



Desarrollo Hidroeléctrico y Servicios Ecosistémicos en Centroamérica

Elizabeth P. Anderson

**Banco
Interamericano de
Desarrollo**

Unidad de
Salvaguardias
Ambientales

NOTA TÉCNICA

IDB - TN - 518

marzo 2013

Desarrollo Hidroeléctrico y Servicios Ecosistémicos en Centroamérica

Elizabeth P. Anderson



Banco Interamericano de Desarrollo

2013

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Anderson, Elizabeth P.

Desarrollo hidroeléctrico y servicios ecosistémicos en Centroamérica / Elizabeth P. Anderson.
p. cm. (IDB Technical Note; 518)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Water resources development—Central America. 2. Water-power—Central America. 3. Ecosystem services—Central America. I. Banco Interamericano de Desarrollo. Unidad de Salvaguardias Ambientales. II. Title. III. Series.

Códigos JEL: Q2, Q5, Q57

Palabras clave: energía hidroeléctrica, iniciativas de conservación, cambio climático, evaluación del caudal ecológico

<http://www.iadb.org>

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright © 2013 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

Tabla de Contenido

Abreviaturas	ii
Resumen.....	iii
1. Los ríos de Centroamérica.....	1
2. Extensión y tendencias en el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Centroamérica.....	4
3. Comprensión de las consecuencias ecológicas y sociales de la modificación de los caudales en Centroamérica	7
4. Consideración de la energía hidroeléctrica en Centroamérica en el contexto del cambio climático.....	11
5. La búsqueda de equilibrio.....	14
6. Consideración y aplicación de criterios formulados a nivel internacional para seleccionar la ubicación y para la operación de proyectos hidroeléctricos	14
7. Creación de conjuntos de datos y marcos sobre Centroamérica para la evaluación del caudal ecológico y la aplicación de los caudales recomendados	16
8. Planificación a escala del paisaje fluvial y redes regionales de comunicación.....	20
9. Exploración de los vínculos entre la energía hidroeléctrica y otras iniciativas de conservación en Centroamérica	22
10. Mantener algunos ríos a cubierto de la explotación hidroeléctrica	24
11. Conclusiones.....	24
Cuadros	26
Referencias.....	31

Abreviaturas

ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
MW	Mega Watt
PES	Pagos por Servicios Ambientales (por sus siglas en inglés)

Resumen

La región neotropical, que comprende Centroamérica, América del Sur y partes del Caribe, es drenada por una diversidad de sistemas fluviales que albergan buena parte de la variedad mundial de especies de organismos de agua dulce y suministran bienes y servicios cruciales a millones de personas. Por ejemplo, se estima que 50% de las aproximadamente 12.000 especies de peces de agua dulce del mundo viven en ríos y lagos neotropicales. Estas cifras corresponden aproximadamente a entre 20% y 25% de todos los peces, considerando tanto las especies de agua dulce como las marinas¹. Las vidas de las personas y sus medios de subsistencia a menudo dependen íntimamente de los ecosistemas de agua dulce: sus industrias pesqueras suministran una importante fuente de proteínas y de ingresos, los ríos son rutas críticas —o con frecuencia las únicas— de transporte y comunicación, y gran parte de la diversidad cultural de la región se ha desarrollado a lo largo de corredores fluviales en zonas silvestres del Amazonas y de las tierras bajas del litoral caribeño de Centroamérica.

El uso de los ríos para generación hidroeléctrica es un servicio fundamental de los ecosistemas de agua dulce que en los últimos 25 años ha ido adquiriendo mayor importancia, alcance e impacto. Desde los años ochenta se han construido decenas de presas en ríos neotropicales y cientos más están en proceso de consideración, en etapas avanzadas de planificación o bajo construcción². La energía hidroeléctrica es un componente importante del desarrollo y ayuda a cubrir las necesidades de electricidad, pero a menudo también acarrea un sinnúmero de cambios ambientales y sociales que pueden afectar los ecosistemas de agua dulce y sus servicios.

El caso de Centroamérica —que para los fines de este documento comprende a Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá— ilustra la importancia de los ríos desde las perspectivas tanto ecológica como socioeconómica y también algunas de las tendencias del creciente desarrollo de la energía hidroeléctrica que está ocurriendo actualmente en la

¹ Reís et al. 2003.

² Anderson et al. 2006b; Finer y Jenkins 2012.

región neotropical³. Los ríos centroamericanos cobijan a cientos de especies características de peces y camarones, muchas de ellas migratorias, que dependen de un régimen fluvial natural y de la conectividad aguas arriba y aguas abajo para sobrevivir. Las poblaciones humanas obtienen de las aguas superficiales la mayor parte del agua que requieren para su consumo, y los ríos proporcionan una fuente de alimentos, ingresos y materiales para construcción, sirven como rutas de transporte y guardan fuertes vínculos con la identidad cultural de los pueblos rurales. La energía hidroeléctrica es una fuente crítica de electricidad en toda la región y las presas se consideran importantes para la estabilidad económica y el desarrollo futuros en Centroamérica. Sin embargo, las presas existentes en Centroamérica se han relacionado con la disminución de especies migratorias y delicadas de peces, con situaciones que comprometen otros servicios ecosistémicos y con impactos negativos sobre la salud y el bienestar de las personas⁴.

Este documento ofrece una descripción general de las características de los ríos centroamericanos y de los servicios de los ecosistemas de agua dulce conexos, analiza las tendencias del desarrollo de la energía hidroeléctrica y las consecuencias ambientales y sociales que se conocen y ofrece sugerencias para encontrar un equilibrio entre la energía hidroeléctrica y la protección de otros servicios de ecosistemas de agua dulce, en función de las experiencias de la región.

³ Anderson et al. 2006b.

⁴ McCully 1996; Bonta 2004; Anderson et al. 2006a; McLarney et al. 2010.

1. Los ríos de Centroamérica

Centroamérica es una de las 34 regiones del mundo con el más alto nivel de variedad de especies y endemismo, por lo que ha sido foco de muchas investigaciones ecológicas e iniciativas de conservación con apoyo internacional en los últimos 50 años⁵. Los ecosistemas terrestres, particularmente los bosques tropicales, han atraído la mayor parte de la atención de la comunidad de conservación y de investigación ecológica. De hecho, muchos de los conocimientos que existen actualmente en el mundo sobre los ecosistemas tropicales y sobre los modelos para su conservación provienen de estudios llevados a cabo en Centroamérica, en especial en Costa Rica. En cambio, los entornos de agua dulce de la región se han estudiado relativamente poco, y los ecosistemas de agua dulce apenas están empezando a considerarse más explícitamente en la planificación para la conservación⁶. Esta tendencia no es exclusiva de Centroamérica⁷.

Recientemente se han hecho intentos por comprender la estructura ecológica y la función de los ecosistemas centroamericanos de agua dulce a través de un modelo anidado que considera ecorregiones, unidades ecológicas de drenaje (la cuenca de un río, por ejemplo), los sistemas ecológicos lacustres y lóticos (es decir, de lagos o ríos individuales) y especies de agua dulce⁸. El nivel geográfico más alto de este modelo, la ecorregión de agua dulce, se define por sus regímenes de clima, geología o historia evolutiva y no solamente por los límites de sus cuencas⁹. Para el caso de Centroamérica se han definido 11 ecorregiones de agua dulce que se extienden desde sur de Chiapas en México hasta el Darién en Panamá (véase el Cuadro 1)¹⁰.

En cuanto a los ecosistemas fluviales, o lóticos, se pueden identificar algunas características generales de un lado a otro del istmo. Los ríos tropicales de Centroamérica son sistemas muy heterogéneos, que van desde torrentes montañosos de corrientes rápidas en zonas de relieves altos hasta ríos de flujo lento que serpentean por las tierras bajas. Las cadenas montañosas que cruzan longitudinalmente gran parte del istmo dividen a Centroamérica en las vertientes del Caribe y del Pacífico, que experimentan regímenes climáticos distintos, particularmente en lo que a precipitación se refiere. Estas diferencias se reflejan en los regímenes hidrológicos de los ríos: muchos de los ríos en la vertiente del Caribe drenan paisajes más

5 Myers et al. 2000; Conservación Internacional 2007.

6 Paaby 2008.

7 Abell et al. 2007.

8 TNC 2009.

9 Ibid.

10 Ibid.

húmedos y tienden a ser menos estacionales, mientras que los de la vertiente del Pacífico tienden a experimentar temporadas pluviosas y secas bien definidas, con sus correspondientes estiajes y crecidas. En comparación con los ríos de las vecinas América del Norte y del Sur, la angostura del istmo implica que los ríos centroamericanos tienen menor longitud, transportan volúmenes de agua considerablemente menores al drenar cuencas más pequeñas y en general están estrechamente conectados con los ambientes marinos.

Las especies de agua dulce aprovechan la variedad de hábitat disponibles en los ríos centroamericanos. La fauna de agua dulce y semiacuática de la región incluye aves zancudas y ribereñas, mamíferos, reptiles y anfibios, peces e invertebrados, así como una multiplicidad de insectos y crustáceos. Estas especies pueden ser organismos obligatoriamente de agua dulce (por ejemplo, peces) o especialistas de agua dulce o atravesar etapas críticas en su ciclo de vida durante las cuales dependen de hábitat de agua dulce.

La variedad de especies de peces de agua dulce es mucho menor en Centroamérica que en Sudamérica, en parte debido al origen mucho más reciente de la región¹¹. Se conocen aproximadamente 530 especies de peces que habitan la región centroamericana¹². A causa de las rutas de colonización desde América del Norte y del Sur, Centroamérica históricamente se dividió en cuatro provincias ictiológicas distintas: Usumacinta (sur de México hasta el río Coco, frontera Honduras-Nicaragua, vertiente del Caribe), Chiapas-Nicaragüense (del sur de México hasta Costa Rica, a lo largo de la vertiente del Pacífico), San Juan (del río Coco hasta el centro de Panamá, vertiente del Caribe) e Ístmica (del sur de la vertiente del Pacífico de Costa Rica hasta la frontera Panamá-Colombia, ambas vertientes)¹³. Sin embargo, estas divisiones y gran parte de lo que se sabe sobre los peces de agua dulce centroamericanos provienen de estudios llevados a cabo a mediados del siglo pasado¹⁴. Recientemente se ha presentado un incremento notorio en la investigación orientada a cubrir las deficiencias en el conocimiento de las pautas de distribución de los peces de agua dulce y se han propuesto divisiones adicionales de Centroamérica en regiones ictiológicas más pequeñas¹⁵.

Por último, muchas especies centroamericanas de agua dulce, particularmente peces y camarones, son diádromos, lo que significa que exhiben alguna forma de conducta migratoria o

¹¹ Reis et al. 2003.

¹² TNC 2009.

¹³ Bussing 1976.

¹⁴ Miller 1966; Bussing 1976.

¹⁵ Smith y Bermingham 2005; Matamoros et al. 2009; Esselman y Allan 2011; Matamoros et al. 2012.

requieren acceso a aguas saladas en alguna etapa de su ciclo de vida¹⁶. La supervivencia de las especies migratorias depende de que no se obstaculice su movimiento a lo largo de los cauces fluviales entre los hábitat de agua dulce aguas arriba y las zonas costeras.

La información científica, o incluso cuantitativa, sobre la importancia socioeconómica de los ríos centroamericanos es quizá más limitada que los datos ecológicos. Los pueblos de Centroamérica dependen de los ríos para múltiples servicios de los ecosistemas (por ejemplo, suministro de agua, transporte, alimentos, asimilación de desechos). Sin embargo, hasta donde sabemos, no existe un enfoque sistemático para comprender esta dependencia y su valor. De acuerdo con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, los servicios de ecosistemas de agua dulce pueden agruparse en cuatro categorías principales: de provisión, de apoyo, de reglamentación y culturales¹⁷. Algunos ejemplos de servicios de provisión de los ríos centroamericanos incluyen suministro de agua para uso doméstico, industrial y agrícola; pesca; y plantas acuáticas y mantos de sedimentos que suministran materiales de construcción. Los servicios de apoyo y de reglamentación incluyen transporte, control de inundaciones y asimilación de desechos. Los servicios culturales vinculados con los ríos centroamericanos incluyen recreación, identidad cultural y los ríos como puntos de referencia histórica.

Una importante consideración en este sentido es que con los ríos en un estado ecológicamente intacto, muchos de los servicios de los ecosistemas que suministran los ríos centroamericanos se obtienen con costos pecuniarios bajos o nulos para la sociedad. Pero cuando los ríos se degradan o se modifican y se ve comprometida su capacidad para suministrar un servicio de ecosistema, la gente tiene que considerar otras opciones, que con frecuencia implican costos económicos importantes y la necesidad de infraestructura nueva. Un ejemplo de ello sería el suministro del ecosistema de agua para uso doméstico, industrial y agrícola. La calidad del agua de los ríos en un estado casi natural podría implicar una necesidad mínima o nula de tratamiento antes de su consumo; en los ríos que drenan paisajes urbanos o deforestados o que reciben insumos sustanciales de efluentes con fuentes fijas, la calidad del agua puede verse afectada hasta tal punto que se requieran procesos de tratamiento potencialmente costosos antes de poder utilizarse para otras actividades humanas. Recientemente, gran cantidad de investigación y nuevas herramientas se han orientado a adjudicar un valor económico a los servicios de los ecosistemas de agua dulce en América Latina y a evaluar el costo para la

¹⁶ McLarney et al. 2010; Esselman y Allan 2011; Lorion et al. 2011; Nordlie 2012.

¹⁷ Evaluación de los Ecosistemas del Milenio 2005.

sociedad cuando los ríos ya no pueden suministrar estos servicios como resultado de su modificación o degradación¹⁸.

Desde principios de los años ochenta la energía hidroeléctrica se ha convertido en uno de los principales servicios de ecosistemas que suministran los ríos centroamericanos. Los niveles altos de precipitación anual (superiores a 4 metros en algunas zonas), particularmente a lo largo de la vertiente del Caribe de la región, garantizan agua suficiente para generación de electricidad, y los relieves altos aumentan la cantidad de energía que se puede generar con el agua disponible. A nivel regional, la energía hidroeléctrica representa aproximadamente el 50% de la generación neta de electricidad y el 42% del total de capacidad de generación instalada, aunque la importancia relativa de la energía hidroeléctrica varía según el país¹⁹ (véanse los Cuadros 2 y 3). Costa Rica es el líder regional en términos de capacidad de generación instalada y de dependencia con respecto a la energía hidroeléctrica, que representó aproximadamente el 73% de la generación neta de electricidad en ese país y el 62% de la capacidad instalada en 2011²⁰. Una característica distintiva de la energía hidroeléctrica en comparación con otros servicios de los ecosistemas de agua dulce (como los de recreación y culturales) es que el servicio de ecosistema conexo típicamente no se produce ni se usa en el mismo lugar, sino que beneficia a usuarios distantes. Asimismo, puesto que la generación de energía hidroeléctrica da como resultado la alteración de los ríos y de sus regímenes naturales de flujo, la energía hidroeléctrica a menudo compromete la disponibilidad o la calidad de otros servicios de ecosistemas de agua dulce tanto aguas arriba como aguas abajo.

2. Extensión y tendencias en el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Centroamérica

Centroamérica ha experimentado una proliferación de presas de generación hidroeléctrica en años recientes, una tendencia que empezó con la construcción de unas cuantas presas grandes en los años ochenta (como Arenal en Costa Rica, El Cajón en Honduras y Chixoy en Guatemala), se aceleró con la privatización de la generación de electricidad en los noventa y ha continuado en este siglo. El crecimiento poblacional, un incremento en la electrificación rural y el aumento en

¹⁸ Véanse www.naturalcapitalproject.org y sus referencias.

¹⁹ ONU-CEPAL 2012.

²⁰ Ibid.

el consumo de electricidad (que se estimó en 4,2% a nivel regional en 2011)²¹ son importantes propulsores del desarrollo de la energía hidroeléctrica en Centroamérica. La pequeña disponibilidad de fuentes nacionales de hidrocarburos de origen fósil, además de las características naturales del paisaje en Centroamérica, particularmente su topografía y su clima, se prestan para el desarrollo de la energía hidroeléctrica como método preferido de generación de electricidad en razón del costo y la oportunidad de producción nacional de energía.

Gran parte del potencial de producción hidroeléctrica de Centroamérica no se está explotando. En 2011, la capacidad de generación instalada de las presas hidroeléctricas en Centroamérica se estimaba en alrededor de 5.000 megavatios (MW), de los cuales la de Costa Rica representaban aproximadamente 1.644 MW, seguida de cerca por las de Panamá (1.294 MW) y Guatemala (902 MW) y de más lejos por las de Nicaragua (105 MW) y Belice (25 MW) (véase el Cuadro 3). A nivel regional, la capacidad de generación hidroeléctrica instalada casi se duplicó entre 1990 y 2010²² (véase el Cuadro 2). Durante los años noventa, solamente en Costa Rica se construyeron unas 30 centrales hidroeléctricas nuevas, muchas de ellas gracias a la legislación promulgada al inicio de la década, que abrió parcialmente la generación de electricidad al sector privado²³. En 2005, una recopilación de proyectos hidroeléctricos propuestos en Centroamérica, que incluyó proyectos en etapas desde oportunidades de inversión hasta viabilidad, documentó cerca de 400 proyectos de presas potenciales, para un total de 16.165 MW de capacidad de generación instalada²⁴.

Según estadísticas recientes de la CEPAL (2012), en 2011 se añadieron 419 MW netos de capacidad instalada con grandes proyectos hidroeléctricos, entre ellos los de Changuinola y Bajo de Minas en Panamá y la Presa Pirris en Costa Rica. Numerosos proyectos hidroeléctricos pequeños y medianos en Panamá, Guatemala y Nicaragua contribuyeron con alrededor de otros 130 MW de capacidad instalada en 2011. La mayoría de estos proyectos estuvo a cargo de empresas privadas²⁵. Los planes de expansión para el período de 2012 a 2027 prevén muchos proyectos hidroeléctricos nuevos en Centroamérica, tanto grandes presas como proyectos

²¹ Ibid.

²² Ibid.

²³ Anderson et al. 2006b.

²⁴ Burgues Arrea 2005.

²⁵ ONU-CEPAL 2012.

pequeños y medianos. En particular, en los ríos panameños se planea o está en proceso un extenso desarrollo hidroeléctrico para el período de 2012 a 2014²⁶.

Los proyectos hidroeléctricos en Centroamérica exhiben diversos tamaños, tipos y modos de operación. Aunque existen numerosos sistemas de clasificación para las presas con base en estas características²⁷, hay dos tipos más comunes de proyectos hidroeléctricos en la región: embalses de gran capacidad en el cauce, con presas de más de 15 metros de altura, y proyectos más pequeños a filo de agua con presas de derivación de menos de 15 metros de altura y embalses fuera del cauce o sin capacidad de almacenamiento de agua. En algunos casos, la capacidad instalada (en megavatios) de un proyecto hidroeléctrico tiene que ver con el tamaño de la presa, por lo que los proyectos más grandes con capacidad de almacenamiento, que pueden generar más electricidad, también tienen presas más grandes y los proyectos más pequeños, a filo de agua, tienen presas más pequeñas y menor capacidad instalada (<50 MW).

No obstante, puede ser engañoso emplear la capacidad de generación instalada (MW) como indicador del tamaño o tipo de presa. Algunas presas en Centroamérica —por ejemplo, la Presa Chalillo de 7,3 MW en Belice— tienen embalses en el cauce comparativamente grandes en relación con su capacidad de generación instalada; otras —por ejemplo, el complejo hidroeléctrico Toro, de 90 MW, en Costa Rica— operan a través de múltiples presas de derivación, con volúmenes retenidos pequeños en relación con su capacidad de generación instalada. La selección del tamaño, tipo y modo de operación de un proyecto hidroeléctrico depende de muchas variables, como las características naturales del terreno en el sitio de la presa (relieve topográfico, corrientes fluviales, precipitación anual); las consideraciones económicas, las tarifas eléctricas y los fondos disponibles para el proyecto; si la presa y su operación estarán en manos privadas o públicas; y los objetivos de generación de un proyecto en términos, por ejemplo, de capacidad de carga máxima en relación con otros servicios secundarios para los que esté diseñada.

El desarrollo hidroeléctrico se ha concentrado en algunas cuencas o zonas fluviales de Centroamérica, que tienen cantidades desproporcionadas de presas existentes o propuestas en comparación con otras cuencas. Una zona de este tipo en la que se ha concentrado mucho el desarrollo hidroeléctrico es la vertiente del Caribe de Costa Rica y Panamá. Los ríos San Carlos y Sarapiquí, ambos afluentes del río San Juan en Costa Rica, han experimentado un fuerte

²⁶ CEAC 2012.

²⁷ Comisión Mundial de Presas 2000.

incremento en el número de presas en sus cuencas, en las que se han construido aproximadamente 30 centrales hidroeléctricas en los últimos 25 años y otros proyectos están bajo consideración²⁸. Sobre el río Reventazón, que también desemboca en el mar Caribe, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) está construyendo actualmente su cuarta presa, Reventazón (305 MW), en ese sistema (Río Macho, Cachí y Angostura son proyectos actuales); varios proyectos hidroeléctricos privados están también en operación o bajo construcción en la cuenca del Reventazón (La Joya, río Lajas, Tuis, Birris, Torito)²⁹. También se han destinado recientemente al desarrollo hidroeléctrico varias otras cuencas que drenan el sitio de patrimonio de la humanidad La Amistad en Costa Rica y Panamá, entre ellos las cuencas de los ríos Banano, La Estrella, Sixaola y Changuinola en la vertiente del Caribe y las del Térraba, el Chiriquí y el Chiriquí Viejo en la vertiente del Pacífico³⁰.

3. Comprensión de las consecuencias ecológicas y sociales de la modificación de los caudales en Centroamérica

Existe una amplia bibliografía que documenta los efectos de las presas hidroeléctricas en los ecosistemas fluviales y en las poblaciones humanas de sus inmediaciones³¹, con un número cada vez mayor de estudios sobre presas en las regiones tropicales³². De ese material escrito se desprenden unas cuantas tendencias. En primer lugar, los proyectos hidroeléctricos varían en magnitud, extensión y posibilidad de revertir sus efectos ambientales y sociales adversos. Por ejemplo, los diques de retención de gran capacidad a menudo inundan grandes áreas y transforman entornos de agua corriente en sistemas más bien lacustres. Con frecuencia esto exige el reasentamiento de poblaciones humanas, y las poblaciones desplazadas a menudo son pueblos indígenas que habitan zonas inexploradas con las que mantienen sólidas conexiones culturales³³. Los proyectos hidroeléctricos más pequeños a filo de agua pueden dar como resultado caudales considerablemente reducidos a lo largo de varios kilómetros del cauce del río entre el sitio de derivación del agua y la casilla de turbinas. Estas reducciones en los caudales pueden hacer que el río no sea utilizable para transporte o recreación o pueden provocar mermas en las poblaciones de peces o de otras especies acuáticas.

²⁸ Anderson et al. 2006b; Anderson et al. 2008.

²⁹ BID 2012.

³⁰ McLarney et al. 2010.

³¹ Comisión Mundial de Presas 2000; Asociación Internacional de la Energía Hidroeléctrica 2010.

³² Pringle et al. 2000; Anderson et al. 2006a, 2006b.

³³ Finley-Brook y Thomas 2010.

En segundo lugar, durante la construcción, el arranque y la operación a largo plazo de un proyecto hidroeléctrico pueden ocurrir distintos tipos de impactos ambientales y sociales. Un ejemplo sería una presa que inunda una zona arbolada y que requiere reasentamientos humanos durante la fase de construcción, emite altos niveles de metano y anhídrido carbónico por la descomposición de la vegetación acumulada en su embalse durante el arranque, y a largo plazo provoca la pérdida de peces nativos o cambios en la composición del conjunto de especies de peces en favor de especies más adaptadas a ambientes lacustres.

En tercer lugar, la infraestructura conexas, como las carreteras de acceso y las líneas de transmisión, pueden tener otros impactos ambientales y sociales en el sitio de una presa. En paisajes arbolados, estos elementos infraestructurales conexos algunas veces provocan procesos de deforestación o degradación forestal al crear nuevos puntos de acceso.

Por último, muchas facetas del régimen del caudal de un río —magnitud, estacionalidad, duración, frecuencia y tasa de cambios— influyen en la estructura y la función de los ecosistemas de agua dulce y en su capacidad de suministrar servicios de los ecosistemas fundamentales para las poblaciones humanas.

Aunque los desarrollos hidroeléctricos pueden ser de diferentes tipos y magnitudes, prácticamente todos alteran una o más de estas facetas del régimen del caudal de un río. En lugar de enumerar toda la variedad de efectos ecológicos y sociales de las presas, este análisis del desarrollo hidroeléctrico en Centroamérica se centra en la modificación de los caudales y en la existencia de las presas como barreras, que considera ubicadas entre las consecuencias potencialmente negativas más importantes de las presas hidroeléctricas y como características de casi todas las presas.

Los caudales actúan como una variable maestra en los ríos: configuran los hábitat físicos y suministran conectividad, influyen en la composición de las especies que habitan los sistemas fluviales y determinan los historiales de vida de las especies acuáticas³⁴. La variabilidad inherente en el régimen natural del caudal de un río —flujos básicos, flujos bajos, flujos en pulsos, flujos altos, flujos de desbordamiento, cuándo ocurren y cuánto tiempo duran— guarda una gran importancia ecológica. Por ejemplo, los flujos básicos o bajos suministran estabilidad al hábitat durante períodos prolongados; puede ser durante estos mismos períodos cuando ocurre la reproducción de los peces y cuando se requiere un hábitat estable en las zonas de cría. Los flujos

³⁴ Poff et al. 1997.

en pulsos o los flujos altos arrastran sedimentos de los espacios intersticiales y crean o mantienen hábitat para especies fluviales, como los macroinvertebrados. Los flujos de desbordamiento forman cauces y pueden actuar como una especie de reinicio que erradica especies exóticas o conecta los caudales fluviales con zonas de llanuras inundables. Asimismo, los cambios en el caudal pueden servir como indicadores para que las especies migratorias se trasladen aguas arriba o aguas abajo para el desove o para alimentarse³⁵. Los influjos de agua dulce y los sedimentos, materiales nutrientes y materia orgánica que transportan son críticos para los ecosistemas costeros y marítimos, en particular en paisajes como los de Centroamérica, donde los ríos son cortos y existen fuertes vínculos entre los sistemas de agua dulce y los costeros.

Las modificaciones a los caudales fluviales y las pérdidas de conectividad fluvial que ocurren como resultado del desarrollo hidroeléctrico (u otros factores) perturban los vínculos entre los caudales y la ecología, con consecuencias negativas para los ecosistemas de agua dulce. En investigaciones recientes en Centroamérica se han encontrado pruebas de estas consecuencias, particularmente en lo relativo a la persistencia de las especies de agua dulce. Varios estudios de peces a lo largo de un tramo de río desaguado de cuatro kilómetros aguas abajo de una pequeña central hidroeléctrica a filo de agua en Costa Rica sugirieron que las alteraciones del caudal favorecían a los estrategias de historial de vida oportunista (por ejemplo, *Poecilia*, *Rhamdia*, *Astyanax*) por sobre los estrategias de historial de vida periódica y equilibrada (por ejemplo, *Agonostomus*, *Archocentrus*, *Astatheros*, *Theraps*), es decir que favorecían la persistencia de especies de peces más tolerantes a variedades más amplias de condiciones ambientales por sobre las especies más delicadas³⁶. Utilizando estudios de ríos embalsados en Puerto Rico como indicadores, los intentos por predecir las consecuencias de la alteración de los caudales y la existencia de las presas como barreras han señalado que las presas propuestas para la región de La Amistad compartida por Costa Rica y Panamá darán como resultado la desaparición casi total de peces migratorios (por ejemplo, *Anguilla*, *Agonostomus*, *Joturus*, *Awaous*, *Sicydium*, *Gobiomorus*) y camarones migratorios (por ejemplo, *Macrobrachium*, *Atya*, *Micratya*, *Potimirim*) aguas arriba de las presas³⁷. Las mediciones de peces en los afluentes del lago Arenal y aguas arriba de las presas en los ríos Reventazón y Puerto Viejo en Costa Rica

³⁵ Ibid.

³⁶ Anderson et al. 2006a.

³⁷ McLarney et al. 2010.

sugieren que los mugiliformes diádromos de agua dulce, *Agonostomus monticola* y *Joturus pichardi*, podrían haber desaparecido tras la construcción de la presa³⁸.

Las modificaciones de los caudales también tienen potencialmente una amplia variedad de consecuencias para las poblaciones humanas. Gran parte de las investigaciones de las ciencias sociales sobre las presas tropicales en todo el mundo se han enfocado en los problemas asociados con el reasentamiento (particularmente de pueblos indígenas), el aumento en la incidencia de enfermedades tras la construcción de presas o la resistencia de las comunidades a los proyectos de embalse³⁹. Las modificaciones de los caudales también comprometen la disponibilidad y calidad de los servicios de los ecosistemas de agua dulce. En el contexto de Centroamérica, todas las categorías de servicios de los ecosistemas de agua dulce —provisión, apoyo, reglamentación y cultural— se han invocado en relación con el desarrollo hidroeléctrico.

En lo que respecta a los servicios de provisión, las aguas superficiales en Centroamérica —y principalmente los ríos y arroyos— son la fuente primaria de agua para las actividades humanas. Las modificaciones a los caudales aguas abajo de las presas, en especial en el caso de proyectos de retención de gran capacidad, pueden afectar la calidad del agua y provocar que el agua de los ríos no sea utilizable para el quehacer humano. La producción pesquera de agua dulce es un importante servicio de provisión que prestan muchos ríos tropicales y que a menudo garantiza una fuente de proteínas y de ingresos para las poblaciones rurales o los pueblos indígenas en las zonas de tierras bajas. Al afectar la persistencia de las especies de peces de agua dulce —con frecuencia los preferidos para la pesca— las presas y las consiguientes modificaciones de los caudales reducen el acceso a los recursos pesqueros⁴⁰.

En lo que respecta a los servicios de apoyo y reglamentación, múltiples estudios han documentado la importancia de los ríos centroamericanos de tierras bajas como rutas primarias de comunicación y transporte para las poblaciones humanas, como los pueblos tawaka y miskito que habitan en la cuenca baja del río Patuca en Honduras⁴¹. Otros ríos que drenan las tierras bajas caribeñas también han servido históricamente como vías primarias; un ejemplo es el sistema fluvial San Juan-Sarapiquí en Costa Rica, que hasta mediados de los años sesenta servía como principal ruta de acceso entre el Caribe y el valle central de Costa Rica⁴². Más

³⁸ Anderson et al. 2006b; McLarney et al. 2010; Lorion et al. 2011.

³⁹ McCully 1996; Bonta 2004; Finley-Brook y Thomas 2010; Naiman y Dudgeon 2011.

⁴⁰ Hoeninghaus et al. 2009.

⁴¹ Esselman y Opperman 2010.

⁴² Butterfield et al. 1994.

recientemente, los ríos de las vertientes altas de Centroamérica se han empleado para la práctica deportiva de descenso de rápidos. En Costa Rica, donde el ecoturismo es una de las fuentes de ingresos económicos más grandes del país, aproximadamente 10% de los visitantes señalan que han participado en esta actividad⁴³. Las modificaciones de los caudales, particularmente su reducción, pueden comprometer la navegación de los ríos aguas abajo de las presas y por consiguiente menoscabar las posibilidades de las personas de usar los ríos como rutas primarias de transporte o como fuentes de ingresos por ecoturismo⁴⁴.

En cuanto a los servicios culturales, los ríos en toda Centroamérica suministran vínculos profundos con la identidad de los pueblos locales e importantes centros de recreación, particularmente en las zonas rurales. Los domingos y días festivos, las personas frecuentan las riberas y los remansos en pozas profundas, y hay muchos restaurantes en zonas con vistas a los ríos. Los caudales aguas abajo de las presas hidroeléctricas pueden ser un tanto impredecibles: aumentan en respuesta a los períodos más altos de generación y no a los de precipitación alta, por lo que el uso de los ríos para fines recreativos a menudo se ve comprometido por razones de seguridad. Por ejemplo, a lo largo del río Puerto Viejo en la vertiente del Caribe de Costa Rica hay letreros en los pueblos ribereños aguas abajo de una pequeña central hidroeléctrica que advierten sobre la posibilidad de crecidas rápidas del caudal y exhortan a las personas a no nadar en el río ni detenerse en las riberas (observación del autor). Asimismo, algunos grandes proyectos manejados por el ICE en Costa Rica publican anuncios en los diarios cuando se están limpiando los sedimentos de los embalses para advertir a las poblaciones vecinas sobre cambios repentinos en los caudales (M. Rojas, comunicación personal).

4. Consideración de la energía hidroeléctrica en Centroamérica en el contexto del cambio climático

El cambio climático está alterando el discurso sobre los costos, beneficios y repercusiones ecológicas y sociales de los proyectos hidroeléctricos en múltiples formas. A nivel mundial, varios modelos y estudios científicos han proyectado cambios importantes en la esorrentía en muchas de las cuencas fluviales del mundo como consecuencia del aumento de las temperaturas y de las modificaciones en las pautas históricas de precipitación, en especial las reducciones en

⁴³ Fletcher 2010.

⁴⁴ Esselman y Opperman 2010.

los niveles anuales totales de precipitación pluvial⁴⁵. Los efectos acumulativos que el aumento de temperatura y los cambios en las pautas de precipitación tienen en el paisaje se integran en función de las cuencas fluviales y pueden conducir a cambios en la intensidad, duración y frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones. Los cambios relacionados con el clima tienen la posibilidad de afectar la disponibilidad de agua para generación hidroeléctrica, en especial en cuencas en que se proyectan reducciones en los niveles de precipitación, y podrían afectar incluso la seguridad de los proyectos hidroeléctricos, particularmente en cuencas en que se prevén cambios en los regímenes de inundaciones en el futuro⁴⁶.

Centroamérica se considera una de las regiones más vulnerables al cambio climático y se ha reconocido como una potencial “región clave de cambio climático” con base en la magnitud de los cambios previstos de temperatura y precipitación en comparación con otras zonas⁴⁷. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, es probable que para 2100 Centroamérica experimente aumentos de temperatura (de entre 1,8° y 5,0° C de aumento anual promedio, con una mediana de 3,2° C), un número mayor de días secos y una mayor frecuencia de precipitaciones más intensas y eventos extremos. Todavía hay algo de incertidumbre sobre lo que ocurrirá en cuanto a la precipitación anual total, pero los modelos generales de circulación sugieren una reducción, especialmente a lo largo de la vertiente centroamericana del Pacífico⁴⁸. Los modelos cuya escala se ha reducido a la región centroamericana también indican que ocurrirán disminuciones sustanciales en los niveles de precipitación en la vertiente del Pacífico, así como en las regiones caribeñas de Costa Rica y Panamá. Estos modelos de menor escala predicen que la magnitud del aumento de temperatura durante la época de lluvia será superior a 4° C y en la época de secas, de entre 3° y 4° C en la mayor parte de Centroamérica⁴⁹.

Los cambios en la disponibilidad de agua, particularmente la escasez derivada de las reducciones en los niveles de precipitación y por ende de los caudales fluviales, podrían afectar la generación hidroeléctrica en el futuro. Los caudales actuales y futuros modelados utilizando el modelo de cambio climático HadCM3 y el escenario A2 predicen que varios ríos centroamericanos sufrirán grandes reducciones en sus caudales anuales para la década de 2050

⁴⁵ Palmer et al. 2008; Vorosmarty et al. 2010.

⁴⁶ Maurer et al. 2009.

⁴⁷ Giorgi 2006; Maurer et al. 2009.

⁴⁸ Cifuentes 2010; Karmalkar et al. 2011.

⁴⁹ Karmalkar et al. 2011.

en comparación con los registros hidrológicos históricos del período 1960-1990; entre estos ríos se cuentan el Coco (cambio previsto de -69,8% en su caudal anual), el Patuca (cambio de -72,0%) y el San Juan (-72,6%)⁵⁰.

Un análisis reciente de la cuenca trinacional del río Lempa (Honduras, Guatemala y El Salvador) —sitio de dos centrales hidroeléctricas que abastecen de energía a El Salvador (Cerrón Grande y 15 de Septiembre)— ilustra en forma cuantitativa la influencia potencial del cambio climático en las escorrentías y por consiguiente en el influjo fluvial a las presas⁵¹. Los modelos a escala relativos a la cuenca del río Lempa proyectan para la misma un futuro más cálido (entre 1,9° y 3,4° centígrados en promedio, en los escenarios A2 y B1, respectivamente) y más seco (entre 10,4% y 5,0%, en los escenarios A2 y B1, respectivamente). Al traducir estas proyecciones a frecuencias de caudales bajos —un factor que determina la disponibilidad confiable de energía o la electricidad que podrá suministrar una central hidroeléctrica en años de secas— se concluye que los proyectos hidroeléctricos en la cuenca del río Lempa podrían experimentar una reducción en su capacidad de generación del orden de entre el 33% y el 53% al acercarse el fin de este siglo. A un plazo más corto, estos análisis indican que los gestores del agua deben prepararse para una reducción en los influjos a los embalses de por lo menos 13% en los próximos decenios⁵². Se han publicado pocos análisis sobre las cuencas fluviales en Centroamérica como el que se llevó a cabo para la cuenca del río Lempa. No obstante, estos tipos de estudios son cruciales para comprender la viabilidad de los proyectos hidroeléctricos actuales y futuros bajo distintas hipótesis de cambio climático.

Cabe mencionar otra intersección interesante entre el cambio climático y el desarrollo hidroeléctrico. El cambio climático y sus repercusiones en los caudales fluviales probablemente afectarán a las presas en el futuro, como lo ilustra el caso del río Lempa. Por otro lado, las políticas que abordan el cambio climático a través de la reducción en el uso de combustibles de origen fósil podrían poner mayor énfasis en las presas hidroeléctricas como un componente de las estrategias energéticas futuras, pues la energía hidroeléctrica a menudo se considera como una fuente limpia de electricidad. El Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto en particular ha sido un incentivo para la explotación de la energía hidroeléctrica en los países en

⁵⁰ Palmer et al. 2008.

⁵¹ Maurer et al. 2009.

⁵² Ibid.

desarrollo tropicales, en una época marcada por una creciente preocupación sobre el cambio climático⁵³.

5. La búsqueda de equilibrio

Están surgiendo varios buenos ejemplos de prácticas óptimas provenientes de Centroamérica en respuesta al desafío de equilibrar el desarrollo hidroeléctrico con la protección de otros servicios de los ecosistemas de agua dulce. En esta última sección se tratan estos ejemplos dentro del marco de cinco recomendaciones para avanzar hacia una energía hidroeléctrica más sostenible en la región.

6. Consideración y aplicación de criterios formulados a nivel internacional para seleccionar la ubicación y para la operación de proyectos hidroeléctricos

Las más de 48.000 presas grandes y las más de 800.000 presas más pequeñas que se estima existen en el mundo ofrecen una oportunidad para mejorar nuestro conocimiento de los factores que pueden agravar o mitigar las consecuencias ambientales y sociales negativas de las presas hidroeléctricas⁵⁴. La Comisión Mundial de Presas representó un esfuerzo global para intentar obtener lecciones de más de un siglo de construcción de presas, proceso que culminó con la publicación de una serie de recomendaciones para una explotación más sostenible de la energía hidroeléctrica⁵⁵. La Asociación Internacional de la Energía Hidroeléctrica produjo recientemente un Protocolo de Evaluación de la Sostenibilidad Hidroeléctrica, un marco diseñado para orientar la incorporación del tema de la sostenibilidad en los aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos de las presas y la integración de estos cuatro aspectos en el ciclo de vida de los proyectos de construcción de presas, desde su desarrollo hasta su operación⁵⁶.

Asimismo, las síntesis de información sobre los impactos de las presas en las regiones tropicales, incluida América Latina, han conducido a la formulación de criterios en cuanto a presas buenas y malas⁵⁷ o a lineamientos específicos de prácticas óptimas para proyectos hidroeléctricos (un ejemplo de ello es la Guía de Buenas Prácticas Ambientales para Pequeños Proyectos Hidroeléctricos para Honduras, producida recientemente por un consorcio de

⁵³ McCully 1996; Fletcher 2010.

⁵⁴ McCully 1996; Comisión Mundial de Presas 2000.

⁵⁵ Comisión Mundial de Presas 2000.

⁵⁶ Asociación Internacional de la Energía Hidroeléctrica 2010.

⁵⁷ Goodland et al. 1993; Ledec y Quintero 2003.

instituciones). Estos criterios están diseñados para identificar en qué aspectos el potencial de impactos ambientales y sociales podría ser tan desfavorable como para socavar los beneficios de electricidad de un proyecto hidroeléctrico o podría ser extremadamente difícil o imposible mitigarlos. Adicionalmente, las experiencias con proyectos hidroeléctricos, principalmente en la zona templada, han demostrado cómo pueden hacerse ajustes estructurales en las presas o incorporarse en su diseño para liberar flujos de compensación aguas abajo o mantener cierto grado de conectividad fluvial longitudinal.

Una sugerencia obvia para aumentar la sostenibilidad de nuevos desarrollos hidroeléctricos en Centroamérica es considerar y aplicar estos criterios internacionalmente reconocidos (cuadro 4). Por ejemplo, para muchos proyectos, la medida más importante en cuanto a energía hidroeléctrica ambiental y socialmente sostenible es una buena selección del sitio. Para presas grandes, los proyectos hidroeléctricos “buenos” podrían incluir, entre otras, las siguientes características: una superficie de embalse pequeña y un nivel bajo de desbordamiento hacia bosques tropicales, pérdida limitada de hábitat naturales, ubicación en un río en que no se identifique una gran variedad de especies de agua dulce o endemismo en riesgo, muchos afluentes aguas abajo que ayuden a restablecer los caudales, que no se requieran reasentamientos de poblaciones humanas, y una baja incidencia de enfermedades tropicales⁵⁸. Para el caso de presas más pequeñas y a filo de agua, los proyectos hidroeléctricos “buenos” podrían tener una presa con aliviadero bajo en el sitio de derivación del agua que dejara parcialmente desbloqueado el cauce del río, con una extensión pequeña o inexistente de río desaguado entre la presa y la casilla de turbinas y un programa de generación de electricidad más bien constante (que no libere picos anormales de flujo)⁵⁹.

Se insta tener cierta precaución al aplicar lecciones o enfoques producidos fuera de Centroamérica o de regiones tropicales. En este sentido, el concepto de los escalones para peces es un buen ejemplo. Los escalones para peces que se han diseñado para especies de zonas templadas (por ejemplo, el salmón) a menudo simplemente se han exportado a las presas tropicales como estrategia de gestión sin considerar debidamente si en realidad facilitarían el paso de las especies tropicales o si serían ecológicamente eficaces. Estudios recientes indican que muchas estructuras para el paso de peces en las presas de Brasil son ineficaces o,

⁵⁸ Ledec y Quintero 2003.

⁵⁹ Anderson et al. 2006a.

irónicamente, están contribuyendo al colapso de la industria pesquera regional⁶⁰. Para remediar esta situación en Brasil y evitar que ocurra en otros sitios, se ha recomendado que las estructuras para el paso de peces consideren la ubicación de los hábitat clave y faciliten el movimiento tanto en dirección aguas arriba como aguas abajo. Además, se debe evaluar su eficacia en el sentido de que mantengan poblaciones viables de peces para sustituir la cantidad típica de ascenso con éxito de peces aguas arriba⁶¹.

7. Creación de conjuntos de datos y marcos sobre Centroamérica para la evaluación del caudal ecológico y la aplicación de los caudales recomendados

Idealmente, un proyecto hidroeléctrico sostenible debería proteger los aspectos del régimen de caudales que revisten más importancia para los ecosistemas y para la sociedad. El término caudal ecológico se refiere a la cantidad, la calidad y el régimen de flujo de agua dulce que se requieren para preservar los ecosistemas acuáticos y terrestres y los servicios ecosistémicos conexos de los que dependen las personas⁶². La evaluación del caudal ecológico —un proceso mediante el cual se estiman las necesidades de flujo de los ecosistemas y se formulan las recomendaciones correspondientes para la asignación de agua a los ecosistemas— se está volviendo rápidamente una práctica normal de la gestión de los recursos hídricos en todo el mundo⁶³. Esta tendencia se ha extendido a los países neotropicales sobre todo en el último decenio, y muchos de ellos están revisando su legislación relacionada con los recursos hídricos para incluir lineamientos relativos a los caudales ecológicos o emprendiendo evaluaciones de los caudales ecológicos de ríos individuales⁶⁴.

En general, los enfoques hacia la evaluación de los caudales ecológicos se clasifican en cuatro categorías principales: (i) enfoques hidrológicos (como el método de Tennant), que expresan generalmente los caudales recomendados como porción de la descarga anual o mensual; (ii) enfoques de valoración hidráulica, que vinculan los caudales con las condiciones hidráulicas, como profundidad, velocidad o perímetro mojado; (iii) enfoques de simulación de hábitat (por ejemplo, IFIM/PHABSIM), que identifican la cantidad de hábitat adecuado o ideal

⁶⁰ Pompeu et al. 2012.

⁶¹ Ibid.

⁶² Dyson et al. 2003; Poff et al. 2010.

⁶³ Naiman et al. 2002; Tharme 2003.

⁶⁴ Scatena 2004; Diez y Burbano 2006; Diez y Ruiz 2007; Yerson et al. 2011.

disponible durante los distintos flujos, generalmente para una especie concreta de peces, y formulan recomendaciones sobre caudales con base en las necesidades de hábitat de esa especie; y (iv) enfoques holísticos (por ejemplo, BBM, DRIFT), cuyo objetivo es considerar los múltiples usos de los ríos y su importancia ecológica y social y formular recomendaciones sobre caudales dentro de un contexto más integrado⁶⁵.

En Centroamérica, ejemplos de Honduras y Costa Rica ilustran los desafíos y las oportunidades que se presentan a la hora de determinar y poner en práctica las recomendaciones sobre caudales ecológicos. Durante 2006-2008, un proyecto en colaboración entre la Empresa Nacional de Energía Eléctrica de Honduras, The Nature Conservancy, agentes locales y expertos científicos se propuso elaborar recomendaciones de caudales ecológicos para incorporarlos en el diseño y la operación del proyecto hidroeléctrico Patuca 3 —en ese entonces en etapa de planificación— en el río Patuca, sobre el cual no había reglamentación⁶⁶. El Patuca, el tercer río en longitud de Centroamérica, con 465 km, alberga diversas combinaciones de especies acuáticas y serpentea a través de tres áreas protegidas nacionales en las que habitan grupos indígenas miskito y tawaka, con poblaciones de aproximadamente 6.400 y 1.100 habitantes, respectivamente, en la cuenca baja de dicho río⁶⁷. Ambos grupos dependen del río Patuca como fuente de alimentos, agricultura, materiales de construcción y agua potable. Sin embargo, uno de los servicios de los ecosistemas de agua dulce con mayor riesgo de verse comprometido con la construcción de Patuca 3 era el uso del río por las comunidades como ruta de transporte para el comercio de cereales, ganado y productos forestales, así como para comunicación entre aldeas⁶⁸.

La gran escasez de datos científicos sobre la hidrología y la ecología del río Patuca planteaban un desafío para la evaluación del caudal ecológico. No obstante, el equipo del proyecto aprovechó enormemente los conocimientos ecológicos tradicionales que tenían del río los pueblos indígenas. En combinación con análisis hidrológicos y aportes de expertos científicos, estos conocimientos ecológicos tradicionales se emplearon para establecer relaciones entre el régimen del caudal del río y los peces y otros organismos acuáticos; entre los caudales y los recursos terrestres, las comunidades humanas y los bosques ribereños; y entre los caudales y la morfología de los cauces. Estas relaciones generadas, sumadas a una consideración independiente sobre los puntos clave para la navegación fluvial, suministraron la base para las

⁶⁵ Tharme 2003.

⁶⁶ Esselman y Opperman 2010.

⁶⁷ McSweeney 2002.

⁶⁸ McSweeney 2002, 2004.

recomendaciones del caudal ecológico para el río Patuca en el tramo aguas debajo de la central Patuca 3⁶⁹.

Aunque el estudio del Patuca ejemplifica algunas de las oportunidades y de las fuentes no tradicionales de datos que pueden usarse para las evaluaciones del caudal ecológico, también ilustra la necesidad de considerar las presas y las evaluaciones del caudal ecológico dentro del contexto de las cuencas. Otras presas planeadas para sitios aguas abajo de la ubicación de Patuca 3 podrían formular recomendaciones sobre caudales ecológicos difíciles de instituir, a menos que en dichas recomendaciones también se contemplan estos proyectos futuros. Además, simplemente llevar a cabo una evaluación del caudal ecológico no necesariamente significa que se deba avanzar en un proyecto de presa; las preocupaciones ecológicas y sociales a nivel de una cuenca podrían no mitigarse suficientemente mediante la aplicación de un régimen de caudal ecológico, como posiblemente sea el caso de la cuenca del río Patuca⁷⁰.

En Costa Rica, desde principios de los años 2000, varios grupos distintos han estado trabajando para formular recomendaciones de caudales ecológicos para múltiples ríos. Uno de los primeros intentos para establecer un caudal ecológico aguas abajo de una presa provino de una central hidroeléctrica privada en el río Puerto Viejo, en la vertiente del Caribe del país, donde se incorporó un “caudal de compensación” de 5% a 10% del caudal promedio anual en el diseño de la presa, que opera como planta hidroeléctrica de derivación de agua y presa a filo de agua. Los estudios ecológicos que se efectuaron en el sitio de la presa y dentro de un tramo desaguado de aproximadamente 4 km entre la presa y la casilla de turbinas sugirieron que la cantidad y el régimen de flujo del caudal de compensación podrían preservar un subconjunto de especies de peces —principalmente las de reproducción oportunista o las generalistas en la ocupación del hábitat—, pero que probablemente no serían suficientes para las especies de peces con requisitos reproductivos más complejos (por ejemplo, el cuidado de la progenie de los cíclidos) o para las especies migratorias⁷¹.

Estudios similares sobre el río Tempisque de Costa Rica identificaron dos especies indicadoras, un cíclido (*Parachromis dovii*) y un cocodrilo (*Crocodylus acutus*), que durante parte de su ciclo de vida dependen críticamente de los caudales fluviales⁷². Se sabe que el *P. dovii* desova en cuevas o troncos en pozos profundos dentro del cauce fluvial; el tamaño de este

⁶⁹ Esselman y Opperman 2010.

⁷⁰ Ibid.

⁷¹ Anderson et al. 2006a.

⁷² Jimenez et al. 2005.

pez requiere profundidades mínimas de aproximadamente 1 metro para su desove. Asimismo, los cocodrilos en el Tempisque dependen de bancos de arena, vegetación acuática y profundidades mínimas de alrededor de 1,1 metro para su reproducción. Utilizando modelos hidráulicos, estas profundidades pueden vincularse con los cauces fluviales correspondientes y emplearse para recomendar la cantidad de agua que se necesita en un río durante los períodos de reproducción de estas dos especies⁷³.

A nivel nacional, el Instituto Costarricense de Electricidad, responsable de gran parte del desarrollo hidroeléctrico del país, recientemente elaboró un criterio híbrido para estimar los caudales ecológicos aguas abajo de las presas, con base en estudios de casos y recopilación de datos in situ sobre el río Savegre en la vertiente del Pacífico y el río Reventazón en la vertiente del Caribe. La metodología, conocida como RANA-ICE, y el programa informático conexo, combinan análisis hidrológicos con juicios profesionales de expertos, modelos de respuestas biológicas, necesidades socioeconómicas de agua e identificación de casos hipotéticos en un intento por integrar las ciencias naturales y sociales para determinar los caudales fluviales mínimos⁷⁴.

Estos casos de Honduras y Costa Rica son solo algunos de los intentos y de los métodos que se usan en la región para evaluar e implementar caudales ecológicos para tramos de río aguas abajo de las presas. En vista de la extensión del desarrollo hidroeléctrico en toda Centroamérica, es necesario tanto compartir lecciones y datos de estos estudios individuales como producir marcos para la evaluación y aplicación de caudales ecológicos y dentro de un contexto centroamericano⁷⁵. Por ejemplo, la escasez de datos plantea un desafío para muchos ríos centroamericanos. El caso del río Patuca en Honduras muestra el valor de los conocimientos ecológicos tradicionales y el uso de juicios profesionales de expertos cuando no existe información ecológica e hidrológica amplia para formular recomendaciones sobre el caudal ecológico⁷⁶. El ejemplo del Patuca también ilustra cómo los servicios ecosistémicos clave, en este caso los ríos como rutas de transporte, pueden tomarse en cuenta en los planes de gestión de caudales aguas abajo de las presas.

En Costa Rica, muchas iniciativas de caudales ecológicos han incluido la investigación de las relaciones entre los caudales y la ecología de la biota de agua dulce y han considerado

⁷³ Ibid.

⁷⁴ Chaves et al. s.f.

⁷⁵ Scatena 2004.

⁷⁶ Esselman y Opperman 2010.

géneros que están distribuidos en muchos ríos centroamericanos (por ejemplo, *Parachromis*, *Crocodylus*, *Agonostomus*). Las conclusiones de estos estudios podrían ayudar como base informativa para la formulación de recomendaciones sobre caudales ecológicos o sobre estrategias para la gestión de ríos en otras zonas de la región, o ayudar a identificar especies que puedan usarse como indicadores de modificaciones del caudal en los ríos centroamericanos.

Por último, todos estos casos destacan la necesidad de adoptar un enfoque holístico para la formulación de recomendaciones sobre caudales ecológicos. Idealmente, las presas deberían operar de tal forma que de alguna manera se imite la variabilidad natural de un río, y la variedad de servicios de los ecosistemas de agua dulce que suministran los ríos se ha de considerar explícitamente en los planes de gestión de caudales. Las tendencias futuras en la formulación de recomendaciones sobre caudales ecológicos en Centroamérica y otras regiones también deberían tomar en consideración las proyecciones sobre cambio climático, pues la modificación de los regímenes de precipitación pluvial en los distintos escenarios climáticos futuros podría reducir la cantidad de agua disponible para generación hidroeléctrica y para los ecosistemas.

8. Planificación a escala del paisaje fluvial y redes regionales de comunicación

Las consecuencias ambientales y sociales de la mayoría de los proyectos hidroeléctricos en Centroamérica se evalúan individualmente, y los estudios de impacto a menudo se centran mayormente en la escala local. Sin embargo, ante la concentración de múltiples presas en una sola cuenca (como los casos de San Carlos y Sarapiquí, en Costa Rica) o dentro de ecorregiones o provincias ictiológicas clave, es necesario comprender tanto los efectos de los proyectos hidroeléctricos individuales a nivel de cuenca o de región como los efectos acumulativos de la construcción y operación de múltiples presas. Este tipo de razonamiento es necesario para proteger ámbitos ecológicamente delicados o representativos, así como poblaciones o procesos ecológicos importantes, todos los cuales pueden relacionarse con servicios de los ecosistemas de agua dulce.

Centroamérica tiene un historial de colaboración regional en actividades de conservación. El Corredor Biológico Mesoamericano destaca como ejemplo importante, pero como muchas de las iniciativas de conservación de la región, se ha concentrado en gran medida en los ecosistemas terrestres. Aunque siguen siendo raras las iniciativas de conservación regionales orientadas a los

ecosistemas de agua dulce, están surgiendo algunos ejemplos prometedores. En Costa Rica se emprendió un análisis de brechas para la conservación de la biodiversidad de agua dulce entre 2006 y 2007 con miras a identificar metas de conservación⁷⁷. En lo que respecta a los ríos, el análisis identificó 64 tipos distintos de sistemas fluviales dentro de Costa Rica, pero también observó que solamente 47 de ellos estaban presentes en las áreas protegidas existentes y que, de estos, solo 23 estaban alcanzando en realidad las metas de conservación establecidas para los entornos de agua dulce. Además, de las 18 especies de peces que se conocen como endémicas de Costa Rica, se determinó que solo en 13 casos 10% o más de su zona de distribución estaba cubierto por una área protegida. Además de estos resultados cuantitativos, el análisis indicó también que la protección de zonas terrestres en las cuencas fluviales no necesariamente preserva los ecosistemas de agua dulce ni garantiza la supervivencia de las especies de agua dulce⁷⁸. La conservación de los ecosistemas de agua dulce depende más bien del mantenimiento de la conectividad hidrológica a escala del paisaje y de la protección en los planos longitudinal (aguas arriba-aguas abajo), lateral (río-llanura inundable), vertical (aguas superficiales-subterráneas) y temporal a lo largo de los cuales se desplazan el agua, los organismos y las materias⁷⁹.

En el noreste de Centroamérica hay estudios sobre la distribución de los peces de agua dulce que se están incorporando en las recomendaciones para el diseño de redes de reservas para los ecosistemas de agua dulce⁸⁰. En lugar de emplear los conceptos tradicionales de las áreas terrestres protegidas, el método que se aplica identifica tres unidades de gestión que mejor se relacionan con la complejidad del agua dulce: el área focal de agua dulce, o la ubicación específica de una característica del agua dulce que requiere protección; la zona de gestión crítica, que complementa las áreas focales de agua dulce y ayuda a mantener su funcionalidad; y la zona de gestión de la cuenca de captación de agua, que considera la totalidad de la cuenca circundante de un área focal de agua dulce o la zona de gestión crítica y donde deben aplicarse principios de gestión integrada de los recursos⁸¹. Para definir estas unidades para peces de agua dulce se pueden usar fuentes de datos disponibles comúnmente (por ejemplo, FishBase, registros de museos, la Global Biodiversity Information Facility), modelos de distribución de especies y programas informáticos para planificación de la conservación. Para las cuencas que drenan

⁷⁷ Paaby 2008.

⁷⁸ Ibid.

⁷⁹ Ward 1989; Pringle 2001.

⁸⁰ Esselman y Allan 2011.

⁸¹ Abell et al. 2007; Esselman y Allan 2011.

Belice, este enfoque ha ayudado a identificar la ubicación de las prioridades de conservación de agua dulce, cuáles se sobreponen actualmente con áreas protegidas existentes y dónde existen deficiencias críticas en la protección de peces de agua dulce⁸².

¿Cómo pueden aplicarse las lecciones aprendidas de estas iniciativas al desarrollo hidroeléctrico a escala regional? En primer lugar, estas iniciativas pueden ayudar a identificar cuencas enteras —o, a otra escala, segmentos de ríos— que deben conservarse en razón de su importancia ecológica o social y su actual estado intacto (véanse también las recomendaciones que siguen). En segundo lugar, el Protocolo de Tegucigalpa, el Sistema de la Integración Centroamericana y el desarrollo de una red eléctrica regional ofrecen ejemplos de formas en que los países centroamericanos han avanzado recientemente hacia una colaboración regional en relación con la generación hidroeléctrica. Aunque se concentran principalmente en la integración económica y de las redes eléctricas, ello podría presentar una oportunidad para la promoción regional de prácticas más ecológica y socialmente sostenibles y también para la protección de la biodiversidad de agua dulce y los servicios ecosistémicos⁸³. De hecho, un nuevo programa de investigación y asesoría encabezado por el Instituto Worldwatch se propone apoyar un proceso para mejorar la sostenibilidad social, ambiental y económica de los sistemas de energía a escala regional. Entre otras actividades, este programa establecerá una red para conectar a expertos y otras partes interesadas en toda la región para que participen en una serie de talleres regionales en los que se presenten prácticas óptimas y se intercambien experiencias relacionadas con la energía renovable en Centroamérica⁸⁴. El desafío será enlazar estas redes con la comunidad de profesionales que trabajan para una mejor comprensión y protección científica de los ecosistemas de agua dulce en Centroamérica e incorporar sus conclusiones y enfoques en los debates relacionados con la energía.

9. Exploración de los vínculos entre la energía hidroeléctrica y otras iniciativas de conservación en Centroamérica

Más allá del desarrollo hidroeléctrico, la región centroamericana está experimentando actualmente transformaciones en su paisaje relacionadas con cambios en el uso de la tierra, crecimiento poblacional y cambio climático. Existe un fuerte interés por la conservación de los

⁸² Esselman y Allan 2011.

⁸³ Instituto Worldwatch 2012.

⁸⁴ Ibid.

sistemas naturales e intactos y podría haber oportunidades para que el desarrollo hidroeléctrico actúe como catalizador o como apoyo para estas actividades de conservación.

Las presas hidroeléctricas se benefician del mantenimiento de otros servicios ecosistémicos (como, por ejemplo, reducción de la erosión del suelo y de la sedimentación, agua en cantidad suficiente) relacionados con los bosques intactos, particularmente en las zonas aguas arriba de las presas. Las actividades de cartografía de zonas en las que la generación hidroeléctrica pueda aprovechar estos servicios de los ecosistemas aguas arriba en Costa Rica y Nicaragua indican que estas zonas a menudo se superponen con áreas ya establecidas como prioritarias para conservación forestal. Estas actividades también identificaron una cuenca en cada país como la de mayor prioridad tanto para conservación como para restauración forestal, como, por ejemplo, en Costa Rica la cuenca del río Reventazón y en Nicaragua la del río Matagalpa⁸⁵. Costa Rica es reconocida por su Programa de Pago por Servicios Ambientales (PPSA), que es una piedra angular de las estrategias de conservación forestal del país. Lo que no están tan difundido, empero, es el importante papel que desempeñan las centrales hidroeléctricas en dicho programa. Por parte del sector privado, las centrales hidroeléctricas privadas son las contribuyentes más importantes del PPSA; a 2009 representaban 41% de todo el financiamiento de usuarios de recursos provenientes de dicho sector, o \$919.000⁸⁶. De hecho, desde la aprobación en 2005 del nuevo “canon” sobre el uso del agua para generación hidroeléctrica, la mitad de los fondos pagados debe reinvertirse en las cuencas, tanto en áreas protegidas como en terrenos privados (según el Decreto Ejecutivo 32868-MINAE, publicado en *La Gaceta* No. 21 el 30 de enero de 2006; M. Rojas, comunicación personal).

Se ha acumulado ya algo de experiencia sobre la región en proyectos de centrales hidroeléctricas que experimentan con programas de conservación que involucran algún tipo de método de compensación para los ríos que se están modificando con presas. En este caso, los sistemas fluviales intactos serían los objetivos a los que se enfocaría la conservación. De nuevo, Costa Rica presenta un ejemplo. El Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, actualmente en construcción en la vertiente del Caribe del país, incluye en su plan de gestión ambiental y social una estrategia para instalar un corredor fluvial protegido sin barreras frente a la conectividad en un sistema fluvial ecológicamente similar al del Reventazón. La idea que subyace a esta estrategia de compensación es tratar de que la construcción y operación del Proyecto

⁸⁵ Locatelli et al. 2011.

⁸⁶ Blackman y Woodward 2010.

Hidroeléctrico Reventazón no produzcan ninguna pérdida neta ni ganancia neta para la biodiversidad⁸⁷. Aunque esta estrategia es encomiable, la consideración de aspectos de adicionalidad (por ejemplo, si en el futuro se afectaría de alguna manera el río compensado) debería ser un componente de la evaluación de los sistemas candidatos potenciales para estas compensaciones.

10.Mantener algunos ríos a cubierto de la explotación hidroeléctrica⁸⁸

Muchos países centroamericanos, sobre todo Costa Rica, tomaron decisiones en el siglo XX para asignar una cantidad considerable de bosques nacionales con vistas a su conservación e invirtieron en un sistema de áreas protegidas que en gran medida ha sido la base misma de una lucrativa industria ecoturística. En Costa Rica en especial, esta industria turística ha sido durante años una de las principales fuentes de divisas para el país. Se podrían tomar decisiones semejantes en Costa Rica y otros países centroamericanos para proteger los ecosistemas de agua dulce, tal vez a través de sistemas de designación similares al concepto de ríos naturales y panorámicos (*Wild and Scenic Rivers*) de Estados Unidos. Se podrían elaborar categorías de protección para cuencas o ríos individuales con base en su importancia ecológica o socioeconómica, pudiendo permitirse algunos usos y restringirse otros. La meta de esas asignaciones sería asegurarse de la persistencia de ríos de flujo libre en el panorama centroamericano, que según las trayectorias en curso del desarrollo hidroeléctrico serán cada vez más escasos en los próximos 15 años⁸⁹. De todas las recomendaciones formuladas aquí, esta última es potencialmente la más importante para mantener en cierta proporción los singulares ecosistemas de agua dulce de la región y de su biodiversidad en este siglo y en los siguientes.

11.Conclusiones

Centroamérica parece hallarse en una encrucijada. La región ha experimentado un extenso desarrollo de la energía hidroeléctrica en los últimos 30 años, acompañado por un conjunto de lecciones sobre las consecuencias ecológicas y sociales de las presas. Al mismo tiempo, están surgiendo algunos ejemplos positivos de toda la región sobre la manera en que puede incorporarse la energía hidroeléctrica en la planificación a escala del paisaje o sobre formas en

⁸⁷ BID 2012.

⁸⁸ Anderson et al. 2006b.

⁸⁹ CEAC 2012.

que las iniciativas de conservación pueden proteger mejor los servicios de los ecosistemas de agua dulce. Es probable que la energía hidroeléctrica sea una de las piedras angulares del futuro energético de Centroamérica y, por consiguiente, es muy necesario aprender de los desafíos del pasado y compartir innovaciones para la conservación y la gestión de los recursos de agua dulce a escala regional.

Cuadros

Cuadro 1. Ecorregiones de agua dulce de Mesoamérica y sus características generales

Nombre	País(es)	Superficie aprox. (km ²)	Longitud aprox. de los sistemas fluviales (km)
Tehuantepec-Golfo de Fonseca	México, Guatemala, Honduras, El Salvador	92.256	92.031
Quintana Roo-Motagua	México, Belice, Guatemala, Honduras	27.039	24.242
Caribe hondureño	Honduras, Nicaragua	121.748	117.108
Estero Real - Tempisque	Honduras, Nicaragua, Costa Rica	28.295	27.514
San Juan	Nicaragua, Costa Rica	105.325	93.577
Térraba - Coto	Costa Rica, Panamá	12.954	11.804
Caribe istmeño	Costa Rica, Panamá	10.672	8.684
Chiriquí	Panamá	12.419	6.737
Azuero	Panamá	15.702	13.648
Chagres	Panamá	11.953	8.796
Tuira	Panamá	23.655	21.205

Fuente: TNC 2009

Cuadro 2. Tendencias en el sector eléctrico centroamericano, con la contribución relativa de la energía hidroeléctrica a la capacidad de generación instalada y a la electricidad neta generada, 1990-2011, en seis países*

Año	Capacidad instalada (MW)			Generación neta (GWh)		
	Total	Hidroeléctrica	Porcentaje energía hidro-eléctrica	Total	Hidroeléctrica	Porcentaje energía hidro-eléctrica
1990	4.129,3	2.708,6	66	14.175,2	12.165,9	86
1995	5.218,4	2.797,0	54	19.454,4	11.468,5	59
2000	7.258,3	3.314,7	46	26.955,4	15.417,8	57
2005	9.134,0	3.881,0	42	34.504,0	17.050,3	49
2010	11.205,4	4.490,7	40	40.668,2	20.974,4	52
2011	11.864,6	4959,3	42	42.115,2	20.623,9	49

Fuente: ONU-CEPAL 2012

* El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá.

Cuadro 3. Comparaciones entre el sector eléctrico y las contribuciones relativas de la energía hidroeléctrica en Centroamérica y seis países*

	Capacidad instalada (MW)			Generación neta (GWh)		
	Total	Hidroeléctrica	Porcentaje energía hidro-eléctrica	Total	Hidroeléctrica	Porcentaje energía hidro-eléctrica
Centroamérica	11.864,4	4.959,3	42	42.115,2	20.623,9	49
Costa Rica	2.650,2	1.643,7	62	9.759,6	7.134,6	73
El Salvador	1.503,5	486,5	32	5.812,7	2.075,4	36
Guatemala	2.590,5	902,3	35	8.146,6	4.094,2	50
Honduras	1.731	528	31	7.126,5	2.809,6	39
Nicaragua	1.093,7	105,3	10	3.567,3	438,2	12
Panamá	2.295,7	1.293,5	56	7.702,5	4.071,9	53

Fuente: ONU-CEPAL 2012

* El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá.

Cuadro 4. Ejemplos de criterios para considerar los impactos ambiental, social y económico de los proyectos de energía hidroeléctrica. La mayoría de estos efectos deberían tenerse en cuenta en las etapas iniciales o de preparación de los proyectos, tras la evaluación de la necesidad comprobada de servicios de agua y energía y de todas las alternativas disponibles para satisfacerla. En las evaluaciones se debería señalar la propuesta de construir una presa como opción prioritaria.

Impacto	Medidas para considerar el impacto y las concesiones recíprocas conexas en materia ambiental, social y económica	Ejemplos de opciones conexas para evitar y mitigar el impacto
Inundación de hábitat naturales y pérdida de flora y fauna silvestre terrestre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hectáreas inundadas por megavatio (MW) ▪ Especies por hectárea ▪ Especies endémicas por hectárea ▪ Posibles emisiones de gases de efecto invernadero por hectárea (CO₂, CH₄) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selección de sitios para la construcción de presas de manera de minimizar las inundaciones, particularmente cuando se trate de lugares ecológicamente delicados, con una gran riqueza y endemidad de especies o en zonas boscosas ▪ Establecer como objetivo una baja relación hectáreas/MW, especies/hectárea y especies endémicas/hectárea ▪ Designación de áreas naturales ecológicamente similares como zonas protegidas compensatorias o refuerzo de la protección y gestión de zonas existentes que reciban poco apoyo
Desplazamiento involuntario de personas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relación entre número de personas desplazadas y MW ▪ Relación entre número de personas de grupos vulnerables (por ejemplo, indígenas, mujeres, minorías) y MW 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evitar sitios culturalmente importantes, zonas densamente pobladas y zonas habitadas por minorías étnicas u otros grupos vulnerables ▪ Establecer como objetivo una baja relación de personas desplazadas/MW y de personas de grupos vulnerables desplazadas/MW ▪ Reasentamiento de poblaciones desplazadas, en condiciones similares o mejores ▪ Adopción de decisiones sobre la base de consultas y de la participación de las poblaciones reasentadas y anfitrionas
Pérdida de medios de subsistencia (por ejemplo, basados en la pesca, la agricultura o las tierras de pastoreo, los materiales de construcción u otros recursos)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Porcentaje de población local cuyos medios de subsistencia se verán afectados ▪ Porcentaje de la economía local vinculada a los recursos afectados ▪ Posibilidad de encontrar medios de subsistencia sustitutivos o alternativos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evitar los sitios donde los medios de subsistencia locales estén vinculados en gran medida a recursos ambientales ▪ Asistencia para el restablecimiento de los ingresos, suministro de recursos sustitutivos o formación laboral en campos nuevos para las personas afectadas
Cambios hidrológicos aguas abajo y pérdidas de conectividad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relación longitud (metros) de la sección desaguada/MW ▪ Presencia de especies acuáticas migratorias ▪ Porcentaje de especies de la fauna acuática que son 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es preferible acortar la longitud de la sección desaguada o desaguar pocos metros por MW ▪ Manejo de los desembalses prescritos, de forma tal que imiten el régimen hidrológico natural, teniendo en cuenta los importantes

	migratorias	<p>nexos entre el caudal y la ecología o entre el caudal y los servicios ecosistémicos (caudales ambientales)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Evitar los ríos donde haya un alto porcentaje de especies migratorias ▪ Considerar opciones para mantener cierto grado de conectividad entre el curso alto y el curso bajo de los ríos (por ejemplo, presas que bloqueen solo una parte del cauce, cruces efectivos) ▪ Implementación de mecanismos de “compensación” para los ríos, es decir, de protección y mantenimiento de las condiciones naturales en ríos comparables sin presas ni otras barreras para la conectividad ▪ Patrocinio de investigaciones científicas sobre las relaciones entre el caudal y la ecología y entre el caudal y los servicios del ecosistema
Localización del proyecto en una red hidrográfica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Porcentaje de la cuenca hidrográfica que está aguas arriba de las presas (acumulativo) ▪ Presencia y porcentaje (acumulativo) de zonas ecológicamente delicadas aguas arriba de las presas ▪ Porcentaje de las cabeceras de ríos o kilómetros de las redes de cabeceras de ríos que están aguas arriba de las presas (valores acumulativos) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En las cuencas donde no haya presas, reducir al mínimo el porcentaje de la cuenca y de la cabecera situado aguas arriba de las presas ▪ En las cuencas donde haya presas, considerar los porcentajes acumulativos de las cuencas hidrográficas y de las cabeceras aguas arriba de las presas, y reducir al mínimo las pérdidas adicionales de conectividad ocasionadas por el proyecto en las áreas aguas arriba ▪ Considerar opciones para mantener la conectividad hidrológica entre la cabecera y las áreas aguas abajo a fin de posibilitar la exportación de sedimentos, nutrientes y materia orgánica desde la cabecera
Sedimentación de los embalses y deterioro de la calidad del agua	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carga natural de sedimentos del río ▪ Usos de las tierras no boscosas en las cuencas situadas aguas arriba de las presas (por ejemplo, porcentaje del uso agrícola, urbano y para pastoreo) ▪ Kilómetros de bosques ribereños (longitudinalmente y a lo largo del cauce de los ríos) y ancho medio de los corredores ribereños aguas arribas de las presas ▪ Presencia de enfermedades en la región cuyos vectores dependen del agua (por ejemplo, malaria, esquistosomiasis) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestión de cuencas y control del uso de la tierra aguas arriba de las presas, especialmente el mantenimiento de bosques prístinos o la reforestación de áreas taladas ▪ Incentivos para mantener los corredores ribereños o apoyo para el cumplimiento de las leyes vigentes sobre el ancho de las zonas ribereñas ▪ Medidas de control de la contaminación del agua control (por ejemplo, tratamiento de aguas residuales, normas industriales) ▪ Control de la vegetación acuática flotante en el embalse ▪ Medidas preventivas de salud pública para reducir al mínimo la exposición a enfermedades (por ejemplo, campañas de sensibilización, mosquiteros, vigilancia de vectores y de brotes de enfermedades)
Impacto de las obras	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kilómetros de caminos nuevos que se construirán 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducir al mínimo los kilómetros de nuevos caminos de acceso y

civiles complementarias (por ejemplo, caminos de acceso, líneas de transmisión)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kilómetros de líneas de transmisión desde las presas 	líneas de transmisión necesarios para el proyecto <ul style="list-style-type: none"> ▪ Evitar la construcción de nuevos caminos de acceso y líneas de transmisión que atraviesen bosques prístinos; en los casos en que eso sea inevitable, adoptar medidas complementarias de conservación forestal o establecer zonas protegidas ▪ Adoptar prácticas óptimas aceptadas para la ubicación, el diseño técnico y la construcción de nuevos caminos y líneas de transmisión
---	--	---

Fuentes: Comisión Mundial de Presas 2000; Ledec y Quintero 2003; PNUMA Proyecto de Presas y Desarrollo 2007; Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica 2010. MW= megavatios de capacidad instalada

Referencias

- Abell, R., J. D. Allan y B. Lehner. 2007. *Unlocking the potential of protected areas for freshwaters*. *Biological Conservation* 134: 48–63.
- Anderson, E. P., M. C. Freeman y C. M. Pringle. 2006a. *Ecological consequences of hydropower development in Central America: Impact of small dams and water diversion on Neotropical stream fish assemblages*. *River Research and Applications* 22: 397–411.
- Anderson, E. P., C. M. Pringle y M. Rojas. 2006b. *Transforming tropical rivers: An environmental perspective on hydropower development in Costa Rica*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 16: 679–93.
- Anderson, E. P., C. M. Pringle y M. C. Freeman. 2008. Quantifying the extent of river fragmentation by hydropower dams in the Sarapiquí River Basin, Costa Rica. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 18: 408–17.
- Anderson, E. P., A. Encalada, J. A. Maldonado-Ocampo, M. E. McClain, H. Ortega y B. P. Wilcox. 2011. Environmental flows: A tool for addressing effects of river alterations and climate change in the Andes. In S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jorgensen y H. Tiessen (eds.), *Climate Change Effects on the Biodiversity of the Tropical Andes: An Assessment of the Status of Scientific Knowledge*, Capítulo 23. São José dos Campos y París: Inter-American Institute of Global Change Research and Scientific Committee on Problems of the Environment.
- Blackman, A. y R. T. Woodward. 2010. User Financing in a National Payments for Environmental Services Program. Discussion Paper. Washington, DC: Resources for the Future.
- Bonta, M. 2004. Death toll one: An ethnography of hydropower and human rights violations in Honduras. *Geojournal* 60: 19–30.

- Burgues-Arrea, I. 2005. Inventario de Proyectos de Infraestructura en Mesoamérica. Conservation Strategy Fund, Proyecto: Integración de la Infraestructura y la Conservación de la Biodiversidad en Mesoamérica. Fondo de Alianzas para los Ecosistemas Críticos, The Nature Conservancy.
- Bussing, W. A. 1976. Geographic distribution of the San Juan Ichthyofauna of Central America with remarks on its origin and ecology. In T. B. Thorson (ed.), Investigations of the Ichthyofauna of Nicaraguan Lakes, 167–76. Lincoln, Nebraska.
- Butterfield, R. P. 1994. The regional context: Land colonization and conservation in Sarapiquí. In L. McDade, K. S. Bawa, H. A. Hespeneide y G. S. Hartshorn (eds.), *La Selva: Ecology and Natural History of a Neotropical Rain Forest*, 299–328. Chicago: University of Chicago Press.
- CEAC (Consejo de Electrificación de América Central). 2012. Resumen Ejecutivo: Plan Indicativo Regional 2012–2027. GTPIR.
- Chaves, A., A. Pacheco, I. Krasovskaia y L. Gottschalk. n.d. RANA-ICE: A methodology to estimate compensatory runoff in Costa Rica.
- Cifuentes Jara, M. 2010. ABC of Climate Change in Mesoamerica. Technical Report No. 383. Climate Change Program. Turrialba, Costa Rica: Centro de Investigación y de Educación Superior en Agricultura de la Región Tropical.
- Conservation International. 2007. Biodiversity hotspots: Mesoamerica. En www.biodiversityhotspots.org.
- Diez H., J. M. y L. Burbano B. 2006. Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. *Revista Ingeniería e Investigación* 26(1): 58–68.
- Diez H., J. M. y D. H. Ruiz C. 2007. Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca). *Investigación* 10(4): 153–66.

- Dyson, M., M. Bergkamp y J. Scanlon. 2003. *Flow: The Essentials of Environmental Flows*. Gland, Suiza, y Cambridge, Reino Unido: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.
- Esselman, P. C. y J. D. Allan. 2011. Application of species distribution models and conservation planning software to the design of a reserve network for the riverine fishes of northeastern Mesoamerica. *Freshwater Biology* 56: 71–88.
- Esselman, P. C. y J. J. Opperman. 2010. Overcoming information limitations for the prescription of an environmental flow regime for a Central American river. *Ecology and Society* 15(1): 6.
- Finer, M. y C. N. Jenkins. 2012. Proliferation of hydroelectric dams in the Andean Amazon and implications for Andes-Amazon connectivity. *PLOS ONE* 7(4): e35126.
- Finley-Brook, M. y C. Thomas. 2010. Treatment of displaced indigenous populations in two large hydro projects in Panama. *Water Alternatives* 3(2): 269–90.
- Fletcher, R. 2010. When environmental issues collide: Climate change and the shifting political ecology of hydroelectric power. *The Peace and Conflict Review* 5(1): 1–15.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33(8): L08707.
- Goodland, R. J. A., A. Juras y R. Pachauri. 1993. Can hydro-reservoirs in tropical moist forests be environmentally sustainable? *Environmental Conservation* 20: 122–30.
- Hoeinghaus, D. J., A. A. Agostinho, L. C. Gomes, F. M. Pelicice, E. K. Okada, J. D. Latini, E. A. L. Kashiwaqui y K. O. Winemiller. 2009. Effects of river impoundment on ecosystem services of large tropical rivers: Embodied energy and market value of artisanal fisheries. *Conservation Biology* 23(5): 1222–31.
- . 2012. Proyecto Hidroeléctrico de Reventazón – Informe de gestión ambiental y social. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Washington, DC.
- . 2010. Protocolo de Evaluación de Sostenibilidad de la Energía Hidroeléctrica. International Hydropower Association. Londres.

- Jimenez, J. A., J. Calvo, F. Pizzaro y E. González. 2005. Conceptualization of Environmental Flow in Costa Rica: Preliminary Determination for the Tempisque River. San José, Costa Rica: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.
- Karmalkar, A. V., R. S. Bradley y H. F. Diaz. 2011. Climate change in Central America and Mexico: Regional climate model validation and climate change projections. *Climate Dynamics* 37: 605–29.
- Ledec, G. y J. D. Quintero. 2003. Good Dams and Bad Dams: Environmental Criteria for Site Selection of Hydroelectric Projects. Latin America and Caribbean Region, Sustainable Development Working Paper 16. Washington, DC: World Bank.
- Locatelli, B., P. Imbach, R. Vignola, M. J. Metzger y E. José Leguía Hidalgo. 2011. Ecosystem services and hydroelectricity in Central America: Modelling service flows with fuzzy logic and expert knowledge. *Regional Environmental Change* 11: 393–404.
- Lorion, C. M., B. P. Kennedy and J. H. Braatne. 2011. Altitudinal gradients in stream fish diversity and the prevalence of diadromy in the Sixaola River Basin, Costa Rica. *Environmental Biology of Fish* 91: 487–99.
- Matamoros, W. A., J. F. Schaefer y B. R. Kreiser. 2009. Annotated checklist of the freshwater fishes of continental and insular Honduras. *Zootaxa* 2307: 1–38.
- Matamoros, W. A., B. R. Kreiser y J. F. Schaefer. 2012. A delineation of nuclear Middle America biogeographical provinces based on river basin faunistic similarities. *Review Fish Biology and Fisheries* 22: 351–65.
- Maurer, E. P., J. C. Adam y A. W. Wood. 2009. Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 183–94.
- McCully, P. 1996. *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*. London: Zed Books.
- McLarney, W. O., M. Mafla, A. M. Arias y D. Bouchonnet. 2010. The Threat to Biodiversity and Ecosystem Function of Proposed Hydroelectric Dams in the La Amistad World

- Heritage Site, Panama and Costa Rica. San Jose, Costa Rica: Programa de Biomonitorareo Asociación ANAI.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Millennium Ecosystem Assessment: Synthesis Report. Washington, DC: Island Press.
- Miller, R. R. 1966. Geographical distribution of Central American freshwater fishes. *Copeia*. December: 773–802.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca y J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853–58.
- Naiman, R. J. y D. Dudgeon. 2011. Global alteration of freshwaters: Influences on human and environmental well-being. *Ecological Research* 26: 865–76.
- Naiman, R. J., S. E. Bunn, C. Nilsson, G. E. Petts, G. Pinay y L. C. Thompson. 2002. Legitimizing fluvial ecosystems as users of water: An overview. *Environmental Management* 30(4): 455–67.
- Nordlie, F. G. 2012. Life-history characteristics of eleotrid fishes of the western hemisphere, and perils of life in a vanishing environment. *Review of Fish Biology and Fisheries* 22: 189–224.
- Paaby, P. 2008. Vacíos en los esfuerzos de conservación de la biodiversidad en aguas continentales de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 54: 28–36.
- Palmer, M. A., C. A. Reidy Liermann, C. Nilsson, M. Florke, J. Alcamo, P. S. Lake y N. Bond. 2008. Climate change and the world's river basins: Anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6: 81–89.
- Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks y J. C. Stromberg. 1997. The natural flow regime. *BioScience* 47: 769–84.
- Poff, N. L., B. D. Richter, A. H. Arthington, S. E. Bunn, R. J. Naiman, E. Kendy, M. Acreman, C. Apse, B. P. Bledsoe, M. C. Freeman, J. Henriksen, R. B. Jacobson, J. G. Kennen, D. M. Merritt, J. H. O'Keeffe, J. D. Olden, K. Rodgers, R. E. Tharme y A. Warner. 2010.

- The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology* 55: 147–70.
- Pomeu, P.S., A. A. Agostinho and F. M. Pelicice. 2012. Existing and future challenges: The concept of successful fish passage in South America. *River Research and Applications* 28(4): 504–12.
- Pringle, C. M. 2001. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: A global perspective. *Ecological Applications* 11: 981–98.
- Pringle, C. M., M. C. Freeman y B. J. Freeman. 2000. Regional effects of hydrologic alterations on riverine macrobiota in the New World: Tropical-temperate comparisons. *BioScience* 50(9): 807–23.
- Reis, R. E., S. O. Kullander y C. J. Ferrais Jr. 2003. Checklist of the Freshwater Fishes of South and Central America. Porto Alegre, Brazil: EPIDUCRS.
- Scatena, F. N. 2004. A survey of methods for setting minimum instream flow standards in the Caribbean Basin. *River Research and Applications* 20: 127–35.
- Smith, S. A. y E. Bermingham. 2005. The biogeography of lower Mesoamerican freshwater fishes. *Journal of Biogeography* 32: 1835–54.
- Tharme, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19: 397–441.
- . 2009. Evaluación de Ecorregiones de Agua Dulce en Mesoamérica, Sitios Prioritarios para la Conservación en las Ecorregiones de Chiapas a Darién. Programa de Ciencias Regional, Región Mesoamérica y El Caribe. The Nature Conservancy. San José, Costa Rica.
- . 2009. Centroamérica: Estadísticas del Subsector Eléctrico, 2011. UN-CEPAL, Sede Subregional en México. United Nations.

- Vorosmarty, C. J., P. B. McIntyre, M. O. Gessner, D. Dudgeon, A. Prusevich, P. Green, S. Glidden, S. E. Bunn, C. A. Sullivan, C. Reidy Liermann y P. M. Davies. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467: 555–61.
- Ward, J. V. 1989. The four dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society* 8: 2–8.
- . 2000. *Dams and Development: A Framework for Decision-Making*. London: Earthscan/Routledge. World Commission on Dams
- . 2012. Worldwatch Institute. 2012. Sustainable energy roadmaps. At www.worldwatch.org/sustainable-energy-roadmaps.