el poder de predicción de los cambios directos es sin duda la primera e imprescindible tarea. De estos trabajos dependerá la capacidad de tener un mejor entendimiento y pronóstico sobre los demás impactos. Por lo tanto sugerimos seguir con el trabajo preliminar realizado en este informe y realizar un estudio más preciso y de mayor alcance cruzando los dos métodos clásicos o de teledetección.
- 2- *Mercurio:* El mercurio es un problema de gran alcance para la zona Amazónica. Ya se ha establecido que las actividades humanas que generan un cambio en la cobertura vegetal y de forma más general en la erosión de los suelos son factores de importancia para explicar la contaminación por el mercurio. Las concentraciones de mercurio que fueron detectadas en el río Beni y el crecimiento de las actividades humanas en el Norte Amazónica de Bolivia generan un potencial de contaminación que será agravado por la presencia de represas. Los trabajos realizados hasta ahora son preliminares y conciernen la cuantificación del mercurio en las aguas y en los sedimentos. Por lo tanto sugerimos plantear un estudio que permita evaluar el potencial actual de metilación del mercurio en la zona y evaluar escenarios de evolución de la dinámica hidrológica que podrían imponer las represas. Al mismo tiempo sugerimos que se realice un estudio completo de las concentraciones de mercurio a lo largo de la cadena trófica y en especial en las especies de consumo como son los peces. Un tal estudio será una base imprescindible para monitoreo futuros que deberían acompañar la realización del proyecto hidroeléctrico.

- 3- *Salud*: Un futuro proyecto de investigación y de evaluación ambiental debería contemplar la parte de salud, en especial enfocada sobre la malaria que es la enfermedad la más favorecida por las represas (capítulo IV).
- 4- *Flora y fauna*: Estudios de relevamiento de presencia de especies y de sensibilidad de las especies a los cambios de régimen de inundación son importantes para poder evaluar los impactos de las represas sobre las actividades humanas directamente vinculadas al aprovechamiento de recursos naturales como la pesquería y la explotación forestal. Estos estudios básicos al mismo tiempo de servir como base de un monitoreo serán de gran aporte para iniciar un trabajo de identificación de medidas compensatorias.

V.2 - Generación y evaluación de alternativas energéticas minimizando los impactos negativos

Creación de una zona de Desarrollo Integrado en el Norte Amazónico boliviano.

Evaluación de factibilidad de un proyecto de abastecimiento energético local (con una represa mas pequeña para generar alrededor de 50 MW en Cachuela Esperanza como fue propuesto en proyectos anteriores en vez de los 600 MW previsto actualmente) que permitirá mantener con mayor seguridad y probablemente impulsar las actividades económicas tradicionales como la producción de castaña, la explotación forestal, la ganadería y la pesquería que podrían ser alteradas por un proyecto grande.

Creación de un comité interministerial de evaluación anticipada de alternativas energéticas a escala nacional

Conformación de un grupo de trabajo con técnicos en particular de los vice-ministerios de Biodiversidad y Energía y unos expertos de apoyo para realizar una ficha de pre-evaluación (energética, económica, social, ambiental) de cada uno de los proyectos alternativos presentados por el vice-ministerio de energía en la reunión del 3 de junio (Miguillas, Misicuni, Bala, Cachuela Esperanza 50MW/600MW, etc.). Esas fichas buscaran entre otras cosas determinar la información necesaria para asegurar la buena evaluación del proyecto. Permitirán también realizar un estudio comparativo de las diferentes opciones que se ofrecen al país, basándose por ejemplo sobre los criterios de selección de sitios de represas propuestos por Ledec & Quintero (2003).