



DOCUMENTO
DE TRABAJO

PLANIFICACIÓN DE HIDROENERGÍA

A ESCALA DE SISTEMA

ANTECEDENTES Y CONTEXTO

El presente documento ha sido elaborado con el objetivo de brindar información técnica relacionada a las actividades de planificación energética y energías renovables de la Dirección General de Eficiencia Energética del Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM).

Actualmente es posible generar energía sin alterar significativamente a la naturaleza y a los ríos que fluyen libremente, orientándola desde la planificación hacia los lugares más adecuados y evitando proyectos con altos impactos ambientales.

Para ello se presenta el enfoque de “Planificación de hidroenergía a escala de sistema” (SPP por sus siglas en inglés), metodología basada en modelos de optimización multicriterio que permite evaluar escenarios y portafolios de desarrollo hidroeléctrico en una cuenca considerando aspectos económicos, ambientales y sociales.

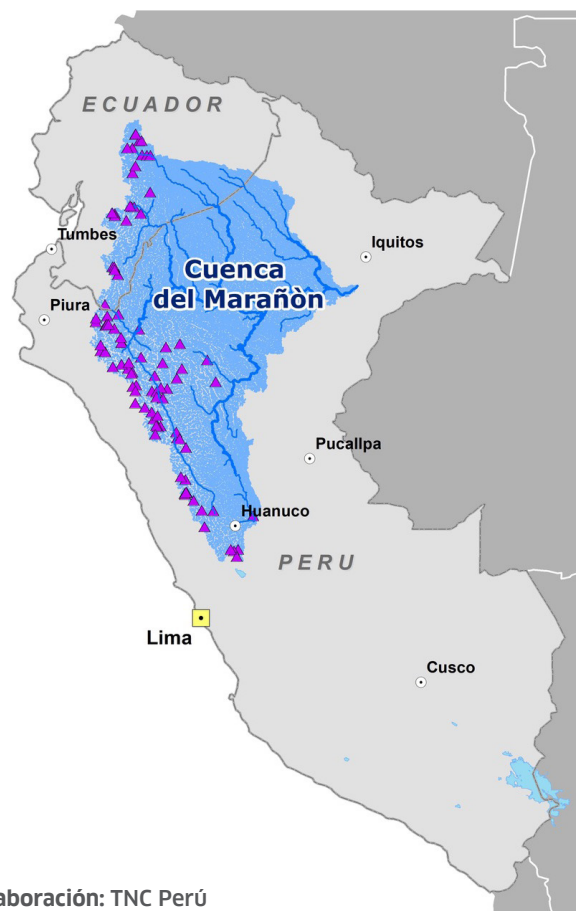
En el marco de la cooperación técnica entre MINEM y The Nature Conservancy - TNC Perú, se ha aplicado esta metodología en la cuenca del río Marañón, con el apoyo técnico de WWF Perú y Confluvio.

METODOLOGÍA

El enfoque SSP tiene como principio que la planificación y la gestión de la energía hidroeléctrica deben ser integrales e incluir plenamente las prioridades económicas, así como evaluar los impactos ambientales y sociales desde las primeras etapas del proyecto para promover la sostenibilidad y los beneficios que esta infraestructura puede traer.

Su modelamiento incluye un módulo de evaluación ambiental y un módulo de optimización multiobjetivo. El módulo de evaluación ambiental calcula los beneficios e impactos en la red fluvial de un portafolio de proyectos hidroeléctricos. El módulo de optimización multiobjetivo luego usa las métricas resultantes para generar portafolios de proyectos “optimizados” que maximizan la producción de energía y minimizan los impactos ambientales.

Figura 1: Mapa de ubicación de la cuenca del Marañón y las centrales de generación hidroeléctrica existentes.



Elaboración: TNC Perú

Cuenca del Río Marañón

La cuenca del Marañón (364,990 km² entre Perú y Ecuador) es parte de la cabecera de cuenca del río Amazonas y la séptima cuenca tributaria más grande de toda la Amazonia. Asimismo, el Marañón alberga a más de 200 comunidades (nativas y amazónicas), brinda los sedimentos necesarios para la formación de las grandes llanuras amazónicas, brinda áreas de desove de los grandes bagres migratorios y brinda hábitats para aproximadamente el 15% de los peces registrados en Perú. El interés de realizar el estudio en la cuenca del Marañón radica en la oportunidad de optimizar el uso de recursos de uno de los últimos ríos en la cuenca del Amazonas que aun mantiene su condición de río de curso libre (Véase Figura 1).

BASE DE DATOS, DEFINICIÓN DE VARIABLES Y ESCENARIOS PARA EL PILOTO EN LA CUENCA DEL MARAÑÓN

BASE DE DATOS

- **HydroSHEDS:** Base de datos global de una red fluvial. Se consideraron ríos con un caudal promedio mínimo de 0.1 m³/s, se excluyeron ríos más pequeños debido a las incertidumbres en los datos hidrográficos y de caudales globales. En la cuenca del Marañón se encontraron cerca de 55 000 tramos con una longitud promedio de 2.5 km cada uno, lo que suma un total de 137 000 km de ríos. (HydroSHEDS, 2022).
- **HydroATLAS:** Base global de datos hidro-ambientales (datos para cada subcuenca y tramo fluvial en alta resolución espacial). Incluye atributos de hidrología; fisiografía; climático; cobertura terrestre; suelos; y factores antropogénicos. Incluyen variables como precipitación, escorrentía, caudal, distribución de especies y otras. (HydroSHEDS, 2022).
- **Evaluación del corredor de conectividad de agua dulce de la Amazonia (FCC).** Mapea el estado de conectividad de los ríos. En él se indica que el cauce principal del Marañón se encuentra entre los ríos con el mayor número de especies migratorias identificadas en la cuenca amazónica, otros ríos de la cuenca del Marañón también son corredores importantes (ríos Huallaga, Tigre, Pastaza, Morona y Santiago. (Caldas et al. 2022, in press).
- **Centrales hidroeléctricas existentes y potenciales:** Al 2022, la cuenca del Marañón tiene 110 centrales hidroeléctricas (en Perú y Ecuador), y 70 potenciales proyectos en el lado peruano. Las fuentes de información empleadas fueron: los Planes de Transmisión del COES de los periodos 2019 - 2028, 2021 - 2030 y 2023 - 2032, y las fichas técnicas de centrales de generación del OSINERGMIN.

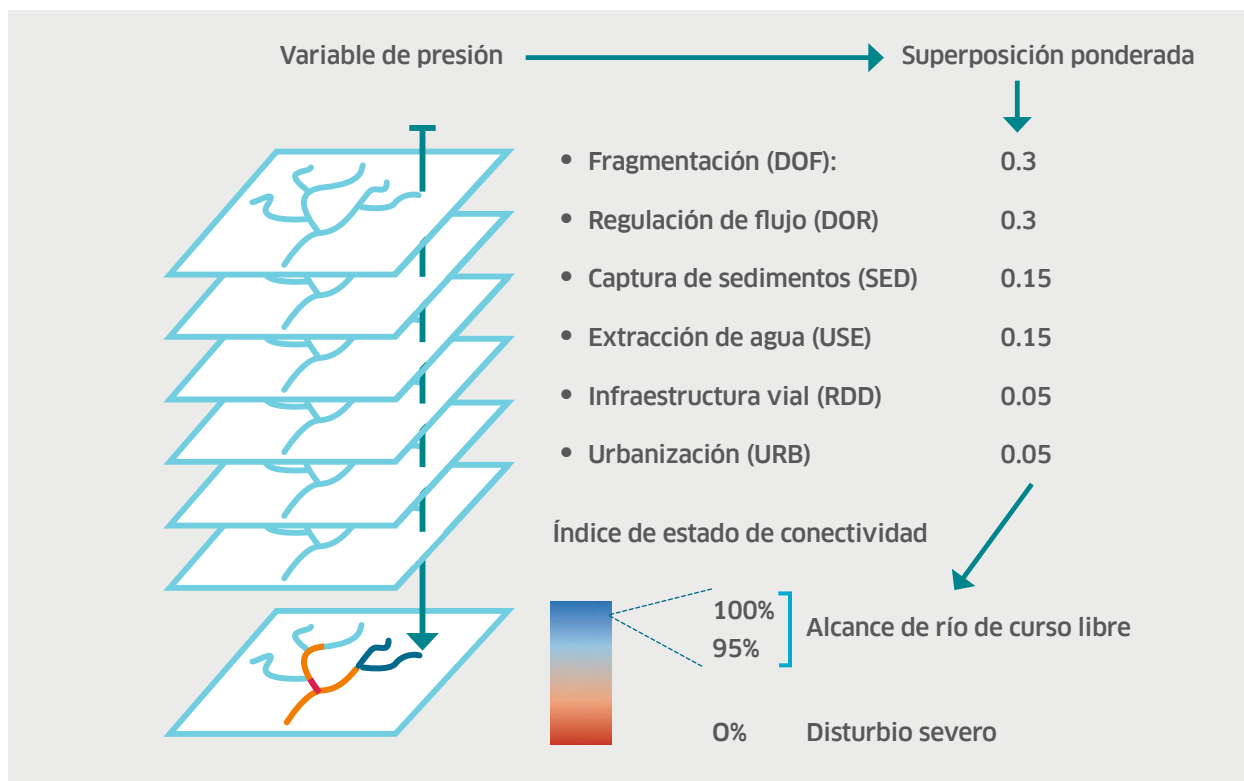
Ríos de curso libre e índice de estado de conectividad

Un río de curso libre (FFR por sus siglas en inglés) es aquel que se encuentra verdaderamente inalterado o con cierto desarrollo, pero que todavía conservan gran parte de (o todas) sus características principales, como un régimen de flujo natural, y la conectividad fluvial (Opperman et al. 2015). Esta conectividad se define en cuatro dimensiones: longitudinal (aguas arriba y aguas abajo), lateral (con llanuras de inundación y zonas ribereñas), vertical (con aguas subterráneas y la atmósfera) y temporal (estacionalidad de los caudales).

El índice del estado de conectividad (CSI por sus siglas en inglés; Grill et al., 2019), cuantifica el grado en que un tramo individual del río permanece conectado a sus tramos vecinos dentro de la red fluvial más amplia. El CSI considera cinco “factores de presión” que representan las principales interferencias humanas dentro de las cuatro dimensiones de la conectividad fluvial mencionadas anteriormente: a) fragmentación del río (longitudinal); b) regulación del caudal (lateral y temporal); c) captura de sedimentos (longitudinal, lateral y vertical); d) consumo de agua (lateral, vertical y temporal); e) desarrollo de infraestructura en zonas ribereñas y llanuras de inundación (lateral y longitudinal).

Los valores del índice CSI entre 95 y 100 % se definieron para indicar un estado de conectividad “bueno”, mientras que los valores inferiores a 95 % indican tramos fluviales que se ven afectados por las perturbaciones y, por tanto, no son de “curso libre”.

Figura 2: Índice del estado de conectividad



Fuente: Grill et al. 2019.

ESCENARIOS

Se desarrolló más de 2 000 escenarios hidroeléctricos para el caso peruano, donde cada uno representa un camino diferente, plausible pero general, de desarrollo hidroeléctrico basado en un conjunto de metas o supuestos. Luego se usaron estos escenarios para orientar la selección de “portafolios” (conjunto específico de proyectos hidroeléctricos). Para desarrollar y evaluar los escenarios hidroeléctricos se usaron dos enfoques, los cuales se mencionan a continuación:

A) ESCENARIOS DE UN SOLO OBJETIVO:

- **Proyectos identificados por el MINEM:** se destacan los proyectos que tienen un conjunto de datos y atributos más completos.
- **Proyectos concentrados en ciertas zonas geográficas:** son deseables los proyectos basados en la zona central y en zonas menos propensas a sufrir grandes variaciones en el clima.
- **Objetivos financieros:** se trata de minimizar el costo nivelado de la energía al tiempo que se produce suficiente capacidad para el uso nacional y posible exportación.

- **Mantener los corredores de conectividad fluvial más importantes:** busca mantener el corredor de biodiversidad acuática de la Amazonía.
- **Escenarios sin fragmentación hidrológica adicional:** busca mantener el estado actual de conectividad de la cuenca en general y de los ríos largos de curso libre.
- **Proyectos cercanos a la infraestructura de líneas de transmisión existente:** busca identificar portafolios con sinergias con la infraestructura existente (subestaciones eléctricas y líneas de transmisión).

B) ESCENARIOS MULTIOBJETIVO OPTIMIZADOS:

Estos portafolios son optimizados por el modelo para causar los menores impactos posibles, teniendo en cuenta una gran cantidad de métricas, en relación con la cantidad de capacidad adicional hidroeléctrica instalada, producida por el portafolio.

MÉTRICAS

Se utilizaron dos tipos de métricas para la comparación y optimización de escenarios: A) **Métricas de rendimiento**, usualmente asociadas a los beneficios de los proyectos; B) **Métricas de impacto**, se utilizaron seis métricas de impacto hidro-ambiental derivadas del Índice de Estado de Conectividad (CSI):

Rendimiento ✓	Impacto ✓
<ul style="list-style-type: none">● Capacidad adicional instalada en la cuenca (MW)● Capacidad adicional instalada en Perú (MW)● Producción de energía anual (GWh)● Proyectos en la zona central● Costos de inversión● Costo nivelado de energía (USD/kWh)● Índice de cambio en las precipitaciones	<ul style="list-style-type: none">● Longitud total de ríos (Km) con pérdida de conectividad (CSI < 95%)● N° total de ríos en los corredores de conectividad acuáticos con una pérdida de conectividad (km / n° de especies)● Disminución de conectividad de la cuenca (%)● Pérdida total de conectividad de la cuenca (%)● Longitud total de los ríos (en km) con aumentos significativos en la captura de sedimentos● Impacto en los ríos de gran longitud y curso libre (>300km)

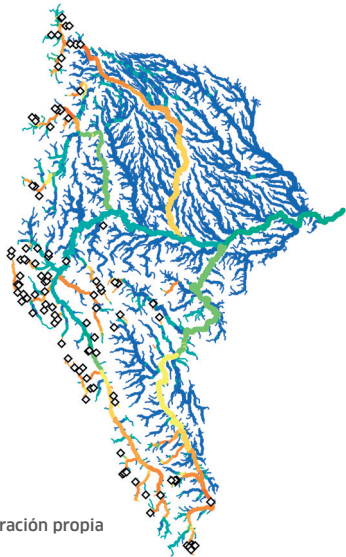
EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presenta un extracto de los resultados de la aplicación de esta metodología en la cuenca del Marañón. Es importante considerar que esta herramienta se enfoca en mostrar y comparar los resultados de diferentes escenarios de desarrollo hidroeléctrico antes que recomendar o promover una cartera específica de proyectos o un nivel específico de generación.

Se calcularon los impactos a la red fluvial de todas las centrales hidroeléctricas existentes para evaluar la situación actual en la cuenca del río Marañón (Mapa 3A). En contraste, se produjo un escenario hipotético de máximo desarrollo hidroenergético que involucra la construcción de todos los proyectos potenciales y produce un máximo posible de capacidad hidroeléctrica instalada adicional, así como la mayor pérdida de conectividad y mayor impacto ambiental (Mapa 3B). Ambos mapas se presentan en la Figura 3.

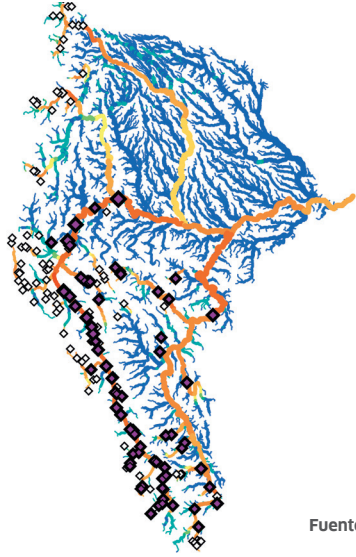
El modelo SSP elaboró más de 39 mil simulaciones, lo que generó más de 2 mil portafolios de proyectos individuales optimizados. De estos, 1,178 portafolios representan opciones que minimizan los impactos ambientales, pero maximizan el desempeño a través de las métricas económicas, pero también con diferentes métricas de desempeño e impacto individuales. En la Figura 4, se muestra un ejemplo de escenario con un solo objetivo (Mapa 4A) y un ejemplo de escenario semi-optimizado multi-objetivo (Mapa 4B).

Mapa 3A: Línea base: Centrales hidroeléctricas existentes al año 2022.



Fuente: Elaboración propia

Mapa 3B: Máximo: Portafolio con todos los proyectos futuros



Fuente: Elaboración propia

Figura 3: A. línea base de proyectos hidroeléctricos en la cuenca del río Marañón al año 2022, incluyendo proyectos ubicados en Perú y Ecuador. B. Escenario de desarrollo máximo, considerando proyectos hidroeléctricos potenciales solo en la parte peruana de la cuenca.

Mapa 4A: Proyectos identificados por MINEM



Fuente: Elaboración propia

Mapa 4B: Portafolio optimizado



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: A. Portafolio de proyectos hidroeléctricos de un escenario con un solo objetivo: Proyectos identificados por el MINEM. B. Ejemplo de portafolio semi-optimizado multi-objetivo de proyectos hidroeléctricos.

	MAPA 3A	MAPA 3B	MAPA 4A	MAPA 4B
ESCENARIO	Línea base de proyectos hidroeléctricos (existente)	Desarrollo máximo (todos los proyectos potenciales)	Proyectos identificados por MINEM (escenario con un solo objetivo)	Portafolio optimizado multiobjetivo
CARACTERÍSTICAS	<ul style="list-style-type: none">• 86 proyectos hidroeléctricos existentes en Perú• 1 proyecto en construcción en Perú• 23 proyectos existentes es Ecuador• Dos centrales hidroeléctricas en el cauce principal• Capacidad total instalada de centrales hidroeléctricas existentes: 3.1 GW• Capacidad instalada de centrales hidroeléctricas existentes en Perú: 950MW	<ul style="list-style-type: none">• Incluye 40 nuevas centrales hidroeléctricas• 2.8 GW de capacidad instalada adicional• Pérdida de ningún río de curso libre• Pérdida de 2% de la conectividad de la cuenca• 1006 km de río impactado• Corredores acuáticos un poco impactados• Costo nivelado de la energía: 0.044USD/kWh• Costo total de inversión: 8801 millones USD	<ul style="list-style-type: none">• Incluye 24 nuevas centrales hidroeléctricas• 3.1 GW de capacidad instalada adicional• Pérdida de 3 ríos largos de curso libre• Pérdida de 3% de la conectividad de la cuenca• 1909 km de río impactado• Corredores acuáticos impactados severamente• Costo nivelado de la energía: 0.054 USD/kWh• Costo total de inversión: 8829 millones USD	<ul style="list-style-type: none">• Incluye 40 nuevas centrales hidroeléctricas• 2.8 GW de capacidad instalada adicional• Pérdida de ningún río de curso libre• Pérdida de 2% de la conectividad de la cuenca• 1006 km de río impactado• Corredores acuáticos un poco impactados• Costo nivelado de la energía: 0.044USD/kWh• Costo total de inversión: 8801 millones USD

HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE PORTAFOLIOS (PAT)

Es una herramienta que permite analizar una gran cantidad de portafolios de proyectos hidroeléctricos a la vez y comparar sus beneficios e impactos. El objetivo de la herramienta es apoyar y guiar las discusiones sobre los resultados para todas las partes interesadas y apoyar la toma de decisiones considerando las ventajas y desventajas de los diferentes portafolios.

La herramienta incluye un gráfico de ejes paralelos en el cual se incluyen las métricas analizadas de desempeño e impacto ambiental. Asimismo, se presenta un mapa interactivo (lado izquierdo) que muestra la ubicación de los proyectos del portafolio seleccionado y se incluye un cuadro con los resultados numéricos del portafolio seleccionado (parte inferior).

Portafolios de desarrollo de proyectos de hidroenergía en la cuenca del Río Marañón

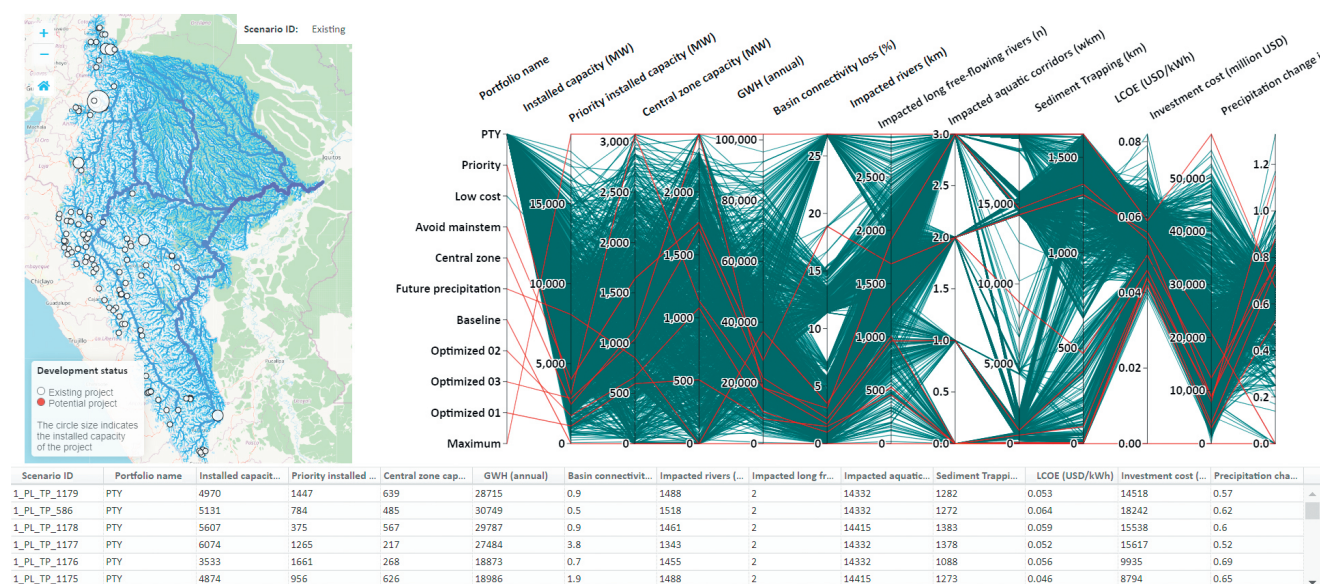


Figura 5: Vista de la herramienta de análisis de portafolios (PAT).

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- ✓ Según los resultados obtenidos, se propone considerar como trabajo futuro la expansión del modelo SSP hacia otras cuencas en el país, lo que permitiría revelar portafolios atractivos con proyectos hidroeléctricos de bajo impacto en otras zonas del Perú, reduciendo la presión sobre ríos de curso libre o en zonas de alta sensibilidad ambiental.
- ✓ El desarrollo de una sólida base de datos de proyectos hidroeléctricos es clave para obtener resultados fiables. Se recomienda establecer una lista completa de los atributos necesarios que los desarrolladores deben proporcionar sobre los proyectos y ampliar las métricas de beneficio e impacto para mejorar el modelo SSP.
- ✓ Existe potencial para vincular el modelo SSP con los modelos de planificación energético peruano, lo cual va a permitir crear escenarios que filtren proyectos con características específicas, e identificar portafolios de bajo impacto ambiental. A partir del análisis realizado, el modelo SSP puede complementarlo identificando los beneficios e impactos de cada portafolio.
- ✓ El modelo SSP puede proyectarse hacia escenarios que integren diferentes fuentes de energía, permitiendo atender las demandas energéticas a la vez de reducir la presión sobre los ecosistemas frágiles. La optimización de la infraestructura ya existente y la inclusión de energías renovables no convencionales son una gran opción para lograr escenarios sostenibles bajos en emisiones de carbono, bajos en costos y bajos en conflictos socioambientales.
- ✓ Es importante considerar que esta herramienta se enfoca en mostrar y comparar los resultados de diferentes escenarios de desarrollo hidroeléctrico antes que recomendar una cartera específica de proyectos o un nivel específico de generación eléctrica.

• **Óscar Vera Gargurevich**
Ministro de Energía y Minas

• **Jaime Luyo Kuong**
Viceministro de Electricidad

• **José Neil Meza Segura**
Director General de Eficiencia Energética MINEM

• **Correo Electrónico:** dgee1@minem.gob.pe

• **Equipo responsable:**
Lucero Luciano de la Cruz (MINEM)
Luis Vilchez León (MINEM)
Christian Contreras (The Nature Conservancy - TNC)
Walescka Cachay (WWF)
Günther Grill (Confluvio)

Lima, Perú. Año 2023.

Referencias

Caldas, B., Thieme, M., Shahbol, N., Coehlo, M.E., Grill, G., Van Damme, R., Aranha, E.E.H., Canas, C., Fagundes, C., Frale, N., Jezequel, C., Montoya, M., Mosquera, F., Oliveira da Costa, M., Paschoalini Frias, M., Petry, P., Oberdorff, T., Trujillo, F., Tedesco, P., Lambert, M. (2022, in press) *Identifying the current and future status of freshwater connectivity corridors in the Amazon Basin. Conservation Biology*.

Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F., Babu, S., Borrelli, P., Cheng, L., Crochetiere, H., Ehalt Macedo, H., Filgueiras, R., Goichot, M., Higgins, J., Hogan, Z., Lip, B., McClain, M., Meng, J., Mulligan, M., Nilsson, C., Olden, J.D., Opperman, J., Petry, P., Reidy Liermann, C., Saenz, L., Salinas-Rodríguez, S., Schelle, P.,

Schmitt, R.J.P., Snider, J., Tan, F., Tockner, K., Valdujo, P.H., van Soesbergen, A., Zarfl, C. (2019) *Mapping the world's free-flowing rivers*. Nature 569, 215.

HydroSHEDS. (2022). HydroAtlas. HydroSHEDS. <https://www.hydrosheds.org/hydroatlas>

HydroSHEDS. (2022). Seamless hydrographic data for global and regional applications. HydroSHEDS. <https://www.hydrosheds.org/>

Opperman, J., G. Grill and J. Hartmann. (2015) The Power of Rivers: Finding balance between energy and conservation in hydropower development. The Nature Conservancy.