Herramientas para la cuantificación del impacto hidrológico y ecológico de la producción hidroeléctrica

María Dolores Bejarano[a], Jaime H. García-Palacios[b], Álvaro Sordo-Ward[b], Carlos Alonso[c], y Christer Nilsson[a]

[a]Grupo Landscape Ecology, Departamento Ecology and Environmental Science, Universidad de Umeå, SE-901 87 Umeå, Suecia,
[b]Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España.
[c]Departamento de Sistemas y Recursos Naturales, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España Autor para correspondencia: dolores.bejarano@umu.se.

Línea temática M | Tema monográfico.

RESUMEN

La energía hidroeléctrica está siendo fomentada a nivel mundial por ser renovable y limpia. Sin embargo, su producción conlleva impactos al ecosistema fluvial, destacando las consecuencias ecológicas de la alteración de los regímenes naturales de caudales. Concretamente, las centrales a pie de presa operan de forma intermitente de acuerdo a los precios y a la demanda de energía, que varían de forma instantánea, provocando el fenómeno del hydropeaking. El hydropeaking consiste en la variación frecuente y rápida del caudal en un breve período de tiempo, generalmente a lo largo del día (variaciones intra-día o instantáneas), y que resulta en alteraciones de parámetros hidráulicos como el nivel del agua, la velocidad del flujo, o la tensión de arrastre, de la morfología fluvial y la calidad del agua. En este trabajo se presenta una herramienta informática (InSTHAn) para el análisis de series largas de caudal y nivel medidas a cualquier escala temporal intra-diaria. InSTHAn permite caracterizar y evaluar el grado de alteración de una serie instantánea de caudales (y niveles) mediante el cálculo rápido y sencillo de 35 indicadores (Short-Term Characterization e Impact Indicators; STCI y STII). También se discute la utilidad de InSTHAn en el desarrollo de modelos hydropeaking – impacto ecológico. Para ello, se presentan de forma sucinta los resultados de un ensayo experimental en el que se relacionó el hydropeaking con el estado de las comunidades riparias. Ume y Vindel han sido los ríos escogidos en el norte de Suecia para la aplicación de InSTHAn y los ensayos de campo, el primero regulado por una serie de centrales hidroeléctricas, y el segundo totalmente inalterado. El conocimiento científico y las nuevas herramientas generados en este trabajo permiten identificar los escenarios de operación que minimizan el impacto sobre el bosque ripario y maximizan la producción hidroeléctrica, así como las más efectivas estrategias de restauración de dicho ecosistema.
Palabras clave | bosque ripario; ecosistema fluvial; energía hidroeléctrica; herramienta; hydropeaking; impacto; software.

INTRODUCCIÓN

La energía hidroeléctrica está siendo fomentada a nivel mundial por tratarse de una energía renovable y limpia. Sin embargo, su producción conlleva impactos al ecosistema fluvial, destacando las consecuencias ecológicas de la alteración de los regímenes naturales de caudales. Concretamente, las centrales a pie de presa operan de forma intermitente de acuerdo a los precios y a la demanda de energía, que varían de forma instantánea, provocando el fenómeno del hydropeaking. El hydropeaking consiste en la variación frecuente y rápida del caudal en un breve período de tiempo, generalmente a lo largo del día (variaciones intra-día o instantáneas), y que resulta en alteraciones de parámetros hidráulicos como el nivel del agua, la velocidad del flujo, o la tensión de arrastre, de la morfología fluvial y la calidad del agua. El término hydropeaking apareció en la literatura científica por primera vez a principios de los noventa (Jackson et al., 1991), pero el fenómeno de la variación de caudales a escalas temporales intra-diarias y su efecto sobre los ecosistemas fluviales fue descrito mucho antes (Hynes, 1970).

No obstante, la investigación de los efectos ecológicos del hydropeaking es reciente. La mayoría de los estudios se centran en comunidades piscícolas y de macroinvertebrados. En peces, las consecuencias más comunes descritas son el varado

("stranding") (Nagrodski et al., 2012), ralentización del crecimiento (Finch, Pine & Limburg, 2015), y cambios de comportamiento (Vollset et al., 2016) de los individuos, disminuciones de la abundancia a nivel poblacional (Freeman et al., 2001) y deterioro de sus hábitats (Boavida et al., 2015). La deriva ("drift") es el efecto más descrito en la literatura sobre macroinvertebrados (Bruno et al., 2016). Desgraciadamente, apenas existe información sobre los efectos del hydropeaking en las comunidades riparias, a pesar de tratarse de un elemento clave del ecosistema fluvial (Gorla et al., 2015). Además, si bien estos estudios aportan información valiosa al describir con detalle los patrones de respuesta de las comunidades biológicas estudiadas, ninguno establece relaciones cuantitativas entre hydropeaking e impacto. Estas relaciones son una herramienta objetiva necesaria para la definición de estrategias de gestión sostenible de ecosistemas fluviales (Poff et al., 2010).

Estudios científicos que i) ayuden a comprender la estructura y funcionamiento de los ríos sometidos al hydropeaking, ii) definan métricas que cuantifiquen la alteración hidrológica y ecológica derivada de éste, y iii) y establezcan relaciones cuantitativas entre alteración hidrológica – ecológica (y en última instancia – económica), son esenciales para garantizar una producción hidroeléctrica sostenible, entendida como el balance óptimo entre producción e impacto. La investigación llevada a cabo en el marco del proyecto RiPeak (Responses of RiParian forests to hydroPeaking: towards a sustainable hydropower management; IEF Marie Curie Actions) ha sido la primera en establecer relaciones cuantitativas entre el impacto hidrológico y ripario derivados del hydropeaking. Para ello, se han definido indicadores capaces de evaluar de forma cuantitativa el impacto de diferentes estrategias de producción hidroeléctrica, y por ende diferentes escenarios de hydropeaking, sobre el régimen de caudales instantáneos, y el de éstos sobre las comunidades riparias. El conocimiento científico y las nuevas herramientas generados en este proyecto permiten identificar los escenarios de operación que minimizan el impacto sobre el bosque ripario y maximizan la producción hidroeléctrica, así como las más efectivas estrategias de restauración de dicho ecosistema.

Esta comunicación presenta con detalle la herramienta informática desarrollada durante el proyecto RiPeak para el análisis de series largas de caudal y nivel medidas a cualquier escala temporal intra-diaria. También se discute, aunque de forma más sucinta, su utilidad en el desarrollo de modelos hydropeaking – impacto ecológico, esbozándose los resultados preliminares de la utilización de métricas del estado de las comunidades riparias.

MATERIAL Y MÉTODOS

Tanto la herramienta informática para la cuantificación del impacto hidrológico del hydropeaking como los modelos hydropeaking – impacto ecológico se están desarrollando en los tramos medio y bajo de los ríos Ume, afectado por varias centrales hidroeléctricas, y Vindel, natural, ambos en la provincia de Västebotten en Suecia (Figura 1).

InSTHAN: cuantificación del impacto hidrológico del hydropeaking

Se ha desarrollado la herramienta informática denominada InSTHAn (**In**dicators of **S**hort-**T**erm **H**ydrological **A**lteratio**n;** Figura 2) para facilitar el manejo de largas series de caudal (y nivel) instantáneo, la caracterización de las mismas, y la evaluación de su grado de alteración (p.ej.; por hydropeaking). La caracterización se basa en 35 indicadores hidrológicos de caracterización, denominados STCI (Short-Term Characterization Indicators), que proporcionan información sobre la magnitud, frecuencia, duración, tasa de cambio y momento de los eventos hidrológicos producidos a una escala temporal menor a la diaria y que constituyen el régimen de caudales (y niveles) instantáneo de un río. Dichos eventos hidrológicos se clasifican en eventos de subida, de bajada o de estabilidad, y se pueden analizar bien en base a los registros de forma independiente (R), como en base a períodos (P), es decir, a un conjunto de registros consecutivos con un mismo patrón de comportamiento. Todos los indicadores de caracterización influyen significativamente en diferentes procesos ecológicos fluviales, descritos en detalle en Bejarano et al., 2017. Para ríos sometidos a hydropeaking (o a cualquier otra actividad que ocasione una alteración hidrológica a escala intra-diaria), además InSTHAn permite cuantificar el impacto hidrológico en base 35 indicadores de impacto, denominados STII

(Short-Term Impact Indicators), calculados mediante comparación con un régimen de caudales instantáneos de referencia. El cálculo de indicadores hidrológicos de caracterización e impacto requiere de series de caudal (o nivel) instantáneos (p.ej.: horarios) procedentes de ríos con hydropeaking y de su correspondiente referencia. Los indicadores que InSTHAn calcula se detallan en la Tabla 1, y se describen en profundidad en Bejarano et al. (2017).

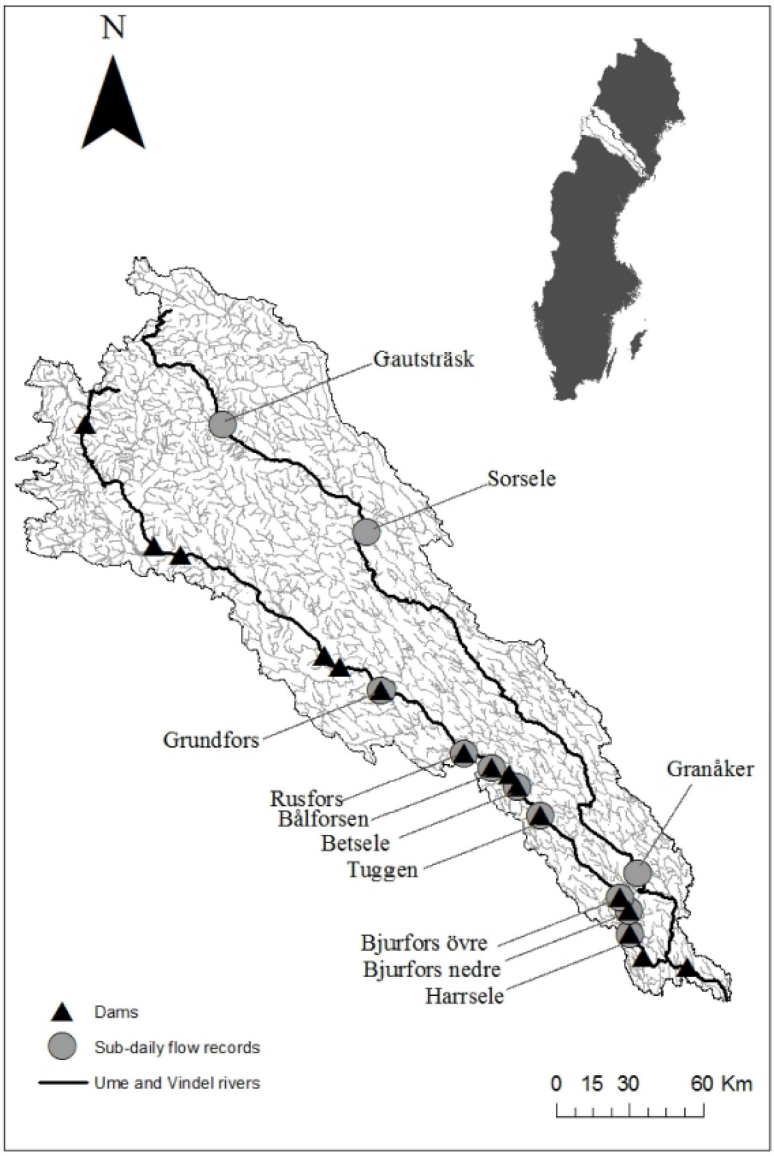

Figura 1 | Localización de la zona de estudio. Ríos Ume y Vindel (Cuenca del río Ume).

El trabajo en InSTHAn se organiza en Proyectos y Análisis (Figura 3). Un Proyecto consta de uno a varios Análisis. Un Análisis consiste en el cálculo de indicadores, tanto STCI como STII. La Serie de datos utilizada para los Análisis puede ser la original (Serie original) o bien previamente procesada por InSTHAn (Serie pre-procesada) mediante la modificación del intervalo entre registros o del periodo de cálculo. Cada Análisis de cálculo de indicadores de caracterización va ligado a una única Serie, mientras que un Análisis de cálculo de indicadores de impacto va ligado a dos Series, una alterada y su correspondiente comparable natural. Los resultados de los diferentes Análisis se almacenan por defecto en carpetas dentro del Proyecto en cuestión, una para caracterización y otra para impacto dependiendo de las métricas calculadas.

Tabla 1 | Short-Term Characterization Indicators (STCI) y Short-Term Impact Indicators (STII).

Indicador	Unidades	Grupo	Definición
TRH	h/día	Frecuencia	Total horas al día de subida
TFH	h/día	Frecuencia	Total horas al día de bajada
TSH	h/día	Frecuencia	Total horas al día de estabilidad
TCH	h/día	Frecuencia	Total horas al día de cambio
TMinH	h/día	Frecuencia	Total horas al día en el mínimo
TMaxH	h/día	Frecuencia	Total horas al día en el máximo
TMeanH	h/día	Frecuencia	Total horas al día igual o superio a la media
TRP	períodos/día	Frecuencia	Total períodos al día de subida
TFP	períodos/día	Frecuencia	Total períodos al día de bajada
TSP	períodos/día	Frecuencia	Total períodos al día de estabilidad
THR	reversals/día	Frecuencia	Total reversos horarios al día
TMinP	períodos/día	Frecuencia	Total períodos al día en el mínimo
TMaxP	períodos/día	Frecuencia	Total períodos al día en el máximo
TMeanP	períodos/día	Frecuencia	Total períodos al día en la media
DurRP	h/día	Duración	Duración media diaria períodos de subida
DurFP	h/día	Duración	Duración media diaria períodos de bajada
DurSP	h/día	Duración	Duración media diaria períodos de estabilidad
DurMinP	h/día	Duración	Duración media diaria períodos en el mínimo
DurMaxP	h/día	Duración	Duración media diaria períodos en el máximo
DurMeanP	h/día	Duración	Duración media diaria períodos en la media
StMean	uniteless	Magnitud	Media diario
StSD	sin unidades	Magnitud	Desviación estandar diaria
StAbsMin	sin unidades	Magnitud	Mínimo absoluto diario
StMeanMin	sin unidades	Magnitud	Mínimo medio diario
StAbsMax	sin unidades	Magnitud	Máximo absoluto diario
StMeanMax	sin unidades	Magnitud	Máximo medio diario
StAbsA	sin unidades	Magnitud	Amplitud absoluta diaria
StMeanA	sin unidades	Magnitud	Amplitud media diaria
StMeanSP	sin unidades	Magnitud	Media diaria de períodos de estabilidad
StAbsMinSP	sin unidades	Magnitud	Mínimo absoluto diario de períodos de estabilidad
StMeanMinSP	sin unidades	Magnitud	Mínimo medio diario de períodos de estabilidad
StAbsMaxSP	sin unidades	Magnitud	Máximo absoluto diario de períodos de estabilidad
StMeanMaxSP	sin unidades	Magnitud	Máximo medio diario de períodos de estabilidad
StMeanRR	sin unidades	Magnitud	Tasa horaria media de subida
StMeanFR	sin unidades	Magnitud	Tasa horaria media de bajada

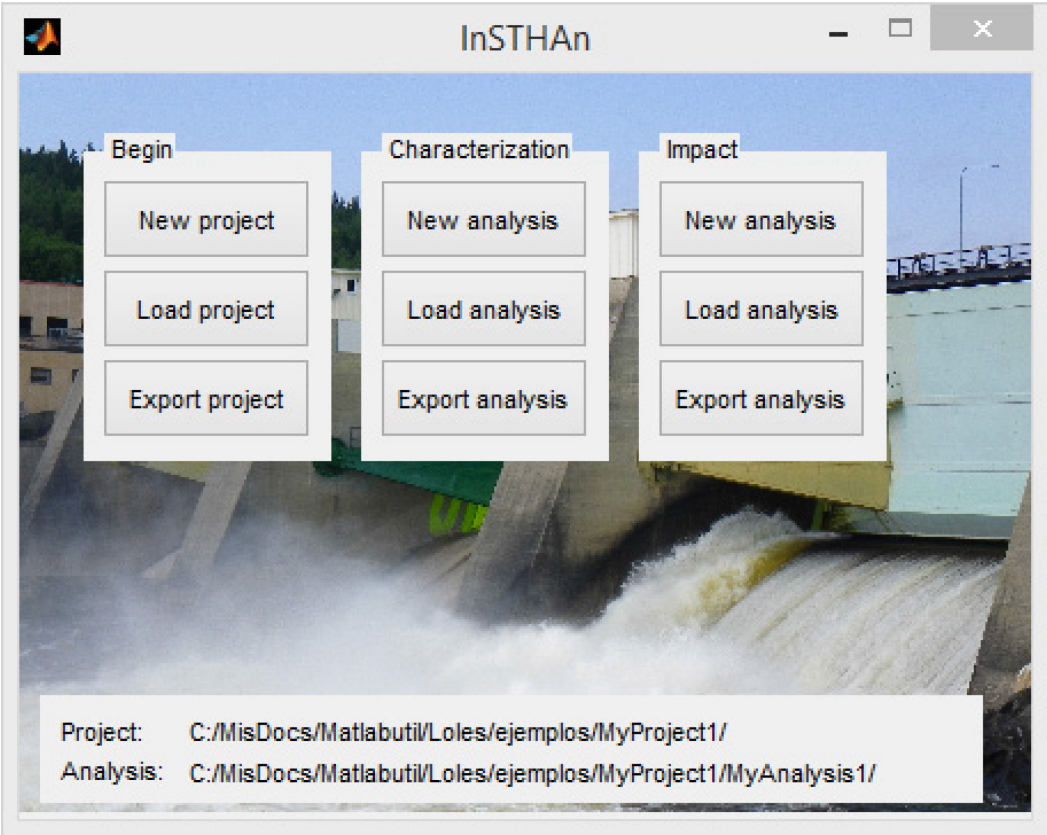

Figura 2 | Pantalla inicial de InSTHAn.

InSTHAn consta de tres módulos: Módulo 1, Manejo del Proyecto e Importación de Datos; Módulo 2, Caracterización; y Mödulo 3, Evaluación de Impacto. Las salidas de cada módulo pueden exportarse a tablas o ser visualizadas en gráficos. En el Módulo 1 se crea el Proyecto en el cual se van a guardar todos los Análisis y se importa la Serie original de datos en formato .txt o .xlsx. Además, se aporta la información básica sobre la Serie de datos importada, como fecha y hora de inicio y fin, el nombre de la variable a analizar y la columna donde está registrada (p.ej. caudal o nivel), el intervalo de tiempo de los registros, y el formato de celdas que no se desea considerar (p.ej. celdas vacías o con valores extraños). En el Módulo 2 se realizan los Análisis de Caracterización, que constan del pre-procesado de la Serie de datos y del cálculo de los STCI. El pre-procesado consiste en la identificación de la fecha y hora de inicio y fin del Análisis y el filtrado de los registros. El filtrado permite al usuario decidir cuándo dos registros consecutivos son considerados iguales (o diferentes) y por tanto es básico para la asignación de los patrones de subida, bajada y estabilidad a los registros (R) y períodos (P). A continuación se calculan los STCI. Para la Serie de *n* años, InSTHAn proporciona un valor para cada métrica de caracterización (i) para cada día (366 x *n* valores), y (ii) para cada día promedio (366 valores). En el Módulo 3 se realizan los Análisis de evaluación de Impacto, que consisten en el cálculo de los STII utilizando los STCI previamente obtenidos de una Serie alterada y una comparable natural, y almacenados en sus correspondientes carpetas. Del mismo modo que para los indicadores de caracterización, InSTHAn proporciona un valor para cada indicador de impacto (i) para cada día (366 x *n* valores), y (ii) para cada día promedio (366 valores).

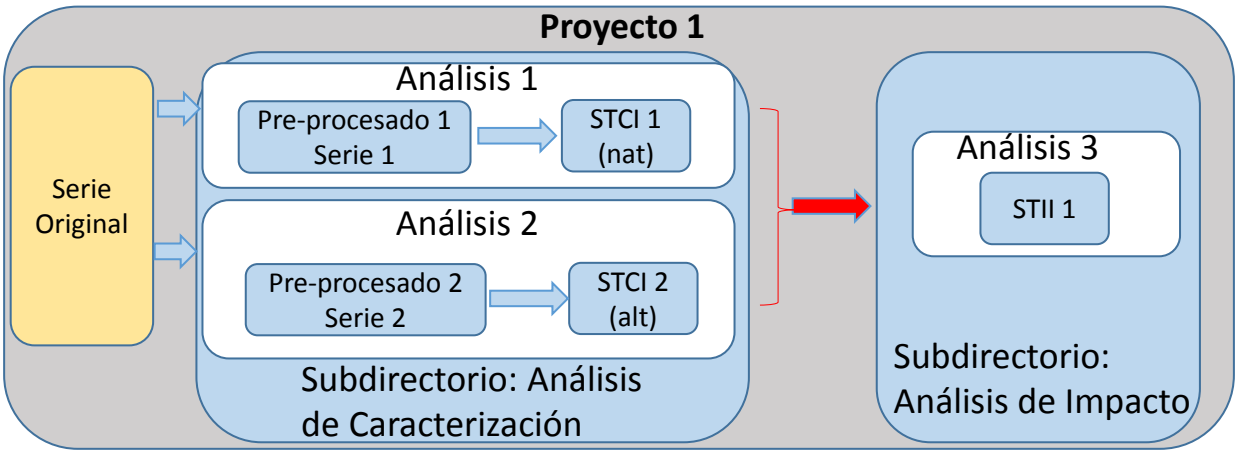

Figura 3 | Esquema conceptual de InSTHAn. Nat: natural; Alt: alterado

Cuantificación del impacto ecológico del hydropeaking

Con el fin de proporcionar al lector una idea de la utilidad última de InSTHAn, se describen aquí brevemente los modelos cuantitativos hydropeaking – impacto ecológico que se están desarrollando en el seno del proyecto RiPeak. En parcelas experimentales sometidas a diferentes grados de hydropeaking situadas a lo largo del río Ume en tramos afectados por las centrales hidroeléctricas de Bålforsen, Tuggen, Bjurfors Övre, y Harrsele, y no sometidas a regulación en tramo bajo del río Vindel denominado Granåker (Figura 1), se monitorearon durante una estación de crecimiento vegetal (Junio a Septiembre de 2015) variables hidrológicas y ecológicas. Por un lado se registraron los niveles de agua cada 15 minutos mediante sensores de presión (Rugged BaroTROLL 100 Data Logger, Amsele). Por otro lado se siguió la supervivencia, tasa de crecimiento de la raíz y del tallo, y producción de hojas de plántulas de 1 y 4 meses de edad de *Carex acuta*, una especie riparia boreal muy común, así como la germinación de sus semillas. Las plántulas fueron previamente crecidas en invernadero, y 4 réplicas de cada edad fueron trasplantadas en 4 niveles diferentes de la ribera en las parcelas experimentales. Un levantamiento topográfico de cada parcela ayudó a ubicar cada plántula con respecto al sensor de presión, de modo que los niveles de agua registrados por este fueron posteriormente referidos a cada plántula.

Con InSTHAn se calcularon los STCI y STII que caracterizaban cada ubicación de cada plántula, y éstas se relacionaron con los valores obtenidos de las mediciones biológicas anteriormente citadas de cada una de ellas, mediante modelos estadísticos de Máxima Verosimilitud (MLE) y Modelos Aditivos Generalizados (GAM). La combinación de indicadores hidrológicos STCI y STII a los que cada plántula estuvo sometida durante el período experimental se incluyó en los modelos, bien utilizando las primeras componentes obtenidas de un Análisis de Componentes Principales (PCA) con todos los indicadores, o bien utilizando una única variable cuantificadora del grado de alteración hidrológica por hydropeaking para cada plántula resultado de las Distancias Euclídeas de cada STCI en el río Ume con su respectivo indicador en el río Vindel.

RESULTADOS

En las Figuras 4, 5, 6 se presentan las diferentes pantallas de InSTHAn, tal y como se muestran al usuario cuando lleva a cabo un Análisis de Evaluación del Impacto del hydropeaking sobre una serie cualquiera de caudales horarios.

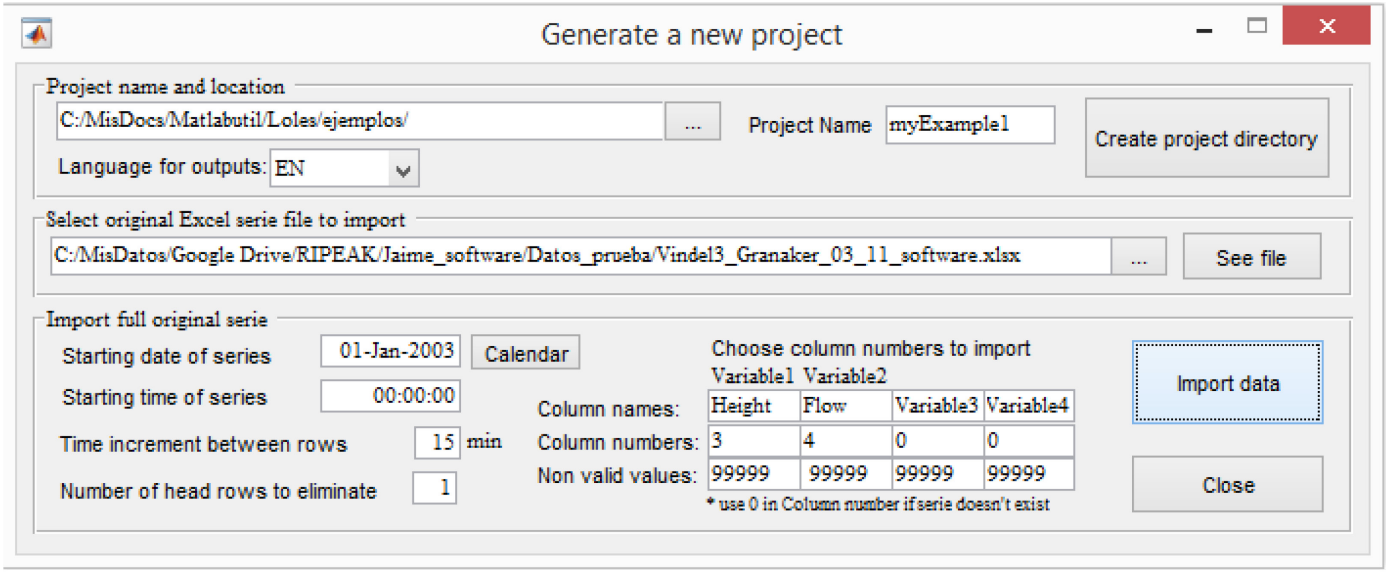

Figura 4 | Módulo 1, Manejo del Proyecto e Importación de Datos.

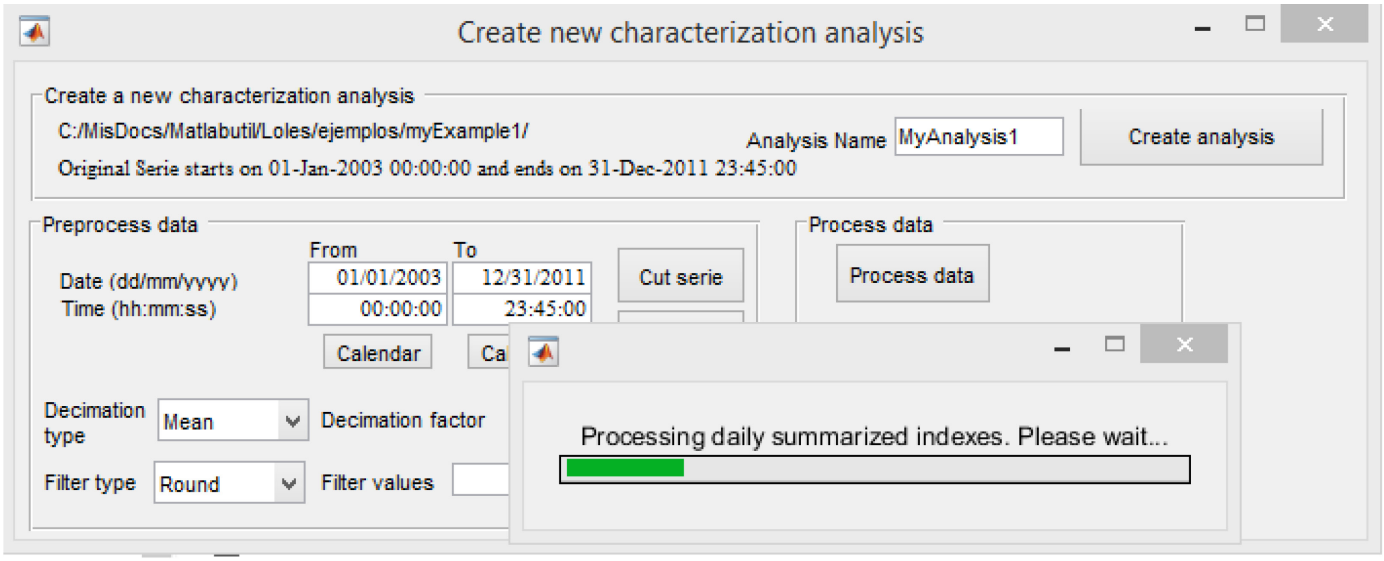

Figura 5 | Módulo 2, Caracterización.

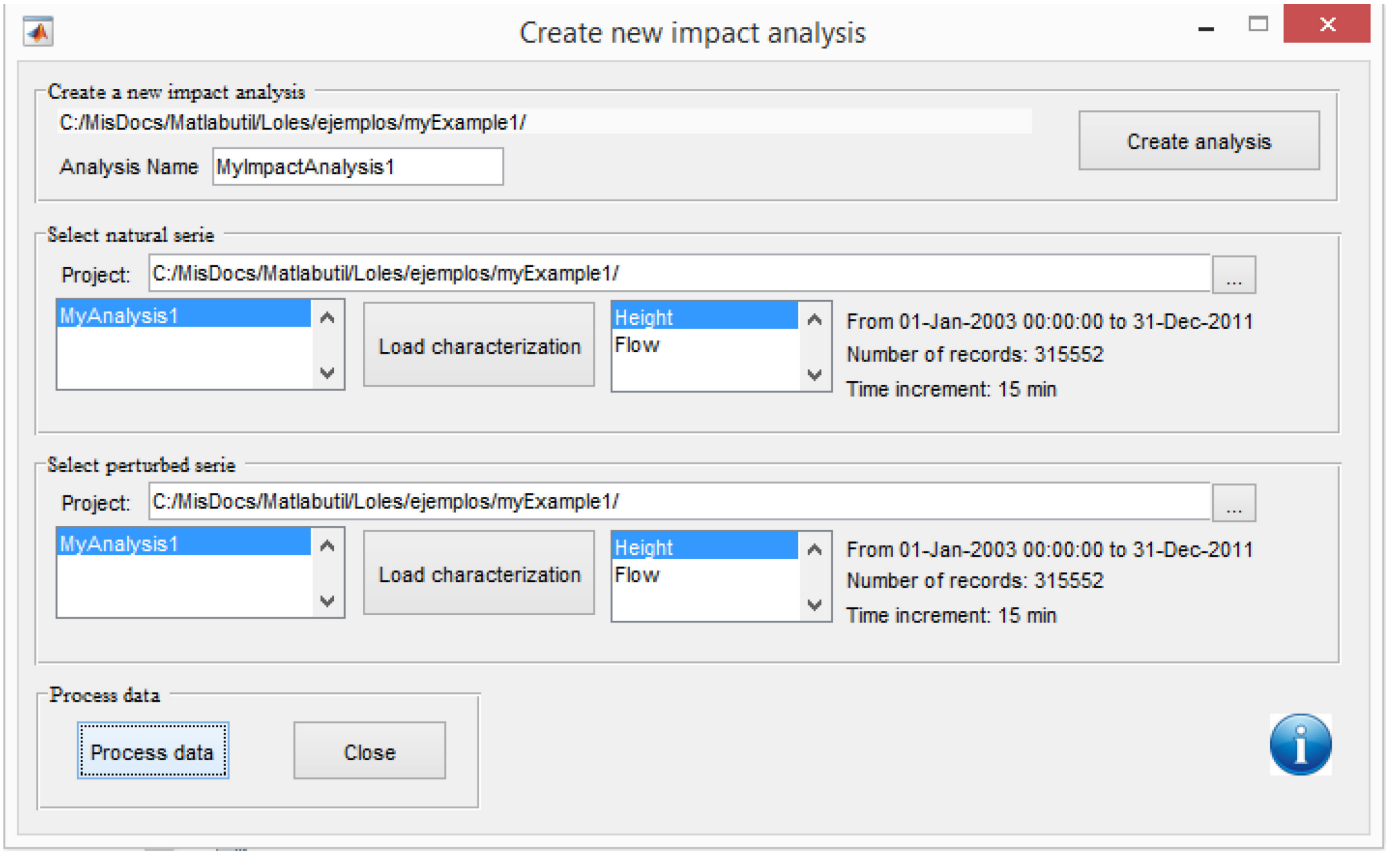

Figura 6 | Módulo 3, Evaluación de Impacto.

En la Figura 7 se presentan dos ejemplos de modelos cuantitativos hydropeaking – impacto ecológico. Se trata del resultado del Modelo Aditivo Generalizado (GAM) utilizando la Distancia Euclidea entre los STCI del río Ume y sus correspondientes en el río Vindel como variable indicadora del grado de alteración por hydropeaking (variable independiente) y el cambio en la longitud del tallo (Figura 6a) o el cambio en el número de hojas (Figura 6b) de las plántulas de 1 mes de edad de *Carex acuta* (variables dependientes suavizadas). En ambos casos se aprecia una respuesta no lineal significativa del crecimiento del tallo y producción de hojas ante la variación en el grado de hydropeaking. Para las plántulas de *Carex acuta* recién germinadas, los mayores incrementos en longitud del tallo y producción de hojas se produjeron en niveles intermedios de hydropeaking, mientras que las tasas de crecimiento del tallo y de producción de hojas fue significativamente menor en zonas de máximo hydropeaking o inalteradas.

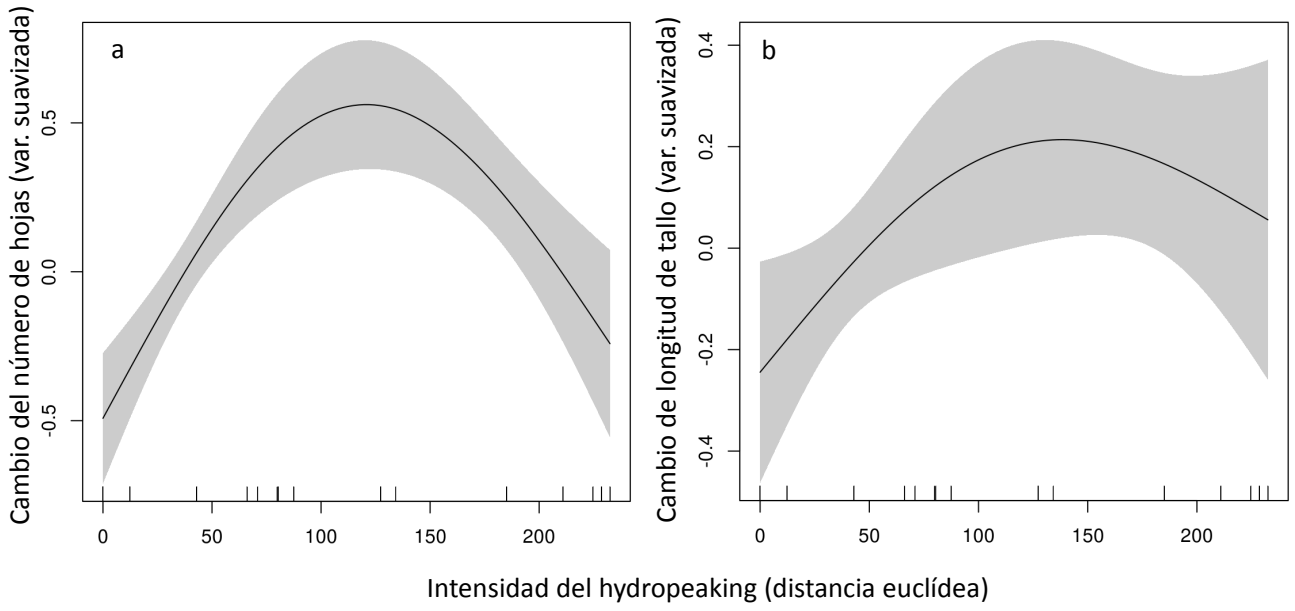

Figura 7 | GAM: Modelo Aditivo Generalizado. Relación entre el grado de hydopeaking medido como la distancia euclídea entre las características claves del régimen de caudales instantáneo derivado de distintos regímenes de operación (hydropeaking) y las características de un régimen de caudales instantáneo natural comparable (eje X), y dos características del ecosistema ripario: Cambio en el número de hojas (a) y en la longitud del tallo (b) para *Carex acuta* durante el período experimental (variables suavizadas; eje Y).

DISCUSIÓN

InSTHAn se ha aplicado de forma exitosa para la caracterización del régimen hidrológico intra-diario de varios tramos fluviales del río Ume influidos por presas de producción hidroeléctrica y un tramo fluvial natural en el río Vindel (Västerbotten, Suecia), así como para la evaluación del grado de alteración hidrológica por hydropeaking de los mismos (Bejarano et al., 2017). La herramienta ha permitido manejar 11 series de 9 años de caudales horarios (868.000 datos) y calcular 35 STCI y STII para cada serie. Los resultados pudieron ser interpretados de forma sencilla gracias a las diversas salidas gráficas. Se identificaron las características concretas del régimen instantáneo de caudales que son particularmente afectadas en cada caso y en qué grado, así como una gran variabilidad de la alteración de las mismas en función de la época del año, todo de acuerdo al modo de operación de cada central. Esta información, exclusivamente hidrológica, apoya la toma de decisiones sobre las mejores pautas de manejo de centrales hidroeléctricas, que garantice la conservación o restauración del ecosistema fluvial con las menores pérdidas de producción. Las rutinas de operación pueden ser adaptadas a cada caso concreto, en función de los parámetros hidrológicos que se deseen conservar al ser clave para según qué proceso ecológico o especie, y también a cada momento del año. Hasta donde los autores conocen, en la actualidad InSTHAn es la única herramienta capaz de caracterizar y evaluar regímenes hidrológicos a escalas temporales intra-diarias. Trabajos como los de Sauterleute and Charmasson (2014) o Haas et al., (2014), no son suficientemente completos, debido al número limitado de parámetros que calculan y a su imposibilidad de evaluar el grado de alteración hidrológica.

El conocimiento de cómo y cuánto el régimen hidrológico intra-diario de caudales (o niveles) afecta a la germinación, desarrollo, estado de salud y supervivencia de especies riparias es esencial para evaluar el impacto ecológico de la producción hidroeléctrica asociado al hydropeaking. Los ensayos experimentales que se están desarrollando en el proyecto RiPeak están proporcionando esta información, hasta ahora inexistente, sobre especies herbáceas y leñosas de zonas riparias boreales (Bejarano et al., 2016). La información obtenida en InSTHAn y la procedente de los ensayos experimentales con especies riparias, nutre los modelos cuantitativos hydropeaking – impacto ecológico que deberían subyacer cualquier toma de decisión con respecto al manejo sostenible de una central hidroeléctrica (Bejarano et al., 2017). Estos modelos permiten encontrar la

opción de manejo que maximiza la producción hidroeléctrica al mismo tiempo que minimiza los impactos sobre el ecosistema fluvial.

Dado que el ecosistema fluvial es complejo y son muchos sus componentes y procesos, es esencial seguir investigando las consecuencias de cambios en el régimen instantáneo de caudales (y niveles) sobre el mayor número de ellos. Si bien los estudios sobre especies concretas en lugares concretos son de gran utilidad para las especies y casos en los que se han desarrollado, es necesario llevar a cabo también estudios cuyos resultados puedan ser extrapolados a otras regiones. El uso de grupos funcionales es una alternativa ideal para estos casos, y constituye aún un reto en este campo (Merrit et al., 2010; Bejarano et al., 2017).

CONCLUSIONES

InSTHAn permite (i) resumir las series de datos en un conjunto de métricas con importancia ecológica (caracterización); (ii) describir y cuantificar la desviación de cada serie del estado inalterado (evaluación de impacto); y (iii) visualizar ambos, caracterización e impacto, gráficamente. Esta herramienta informática responde a las necesidades del mundo real en los campos de la ciencia y la tecnología, y en última instancia de la sociedad. Por un lado, al facilitar el manejo de series de caudal y nivel largas, promueve el desarrollo de estudios científicos sobre la variabilidad a escalas temporales cortas de los ríos -naturales y alterados por las acciones antropogénicas- y los procesos ecológicos que las subyacen. Por otro, al proporcionar información completa y objetiva sobre series de caudal y nivel intra-diarias, y en combinación con la información ecológica adecuada, ayuda a resolver conflictos entre los diferentes usuarios del ecosistema fluvial, permitiendo su gestión integrada y sostenible. Es particularmente útil en el manejo de los ríos utilizados para la producción de energía hidroeléctrica, ya que ayuda a alcanzar el objetivo prioritario de maximizar la producción de hidroelectricidad al mínimo coste ambiental. Esperamos que este artículo ayude a comunicar la utilidad del software y su potencialidad a una amplia audiencia científica y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Agencia Meteorológica Sueca (SMHI), de las centrales hidroeléctricas Statkraft Sverige AB, Vattenfall AB, E.ON Vattenkraft Sverige AB, Vattenfall Vattenkraft AB y Vattenfall Umeälven AB, por proporcionar los datos hidrológicos. Agradecemos a las Acciones EU-FP7- PEOPLE Marie Curie IEF, por financiar el Proyecto número 623691, RiPeak: “Responses of RiParian forests to hydroPeaking: towards a sustainable hydropower management”; http://cordis.europa.eu/project/rcn/187789_es.html). Finalmente, agradecemos los fondos de la Fundación José Entrecanales Ibarra del programa “Ayudas de Movilidad de Profesores Jóvenes”.

REFERENCIAS

Bejarano, M.D., Nilsson, C., Aguiar, F. C. 2017. Riparian plant guilds become simpler and most likely fewer following flow regulation. *Journal of Applied Ecology*. 04/2017. DOI: 10.1111/1365-26, 05/06/2017

Bejarano, M.D., Sordo-Ward, A., Alonso, C., Nilsson, C. 2017. Characterizing effects of hydropower plants on sub-daily flow regimes. *Journal of Hydrology* 550, 186-200.

Bejarano, M.D.; Jansson, R.; Nilsson, C. In press. The effects of hydropeaking on riverine plants: a review. *Biological Reviews*, in press.

Bejarano, M.D; Fredriksson, E.; Jansson, R.; Nilsson, C. 2016. Restoration of riparian vegetation along rivers used for hydropower production. *Proceedings of the 10th SER Conference on Ecological Restoration 2016: Best practice in Restoration*, August 21-26, Freising, Germany.

Boavida, I., Santos, J.M., Ferreira, T., Pinheiro, A. 2015. Barbel habitat alterations due to hydropeaking. *Journal of Hydro-environmental Research* 9, 237–247.

Bruno, M.C., Cashman, M.J., Maiolini, B., Biffi, S., Zolezzi, G. 2016. Responses of benthic invertebrates to repeated hydropeaking in semi-natural flume simulations. *Ecohydrology* 9, 68–82.

Finch, C., Pine, W. E., Limburg, K. E. 2015. Do hydropeaking flows alter juvenile fish growth rates? A test with juvenile humpback chub in the Colorado River. *River Research and Applications* 31(2), 156-164.

Freeman, M.C., Bowen, Z.H., Bovee, K.D., Irwin, E.R. 2001. Flow and habitat effects on juvenile fish abundance in natural and altered flow regimes. *Ecological Applications* 11(1), 179-190.

Gorla, L., Signarbieux, C., Turberg, P., Buttler, A., Perona, P. 2015. Transient response of Salix cuttings to changing water level regimes. *Water Resources Research* 51, 1758–1774.

Haas, N.A., O'Connor, B.L., Hayse, J.W., Bevelhimer, M.S., Endreny, T.A. 2014. Analysis of daily peaking and run-of-river operations with flow variability metrics, considering subdaily to seasonal time scales. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 50(6), 1622-1640.

Hynes, H.B.N. 1970. The ecology of running waters. University of Toronto Press, Toronto, Canada.

Jackson, D.C., Brown, A.V., Davies W.D. 1991. Zooplankton transport and diel drift in the Jordan dam tailwater during a minimum flow regime. *Rivers* 2, 190–197.

Merritt, D.M., Scott, M.L., Poff, N.L., Auble, G.T., Lytle, D.A. 2010. Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: riparian vegetation-flow response guilds. *Freshwater Biology* 55(1), 206-225.

Nagrodski, A., Raby, G.D., Hasler, C.T., Taylor, M.K., Cooke, S.J. 2012. Fish stranding in freshwater systems: sources, consequences, and mitigation. *Journal of Environmental Management* 103, 133–141.

Poff, N.L., Richter, B.D., Arthington, A.H., Bunn, S.E., Naiman, R.J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B.P., Freeman, M., Henriksen, J., Jacobson, R.B., Kennen, J., Merritt, D.M., O'Keeffe, J., Olden, J.D., Rogers, K., Tharme, R.E., Warner, A. 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology* 55, 147–170.

Sauterleute, J.F., Charmasson, J. 2014. A computational tool for the characterisation of rapid fluctuations in flow and stage in rivers caused by hydropeaking. *Environmental Modelling & Software* 55, 266-278.

Vollset, K.W., Skoglund, H., Wiers, T., Barlaup, B.T. 2016. Effects of hydropeaking on the spawning behavior of Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*. *Journal of fish biology* 88(6), 2236-2250.