



UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES

“Desarrollo de una metodología para predecir cambios morfológicos en ríos de lechos no cohesivos basado en la variabilidad espacial del stream power”

JOSEFINA MARÍA BARROS VALENZUELA

2020



UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES

“Desarrollo de una metodología para predecir cambios morfológicos en ríos de lechos no cohesivos basado en la variabilidad espacial del stream power”

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Profesor Guía : Dr. Angel Darío Monsalve Sepúlveda

Profesor Co-guía : Dr. Andrew Tranmer

JOSEFINA MARÍA BARROS VALENZUELA

2020

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA PREDECIR CAMBIOS
MORFOLÓGICOS EN RÍOS DE LECHOS NO COHESIVOS BASADO EN LA
VARIABILIDAD ESPACIAL DEL STREAM POWER**

JOSEFINA MARÍA BARROS VALENZUELA

COMISIÓN EXAMINADORA

ANGEL MONSALVE

Profesor Guía

ANDREW TRANMER

Profesor Co-guía

MAXIMILIANO LIZANA

Académico Evaluador

Calificación trabajo escrito :

Calificación examen :

Calificación final :

Resumen

El presente documento expone el proyecto de titulación que lleva por nombre “Desarrollo de una metodología para predecir cambios morfológicos en ríos de lechos no cohesivos basado en la variabilidad espacial del *stream power*”, para optar al título de Ingeniero Civil.

Comprender las características de los procesos de estabilidad de los cuerpos fluviales es de gran interés para la ingeniería, ciencia y el bienestar en general. Dependiendo de las características de flujo y el sedimento que conforma el fondo, un río se puede encontrar en estado activo, es decir, su lecho está siendo movilizado por las fuerzas que ejerce el flujo y es capaz de sufrir procesos de erosión o sedimentación. Estos cambios afectan la dinámica y el comportamiento de un cuerpo fluvial, por lo que es imprescindible tener una herramienta que permita cuantificar y predecir la ocurrencia de estos fenómenos y así minimizar los problemas que pueden causar. El *stream power* es la tasa de disipación de energía por unidad de largo de un río, consecuentemente es una medida de fuerza de impulso que actúa en el lecho y determina la capacidad del río para transportar sedimentos y realizar cambios morfológicos. En la literatura especializada se encuentran casos que relacionan el *stream power*, en particular su gradiente, con procesos de erosión y sedimentación. Sin embargo, estos se suelen basar en modelos simplificados de flujo y por lo tanto no consideran características propias del flujo como el cambio de dirección. En este estudio se analiza la variabilidad espacial del *stream power* en base a modelos de flujo más avanzados. Usando mediciones realizadas en el río Boise, ubicado en Idaho, Estados Unidos, se desarrolla una metodología para identificar sitios propensos a sufrir alteraciones. El método se basa en la cuantificación del gradiente de *stream power* y se asocia como variable predictora de zonas con alto potencial de cambios morfológicos. Si el gradiente es positivo, entonces predomina el proceso de erosión, en caso contrario, predomina la sedimentación. En primer lugar, se desarrolla un modelo unidimensional del río para una extensión de 77 km. Luego, se extiende este análisis a un modelo bidimensional de flujo, de modo de incluir explícitamente los cambios de dirección. De acuerdo al análisis se observa que el gradiente de *stream power* fluctúa entre -50.34 kg/m s^3 y 404.05 kg/m s^3 . En base a estos resultados se propone un total de 33 secciones transversales y 29 tramos de río como zonas propensas a sufrir cambios morfológicos, las cuales se espera sean estudiadas en un futuro frente a posibles eventos críticos con el fin de verificar la metodología.

Índice de contenidos

	Página
Capítulo 1. Introducción	2
1.1. Descripción general del problema	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
Capítulo 2. Antecedentes generales	6
2.1. Fundamentos teóricos	6
2.1.1. Stream power	6
2.2. Zona de estudio	8
2.3. Datos base	10
2.3.1. Modelos unidimensionales HEC-RAS	10
2.3.2. Modelo bidimensional HEC-RAS	10
2.3.3. Planillas	10
Capítulo 3. Metodología	12
3.1. Modelación unidimensional	12
3.1.1. Software: HEC-RAS	12
3.1.2. Actividades realizadas	12
3.2. Modelación bidimensional	16
3.2.1. Software: Iber	16
3.2.2. Actividades realizadas	16
Capítulo 4. Resultados y discusión	20
4.1. Modelación unidimensional	20
4.2. Modelación bidimensional	23
4.3. Áreas propuestas para posterior estudio	29
Capítulo 5. Conclusiones	32
Nomenclatura	33
Bibliografía	34

Índice de tablas

Página

Tabla 4.1. Secciones propensas a sufrir cambios morfológicos, propuestas como áreas de estudio. Proyección: NAD83 StatePlane Idaho West FIPS 1103 Feet.	22
---	----

Índice de figuras

	Página
Figura 2.1. Representación gráfica de celdas con información de variables hidráulicas en las direcciones X e Y.	8
Figura 2.2. Río Boise e intervalo de estudio.	9
Figura 3.1. Zona modelada en <i>software</i> HEC-RAS con secciones transversales correspondientes a cada condado.	13
Figura 3.2. Gráfico del porcentaje de error de profundidad del agua en secciones transversales una vez calibrado el modelo. La línea de tendencia se calculó con aproximación lineal.	14
Figura 3.3. Ejemplo de variación geométrica de la sección transversal 1.564748 correspondiente al tramo “ <i>Lower</i> ” entre los años 2017 y 2003.	15
Figura 3.4. Zona modelada con el <i>software</i> Iber.	17
Figura 4.1. Resultados del gradiente longitudinal de <i>stream power</i> en secciones transversales del río Boise, sin considerar las secciones con valores comprendidos entre -2 y 2 [kg/m s ³].	20
Figura 4.2. Secciones transversales situadas en zona de estudio para modelación 2D, con resultados del gradiente longitudinal de <i>stream power</i> en secciones, sin considerar los valores comprendidos entre -2 y 2 [kg/m s ³].	21
Figura 4.3. Profundidad en [m] obtenida al finalizar la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 10 [m].	24
Figura 4.4. Profundidad en [m] obtenida al finalizar la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 5 [m].	25
Figura 4.5. Profundidad en [m] obtenida al finalizar la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 2.5 [m].	25
Figura 4.6. <i>Stream power</i> por longitud unitaria en [kg m ² /s ³] en dirección X, calculado a partir de la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 2.5 [m].	26
Figura 4.7. <i>Stream power</i> por longitud unitaria en [kg m ² /s ³] en dirección Y, calculado a partir de la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 2.5 [m].	27
Figura 4.8. Gradiente de <i>stream power</i> en [kg m/s ³] en dirección X con puntos máximos y mínimos.	28
Figura 4.9. Gradiente de <i>stream power</i> en [kg m/s ³] en dirección Y con puntos máximos y mínimos.	28
Figura 4.10. Sección del río Boise modelada bidimensionalmente con puntos en los cuales se obtuvieron los máximos gradientes de <i>stream power</i> a partir de modelaciones 1D y 2D.	29
Figura 4.11. Tramos del río Boise propuestos para posterior análisis, los tramos se representan en color cian.	30

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. Introducción

1.1. Descripción general del problema

Los ríos son de suma importancia para nuestro planeta. Proporcionan acceso al agua para los seres vivos, vías de acceso a las ciudades, grava para el uso en mezclas de hormigón y además es el hábitat de innumerables formas de vida. También los ríos ofrecen un agradable paisaje, por lo que hay personas que construyen sus casas a la orilla de éstos, sin medir los posibles peligros a los cuales se exponen, como por ejemplo inundaciones o socavación de la base. Por estos motivos el estudio y protección de los cuerpos fluviales es de gran interés para la ingeniería, ciencia y el bienestar en general. Una variable que poco se considera en los estudios es la estabilidad de un río. Por lo general se asume, en ingeniería, que un río es un cuerpo estático que se mantiene en su lugar por un periodo suficientemente largo, sin embargo, la realidad es muy distinta. Por ejemplo, Martín-Vide (2013) estudio el río Piura, ubicado en la costa norte de Perú, que ha tenido grandes cambios en planta y el fondo del río descendió dos metros durante el fenómeno El Niño, perdiendo dos puentes en la ciudad. Por otro lado, los perfiles longitudinales del río entre los años 1979 y 2000 muestran cambios de pendiente de 0.038% a 0.024%, lo cual altera su comportamiento. Tal acontecimiento se debe a que los cauces de los ríos se mueven y transforman, aunque sea de manera lenta, soltando o capturando sólidos y también transportándolos, alterando así sus propiedades como anchura, profundidad, pendiente y sinuosidad. Estos cambios generan incertidumbre al momento de la implantación de una obra en el lugar o proximidades de un río.

Dependiendo del caudal que lleven los ríos, éstos pueden estar en estado activo o inactivo. Un río es activo cuando su lecho está siendo movilizado por las fuerzas que ejerce el flujo, en caso contrario el río es inactivo. Bajo la condición de activo los ríos pueden sufrir cambios, tales como, erosión en riberas, socavación del lecho, formación de barras, etc. Es de vital importancia tener una herramienta que permita cuantificar y predecir que sucedan estos cambios ya que su ocurrencia puede causar problemas. Por ejemplo, un río puede cambiar su recorrido establecido, y es de sumo interés tener conocimiento de ello, ya que se debe considerar para la planificación urbana de las ciudades u obras hidráulicas.

En lo expuesto anteriormente radica la motivación a realizar el trabajo de investigación. El fin es desarrollar una metodología que pueda predecir cambios morfológicos en los lechos de los ríos y de esta manera poder anticipar y tomar las medidas necesarias ante posibles eventos críticos,

evitando problemas que afecten a los habitantes. Adicionalmente, tener una herramienta que permita la predicción de regiones propensas a sufrir cambios morfológicos como resultado de las inundaciones es importante para considerar en la gestión y política ambiental y en el diseño de proyectos donde exista este tipo de riesgos (Yochum *et al.*, 2017).

Una forma de identificar lugares propensos a sufrir cambios es a través del estudio y análisis del *stream power* a lo largo de un río. El *stream power* es una medida de fuerza de impulso que actúa en el río y determina la capacidad de éste para transportar sedimentos y realizar cambios morfológicos, definiendo su límite de estabilidad (Bizzi y Lerner, 2015). Se esperaría que al existir gradientes de fuerza actuando sobre un río se produzcan cambios morfológicos, como erosión o sedimentación. La versatilidad del uso del *stream power* en estudios geomorfológicos ha sido reportada en la literatura especializada. Por ejemplo, Bizzi y Lerner (2015) estudiaron los ríos ingleses Lune y Wye, con lechos de grava. Investigaron el *stream power* en distintas ubicaciones estudiando en forma conjunta la información del *stream power* local y aguas arriba. El fin era comprobar la idoneidad de la medida para identificar procesos dominantes de erosión y sedimentación. En este caso se observaron patrones concordantes con la literatura, como el umbral del *stream power* unitario para identificar procesos de erosión. Por otra parte, Yochum *et al.* (2017) analizaron cuatro ríos en Colorado y Vermont, Estados Unidos, dado que durante las inundaciones se produjeron cambios morfológicos espacialmente no uniformes. Estudiaron el gradiente de *stream power* total y local, mostrando información crítica para predecir tramos de río susceptibles a estos procesos de cambios durante grandes eventos. Se observó que los aumentos del *stream power* aguas abajo coinciden con procesos de erosión, y la disminución del *stream power* aguas abajo coincide con procesos de sedimentación en las llanuras de inundación.

En consideración a lo expuesto anteriormente, el proyecto de título consiste en desarrollar una metodología para predecir cambios morfológicos en ríos de lechos no cohesivos basado en la variabilidad espacial del *stream power*. Para lograr los objetivos se realizarán modelaciones hidráulicas unidimensionales y bidimensionales en un río que constantemente sufre cambios morfológicos. A partir de estos modelos se puede determinar la variabilidad espacial del *stream power* y por lo tanto evaluar su divergencia en direcciones X e Y. Las zonas que muestren cambios abruptos, eventualmente indicarían zonas propensas a manifestar alteraciones.

El estudio se aplica al río Boise, ubicado en Idaho, Estados Unidos, donde se produjeron recientes inundaciones, contándose con información y datos necesarios para el desarrollo del proyecto y

modelación. Se espera que la metodología pueda ser a futuro validada y utilizada en diversos ríos que cuenten con lechos no cohesivos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar una metodología para predecir cambios morfológicos en ríos de lechos no cohesivos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Modelar de forma unidimensional y bidimensional el río Boise, Estados Unidos, a partir de la recopilación de información y medición de datos en terreno.
- Cuantificar la variabilidad espacial del *stream power* de acuerdo a los modelos desarrollados.
- Identificar zonas propensas a sufrir cambios morfológicos.
- Sugerir áreas que debiesen ser medidas para una posterior verificación de la metodología.

CAPÍTULO 2
ANTECEDENTES GENERALES

Capítulo 2. Antecedentes generales

2.1. Fundamentos teóricos

2.1.1. Stream power

El *stream power* es una medida principal de fuerza de impulso que actúa en el canal determinando la capacidad del río para transportar sedimentos y realizar cambios morfológicos inducidos por inundación. Las medidas del *stream power* total y unitario permiten la identificación de procesos de erosión, transporte y sedimentación, pudiendo establecerse el límite de estabilidad del canal (Bizzi y Lerner, 2015). Es probable que sea dominante el proceso de sedimentación cuando el valor del *stream power* local sea considerablemente menor al valor del *stream power* aguas arriba, en el caso contrario, el proceso de erosión será el dominante (Gartner *et al.*, 2015).

Los recientes modelos matemáticos permiten el cálculo del gradiente de las variables hidráulicas dentro de un canal dado, posibilitando así la estimación del *stream power*. Su definición más fundamental se considera la tasa de gasto de energía por unidad de longitud del río (Brookes, 1987). La medida está determinada por el caudal y por la pendiente, utilizada para estimar el gradiente de energía. El *stream power* total por unidad de longitud se calcula según la *ecuación (2.1)*.

$$\Omega_T = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S_e \quad (2.1)$$

Donde :

- Ω_T : Stream power total [kg m/s³]
- ρ : Densidad del agua [kg/m³]
- g : Aceleración de gravedad [m/s²]
- Q : Caudal [m³/s]
- S_e : Pendiente de energía [m/m]

Algunos modelos calculan el *stream power* unitario en vez del total, como es el caso del *software* HEC-RAS utilizado para la modelación del río. El *stream power* unitario es el *stream power* total por unidad de ancho, eliminándose el efecto de escala para distintas corrientes (Brookes, 1987). Esta medida unitaria es aplicable para el análisis unidimensional del *stream power* en el río en las secciones transversales estudiadas, y se calcula según la *ecuación (2.2)*.

$$\Omega_U = \frac{\Omega_T}{b} \quad (2.2)$$

Donde :

- Ω_U : Stream power unitario [kg/s^3]
- b : Ancho del canal [m]

Basado en lo anteriormente expuesto sería posible evaluar la divergencia del *stream power* unitario y por lo tanto determinar las zonas que son propensas a erosión y/o sedimentación en un río. El gradiente de *stream power* se calcula según la ecuación (2.3).

$$\Delta\Omega_U = \frac{\partial\Omega_U}{\partial x} \cong \frac{\Omega_{UL} - \Omega_{UA}}{L} \quad (2.3)$$

Donde :

- $\Delta\Omega_U$: Gradiente de stream power unitario [kg/m s^3]
- Ω_{UL} : Stream power unitario local [kg/s^3]
- Ω_{UA} : Stream power unitario aguas arriba [kg/s^3]
- ∂x : Distancia infinitesimal entre dos puntos de interés [m]
- L : Distancia entre secciones [m]

Para el caso de la modelación bidimensional realizada con el *software* Iber, no se pueden utilizar las ecuaciones de *stream power* expuestas anteriormente, dado que los resultados exportados del modelo están asignados a celdas. Por otro lado, las medidas de caudal y velocidad se obtienen como vectores, es decir, con dirección y sentido (Figura 2.1).

$$\Omega = \left(h_2 \cdot g + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + z_2 \cdot g \right) \cdot \rho \cdot Q_2 - \left(h_1 \cdot g + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + z_1 \cdot g \right) \cdot \rho \cdot Q_1 \quad (2.4)$$

Donde :

- Ω : Stream power [$\text{kg m}^2/\text{s}^3$]
- h : Profundidad [m]
- v : Velocidad [m/s]
- z : Elevación del lecho [m]

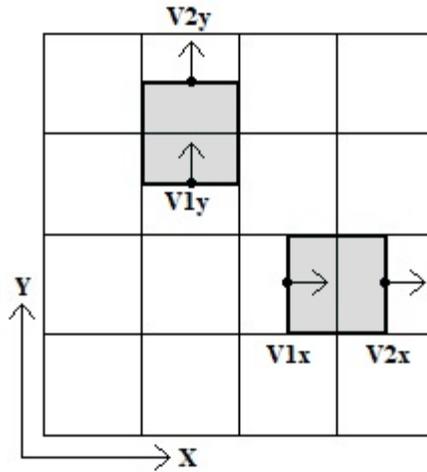


Figura 2.1. Representación gráfica de celdas con información de variables hidráulicas en las direcciones X e Y.

Cada celda tiene asociada un valor de profundidad, elevación del agua, velocidad en X, velocidad en Y, caudal en X y caudal en Y. Para el cálculo del *stream power* se utilizó la definición de esta medida como la variación de la energía entre celdas para lo cual se propuso una expresión a partir de la ecuación de Bernoulli. El *stream power* para el caso bidimensional se calcula según la ecuación (2.4) entre celdas consecutivas para ambas direcciones.

Por último, el gradiente de *stream power* se calcula según la ecuación (2.5), entre celdas consecutivas, con i número de columnas al analizar la variación del *stream power* en dirección X, e i número de filas para el caso en dirección Y.

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega_i - \Omega_{i-1}}{\Delta L} \quad (2.5)$$

Donde :

- $\Delta\Omega$: Gradiente de stream power [kg m/s^3]
- i : Numero de filas o columnas según el caso
- ΔL : Distancia entre celdas [m]

2.2. Zona de estudio

El río Boise se emplaza en el estado de Idaho, Estados Unidos. Fluye en dirección noroeste desde su origen en la presa Lucky Peak en la ciudad de Boise, hasta su confluencia con el río Snake en la

ciudad de Parma (Figura 2.2). La cuenca abarca 3300 km² de pastizales, bosques, tierras agrícolas y áreas urbanas, y la longitud total del río es de 100 km aproximadamente (IDEQ, 2001). Las inundaciones han disminuido desde la construcción de tres represas en la parte superior de la cuenca, aguas arriba del río Boise. Sin embargo, todavía producen inundaciones por la liberación de las represas en condiciones de embalse completo o por la escorrentía de aguas superficiales de cuencas tributarias.

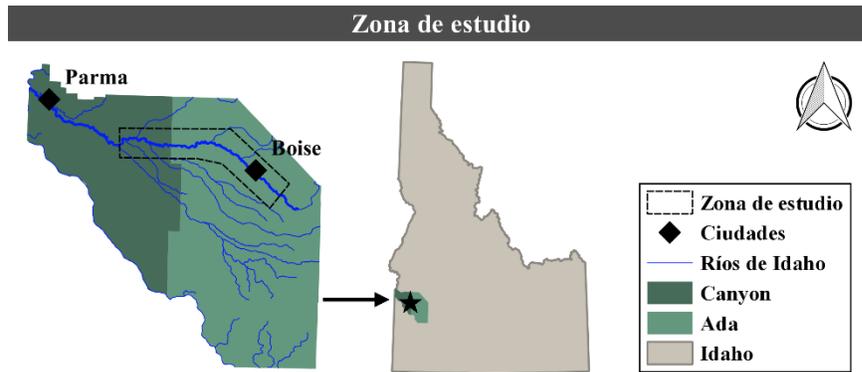


Figura 2.2. Río Boise e intervalo de estudio.

El río es generalmente sinuoso y forma una gran cantidad de islas, con llanuras de inundación amplias y activas. El lecho y orillas del río están compuestos principalmente por cantos rodados en tramos aguas arriba, y sedimentos de gravas en tramos aguas abajo (Richardson y Guilinger, 2015). El estudio se centra en un segmento del río Boise con longitud aproximada de 77 km, comprendido entre las coordenadas 43°33'39'' N latitud, 116°07'23'' O longitud y 43°40'47'' N latitud, 116°41'23'' O longitud. Desde el año 2000 el río ha sufrido cambios morfológicos significativos, ha erosionado algunos lugares entre 15 y 20 metros. En las inmediaciones del río Boise se produjeron inundaciones de las cuales fue posible obtener mediciones e información, contándose con un completo set de datos que hace posible el desarrollo de la metodología propuesta, razón por la cual se escogió para el trabajo de título.

2.3. Datos base

En primer lugar, se realizó la recopilación de datos e información necesaria para el posterior desarrollo del proyecto de titulación y modelación del río. La calidad y coherencia de los datos e información reunida fueron verificadas para tener certeza de que no existieran errores.

Las fuentes de datos fueron variadas, entre las que destacan los modelos unidimensionales y bidimensional del río Boise, desarrollados con el *software* HEC-RAS.

2.3.1. Modelos unidimensionales HEC-RAS

Existen dos modelos HEC-RAS 1D del río Boise por separado, uno corresponde al condado de Ada con datos del año 1999, y el otro corresponde al condado de Canyon con datos del año 2003. En total los modelos corresponden a 77 km de río y cuentan con 450 secciones transversales aproximadamente, ambos modelos no calibrados. Los modelos incluyen la geometría de las secciones transversales y los valores de coeficiente de rugosidad para para cada una de ellas, al igual que la distancia entre secciones consecutivas.

2.3.2. Modelo bidimensional HEC-RAS

El modelo HEC-RAS 2D corresponde a un tramo del río Boise más acotado que el modelado unidimensionalmente, el cual incluye el modelo de elevación digital del terreno (DEM) y los valores de coeficiente de rugosidad para cada sector específico.

2.3.3. Planillas

El año 2017 hubo una inundación que reorganizó la morfología del río a través de procesos de erosión y redistribución de barras. Por lo cual existen secciones transversales que se volvieron a estudiar posterior al evento. También se midieron las elevaciones de agua en la superficie durante la condición de inundación para un caudal determinado. Los datos obtenidos de planillas son:

- Caudal de inundación.
- Distribución de caudal en bifurcaciones del río.
- Elevaciones de agua en la superficie.
- Geometría de nuevas secciones transversales.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Capítulo 3. Metodología

En primer lugar, se llevó a cabo la recopilación de datos e información necesaria para desarrollar los modelos contemplados en este trabajo de título. Se realizaron modelaciones unidimensionales con el *software* HEC-RAS y modelaciones bidimensionales con el *software* Iber en tramos del río Boise. Como se especificó anteriormente, el objetivo de estos modelos es obtener las variables hidráulicas que permiten estudiar la variabilidad espacial del *stream power* y así predecir cambios morfológicos.

3.1. Modelación unidimensional

3.1.1. Software: HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) es un *software* que permite realizar cálculos hidráulicos en ríos de flujo permanente para modelación 1D y de flujo transiente para modelaciones 1D y 2D. En el caso de modelaciones para flujo permanente el *software* trabaja en base a la solución unidimensional de la ecuación de conservación de la energía calculando las pérdidas por fricción con la ecuación de Manning, la ecuación de conservación de momento se utiliza en situaciones donde la profundidad varía rápidamente entre secciones (Brunner, 2016).

Se utiliza este *software* ya que modela rápidamente a gran escala, como es el caso ya que el tramo de río estudiado tiene una longitud aproximada de 77 km, y se distribuye de forma gratuita a través de su respectivo sitio *web* (<http://www.hec.usace.army.mil/>). Las modelaciones unidimensionales se realizaron con el *software* HEC- RAS en su versión 5.0.3.

3.1.2. Actividades realizadas

La base de datos utilizada consta de dos modelos HEC-RAS de dos tramos del río Boise realizados por separado. El primer modelo corresponde al condado de Ada con datos del año 1999 y tiene una extensión de 55 km aproximadamente con un total de 354 secciones transversales. El segundo modelo corresponde al condado de Canyon con datos del año 2003 y tiene una extensión de 22 km aproximadamente con un total de 91 secciones transversales. Ambos modelos coinciden en un tramo de 4 km (Figura 3.1), por lo cual se analizaron en profundidad las 25 secciones transversales traslapadas con el fin de obtener un solo tramo sin secciones repetidas, estudiando su ubicación, geometría y rugosidad.

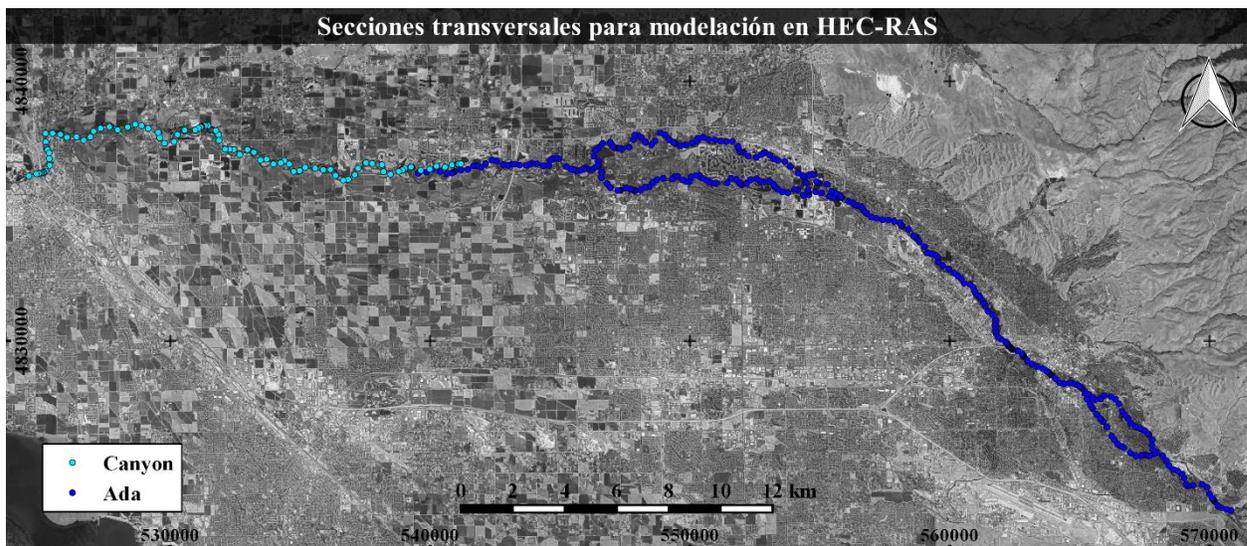


Figura 3.1. Zona modelada en *software* HEC-RAS con secciones transversales correspondientes a cada condado. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

Se unieron ambos modelos con el objetivo de obtener solo un modelo representativo del río Boise. En primer lugar, se estudiaron las secciones coincidentes de los dos modelos, analizando las coordenadas de cada sección respecto al río, revisando que coincidieran con éste. También se comparó la geometría de las secciones transversales y valores de Manning asignados, descartando secciones no representativas.

El modelo del río Boise en el condado de Ada se complementó con los puentes y secciones transversales del modelo del río en el condado de Canyon, excluyendo las secciones que fueron descartadas con anterioridad. El añadir nuevas secciones al modelo de Ada, exigió agregar la geometría de cada sección, el valor numérico del coeficiente de Manning, la ubicación de los bancos izquierdo y derecho de la sección, los coeficientes de expansión y contracción, y la distancia a la próxima sección aguas abajo.

Posteriormente se configuraron los datos de caudal para flujo permanente, para lo cual se utilizó información recopilada de mediciones de caudal del año 2017 durante 5 meses, cada 15 minutos, a partir de la cual se calcularon porcentajes de distribución de un caudal total de $240.69 \text{ m}^3/\text{s}$.

Finalmente, el modelo del río Boise realizado en HEC-RAS fue calibrado, con el fin de lograr un modelo unidimensional que represente de la mejor manera tal río, esto se llevó a cabo gracias a la

información de elevación del agua medida durante el año 2017 en un total de 187 puntos del río, por lo que se realizaron iteraciones constantes modificando el valor del coeficiente de Manning desde aguas abajo hacia aguas arriba, comparando los valores de elevación del agua reales con los valores obtenidos con el *software* HEC-RAS según las coordenadas de las secciones transversales y puntos medidos en terreno. Las coordenadas de ambos datos no eran coincidentes, por lo cual el análisis se efectuó mediante un código que aproxima la elevación del agua de cada sección transversal a las coordenadas de las elevaciones reales, comparando así dichos valores. Tal trabajo se realizó mediante dos métodos diferentes, el primer método busca las coordenadas más cercanas en términos de distancia horizontal, y el segundo método busca las coordenadas dentro de una distancia máxima definida. Luego de realizadas 26 iteraciones se logró la calibración del modelo, calculando el porcentaje de error entre las elevaciones de agua reales y entregadas por el *software* en cada punto medido (Figura 3.2), obteniendo un error promedio de 3.96 cm con el primer método y de 4.27 cm con el segundo método, en ambos el porcentaje de error promedio fue de 0.005%.

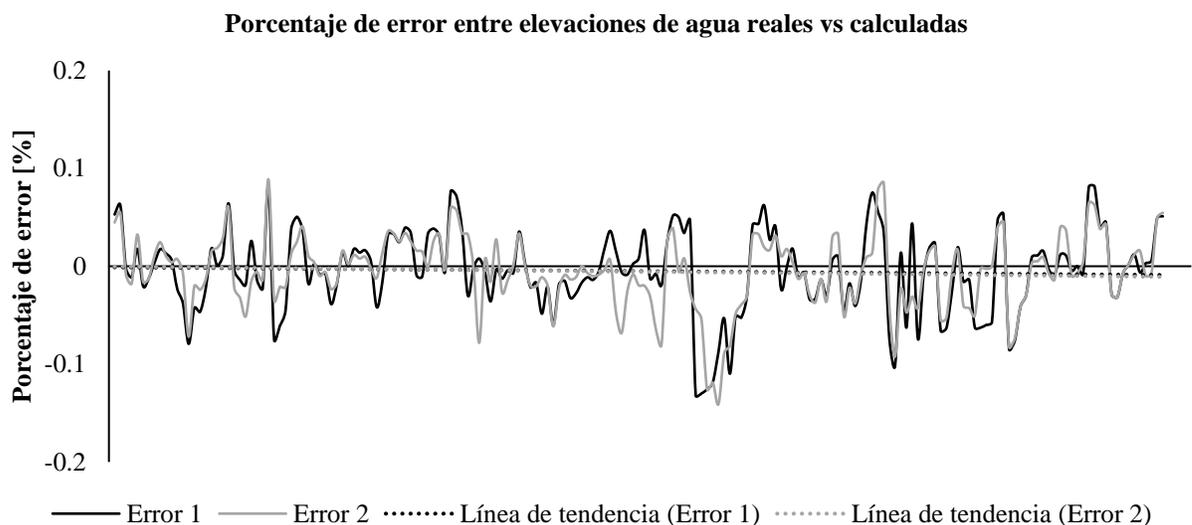


Figura 3.2. Gráfico del porcentaje de error de profundidad del agua en secciones transversales una vez calibrado el modelo. La línea de tendencia se calculó con aproximación lineal.

Una vez desarrollado y calibrado el modelo unidimensional único del río Boise, es decir, con sus correctos valores de coeficiente de rugosidad, se creó un nuevo modelo actualizado. En este se sustituyeron y agregaron nuevas secciones transversales medidas posterior al evento ocurrido el año 2017, con el objetivo de estudiar si se producen cambios que puedan dar lugar a posibles inundaciones o transporte de sedimentos, a través del análisis del *stream power* en cada sección transversal.

Las 39 nuevas secciones transversales fueron analizadas y verificadas sus coordenadas, en casos coincidentes con posiciones de secciones transversales del modelo anterior, se procedió a estudiar su geometría con el fin de actualizar las geometrías antiguas.

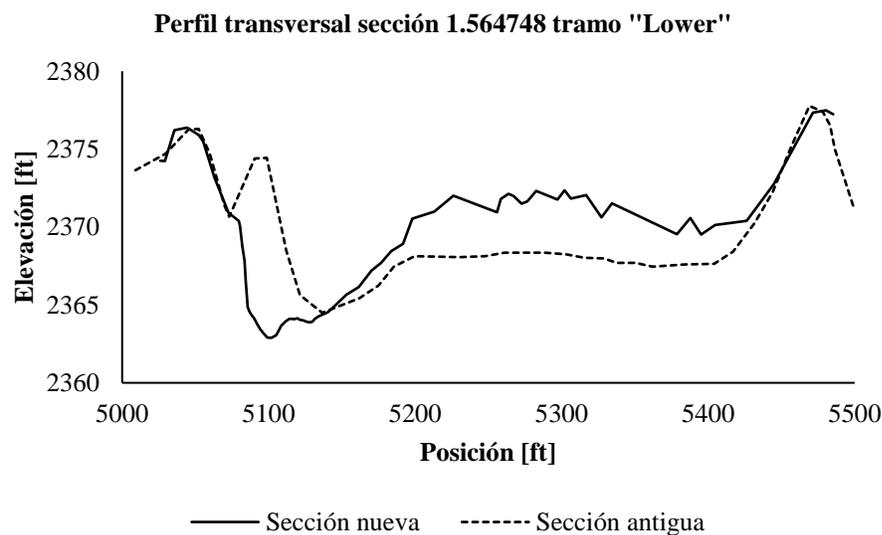


Figura 3.3. Ejemplo de variación geométrica de la sección transversal 1.564748 correspondiente al tramo “Lower” entre los años 2017 y 2003.

El *software* HEC-RAS se utiliza para realizar una modelación unidimensional del río Boise, lo cual presenta problemas con las curvaturas o áreas de recirculación, ya que considera distancias rectas entre secciones transversales, es por esto que se realizó un segundo modelo de un tramo del río Boise, esta vez bidimensional con el uso del *software* Iber, con el fin de comparar resultados y obtener un modelo más exacto.

3.2. Modelación bidimensional

3.2.1. Software: Iber

Iber es un *software* que permite simular el flujo de superficie libre bidimensionalmente, resolviendo ecuaciones a través del método de volúmenes finitos no estructurados utilizando mallas formadas por elementos de 3 o 4 caras. El modelo hidrodinámico se basa en las ecuaciones 2D de Saint Venant (Bladé *et al.*, 2014).

Se utiliza este *software* ya que su uso ha sido verificado en muchos estudios hidráulicos y se distribuye de forma gratuita en su sitio *web* (<http://www.iberaula.es/>). Las modelaciones bidimensionales se realizaron con el *software* Iber en su versión 2.4.3 y la exportación de resultados se realizó desde su versión 2.5.1.

3.2.2. Actividades realizadas

La modelación en Iber se realizó en un segmento que abarca aproximadamente 13 km del río Boise, comprendido entre las coordenadas 43°39'35" N latitud, 116°16'33" O longitud y 43°40'56" N latitud, 116°21'30" O longitud, ya que se contaba con la información necesaria para la formación del modelo (Figura 3.4).

Para la modelación se usó como base un estudio del 2017 del río Boise realizado por la empresa "Cbec, Eco Engineering". En este se realizó un modelo 2D del río utilizando el *software* HEC-RAS. A partir de tal modelo se obtuvieron los datos de entrada para la modelación en Iber, tales como, el modelo de elevación digital de la zona de estudio y los valores de coeficiente de Manning para cada sector. El tramo en el cual se centra el estudio cuenta con diques de contención en ciertas ubicaciones lo cual se representa directamente en la topografía del modelo de elevación digital (formato ráster).

Ambos archivos ráster de entrada, modelación de elevación digital y coeficiente de Manning, se encontraban en el sistema de referencia de coordenadas NAD 1983 State Plane Idaho West en pies, por lo cual se debieron transformar las proyecciones a WGS84 zona 11 N UTM, en metros. Por otro lado, se modificaron los valores de elevación del DEM a través de un código realizado con el lenguaje Python, ya que estas de igual forma se encontraban en pies. Cabe destacar que, es necesario que todos los archivos y datos de entrada al modelo en Iber estén en sistema internacional.

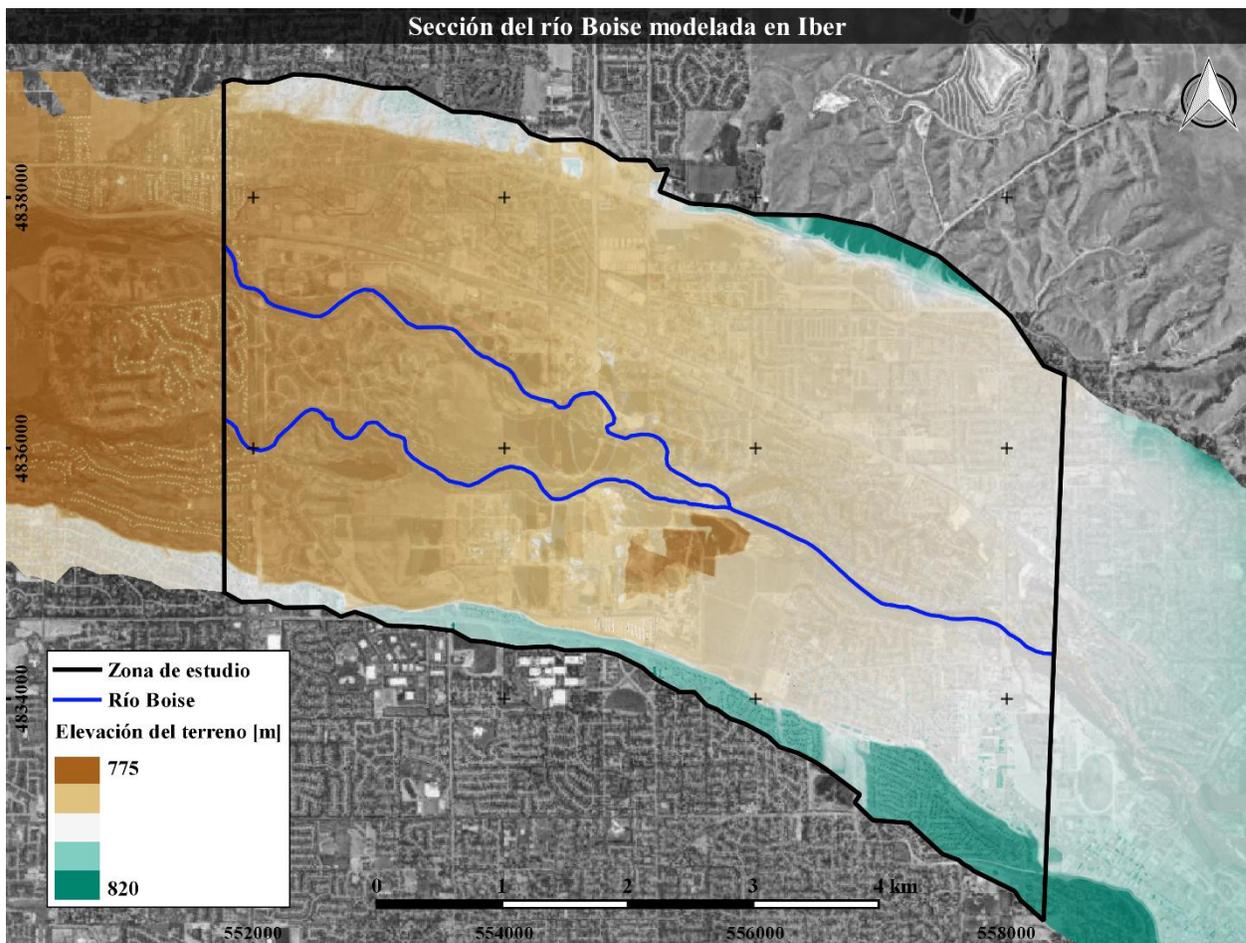


Figura 3.4. Zona modelada con el *software* Iber. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

Para la simulación se debió crear una malla, en la cual cada elemento de ésta recogió la información de la geometría del terreno. Las ecuaciones hidráulicas se resuelven en cada elemento de la malla (García y Matamoros, 2019). Se realizaron tres modelos bidimensionales en Iber, con distintos tamaños de malla, el tamaño inicial fue de 10 metros, realizando dos modelos más con tamaños reducidos a la mitad, de 5 metros y 2.5 metros, con el fin de obtener resultados más exactos, ya que Iber realiza los cálculos según la triangulación de la malla, y entrega los resultados de la misma forma, por lo cual, a menor tamaño de malla, más exactos son los resultados. El caudal de entrada fue de $240.69 \text{ m}^3/\text{s}$ y la modelación se llevó a cabo en un periodo de 18 horas, con el fin de lograr un equilibrio entre el caudal de entrada y salida del segmento de río.

Los resultados obtenidos del modelo son la elevación del agua, profundidad, velocidad y caudal cada 1 m², los cuales se exportan en formato ráster, por lo que fue necesaria la creación de un código con el lenguaje Python, con el fin de calcular el valor del *stream power* en dirección X e Y en cada punto del río, para así realizar un posterior análisis y comparación con el modelo unidimensional.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1. Modelación unidimensional

La modelación unidimensional del río Boise se realizó con el *software* HEC-RAS, para un caudal de $240.69 \text{ m}^3/\text{s}$ y con datos de 434 secciones transversales con sus respectivas geometrías y coeficientes de rugosidad. El *software* entrega como resultado la distancia lineal entre secciones transversales y el valor del *stream power* unitario en cada una de ellas, por lo cual fue posible estimar la variabilidad longitudinal del *stream power* entre secciones trasversales.

Los resultados obtenidos varían entre -50.34 y 404.05 kg/m s^3 , encontrándose el 92.33% entre los límites -2 y 2 kg/m s^3 , por lo cual las secciones con valores comprendidos entre tales límites no fueron consideradas como zonas propensas a sufrir cambios morfológicos. El análisis se centró en las 33 secciones restantes (Tabla 4.1), las cuales se proponen como áreas de estudio con el fin de verificar la metodología utilizada.

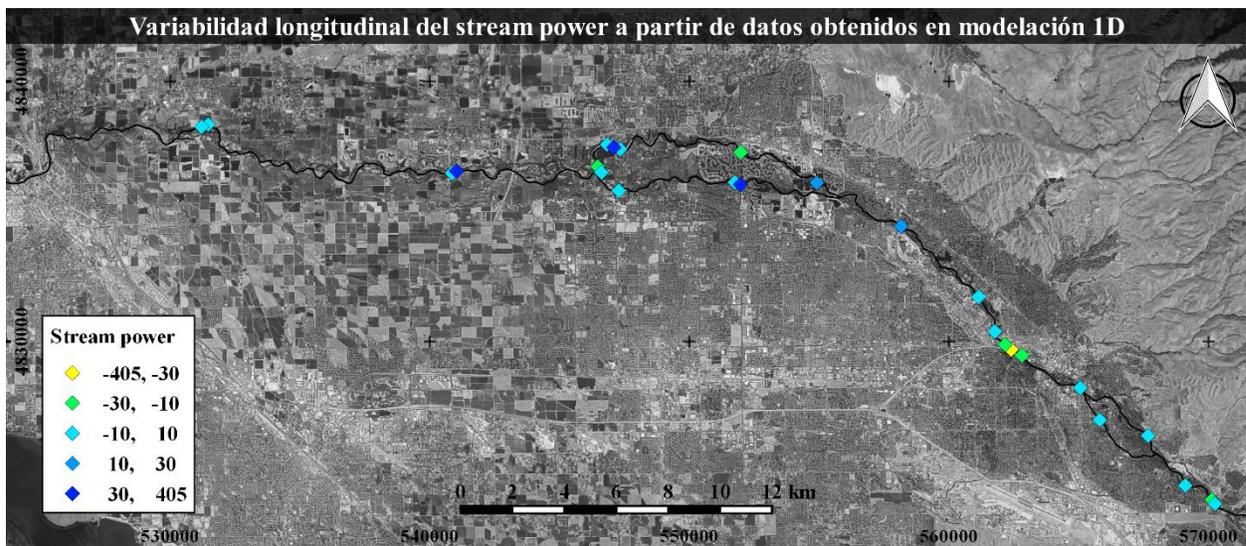


Figura 4.1. Resultados del gradiente longitudinal de *stream power* en secciones transversales del río Boise, sin considerar las secciones con valores comprendidos entre -2 y $2 \text{ [kg/m s}^3]$.
Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

De las 33 secciones propuestas (Figura 4.1), 15 de ellas tienen como resultado valores negativos, que varían entre -50.34 y -2.22 kg/m s^3 , las cuales son propensas a sufrir sedimentación, ya que el *stream power* local es menor que el obtenido en la sección aguas arriba. Por otro lado, las 18 secciones transversales restantes tienen como resultado valores positivos, los cuales varían entre 2.02 y 404.05 kg/m s^3 , éstas son propensas a sufrir erosión en su lecho, ya que el *stream power* local es mayor que el de la sección aguas arriba.

Al realizar una segunda modelación considerando geometrías recientes de 39 secciones transversales, los resultados obtenidos fueron similares, de igual manera se discriminó no considerando valores comprendidos entre -2 y 2 kg/m s^3 , obteniendo las mismas secciones propuestas que en el caso de la modelación anterior. De las 33 secciones sólo cinco presentaron variación en sus resultados, las secciones 33.92 , 50.11 , 3.102923 , 3.10178 y 33.94 , con un error promedio de 0.009 kg/m s^3 , por lo que dicha variación no es considerada significativa para el análisis.



Figura 4.2. Secciones transversales situadas en zona de estudio para modelación 2D, con resultados del gradiente longitudinal de *stream power* en secciones, sin considerar los valores comprendidos entre -2 y $2 \text{ [kg/m s}^3]$. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

Tabla 4.1. Secciones propensas a sufrir cambios morfológicos, propuestas como áreas de estudio.
Proyección: NAD83 StatePlane Idaho West FIPS 1103 Feet.

Sección	Variación de stream power [kg/m s ³]	Este [ft]	Norte [ft]
51.63	-50.34	2498431.30	711343.49
42.81	-27.09	2464617.54	736734.79
58.29	-25.89	2523500.41	692009.99
51.57	-24.61	2498290.39	711484.39
51.93	-21.74	2499774.81	710581.37
0	-17.59	2446501.09	735217.88
51.52	-10.13	2498042.15	711708.17
4.2	-9.20	2464427.68	732709.27
53.7	-7.03	2507090.05	706373.27
51.91	-3.48	2499710.78	710658.21
33.92	-3.25	2428068.97	734654.39
50.11	-2.78	2494411.39	718046.08
57.44	-2.58	2520170.03	693859.94
54.76	-2.56	2509494.55	702297.20
51.61	-2.22	2498414.39	711357.58
51.53	2.02	2498093.13	711645.02
51.64	2.17	2498487.66	711298.40
0.91	2.32	2449121.36	732135.37
3.102923	2.76	2396517.70	740986.11
39.12	3.14	2448719.41	737543.28
58.34	3.30	2523589.49	691874.19
0.2	3.51	2446970.64	734461.68
39.08	3.55	2448503.62	737608.50
55.92	3.60	2515557.41	700231.03
58.3	3.76	2523534.00	691955.96
51	4.00	2496393.01	713645.12
3.10178	4.79	2396507.30	740979.99
51.94	5.71	2499830.31	710517.34
44.98	13.37	2474161.76	732752.53
47.45	18.91	2484733.88	727113.78
33.94	45.70	2428137.49	734690.50
39.1	87.54	2448570.45	737595.42
4.22	404.05	2464510.98	732655.74

Por otro lado, se analizaron en detalle los resultados obtenidos en el sector de río modelado bidimensionalmente, en el cual se encuentran 5 secciones (Figura 4.2), dónde la sección transversal 4.22 toma el valor máximo calculado, siendo el área con mayor potencial para transportar sedimentos desde aguas arriba, provocando cambios morfológicos como erosión. El valor máximo 404.05 kg/m s^3 se debe a la gran diferencia entre los valores de *stream power* unitario en las secciones 4.22 y 4.2 y la corta distancia longitudinal que existe entre éstas, las cuales se encuentran a 1.52 m, produciéndose un cambio brusco entre secciones. Las secciones 42.81, 4.22, 44.98 y 47.45 presentan una variabilidad longitudinal del *stream power* unitario importante, y todas se encuentran próximas a puentes, lo cual es coincidente con la literatura, los resultados varían entre -405 y -30 kg/m s^3 , y entre 30 y 405 kg/m s^3 , una de ellas compromete procesos de sedimentación, mientras que las restantes comprometen procesos de erosión.

4.2. Modelación bidimensional

En primer lugar, se efectuó un análisis de sensibilidad del tamaño de malla utilizado en las modelaciones, comparando resultados al aplicar mallas no estructuradas de volúmenes finitos formadas por elementos triangulares de tamaños 10, 5 y 2.5 m. Se compararon los resultados de profundidad para cada una de las modelaciones, al trabajar con la malla de 10 m se puede observar que se inunda gran parte del terreno transcurridas las 18 horas y se presentan valores altos de profundidad, aproximadamente de 5 m en un sector (Figura 4.3). El modelo correspondiente al mallado de 5 m muestra resultados diferentes, ya que se presentan inundaciones pero no en la misma magnitud y en menos sectores (Figura 4.4), al usar la malla de 2.5 m se presentan aún menos sectores inundados (Figura 4.5). Al comparar estos dos últimos modelos los valores de profundidad no varían de forma significativa, la diferencia promedio entre el profundidad del modelo de 2.5 m y 5 m es de un 0.44%, por lo cual para el cálculo de la variabilidad espacial del *stream power* se utilizarán los datos del modelo más fino, en este caso de 2.5 m, ya que mientras más fino sea el mallado, mejores resultados se obtendrán, dado que disminuye el error introducido por las aproximaciones numéricas, la cual es consecuencia de la técnica de estabilización numérica empleada y es proporcional al tamaño de malla (García y Matamoros, 2019).

El *software* entrega los resultados en formato ráster, y para el caso los datos se obtienen por metro cuadrado, contando aproximadamente con 2370000 celdas con información relevante de profundidad del agua, elevación del agua, caudal y velocidad en direcciones X e Y con sus

respectivos sentidos. En relación mallado, cada celda toma el valor correspondiente al triángulo al cual pertenece, no se realiza interpolación de resultados.

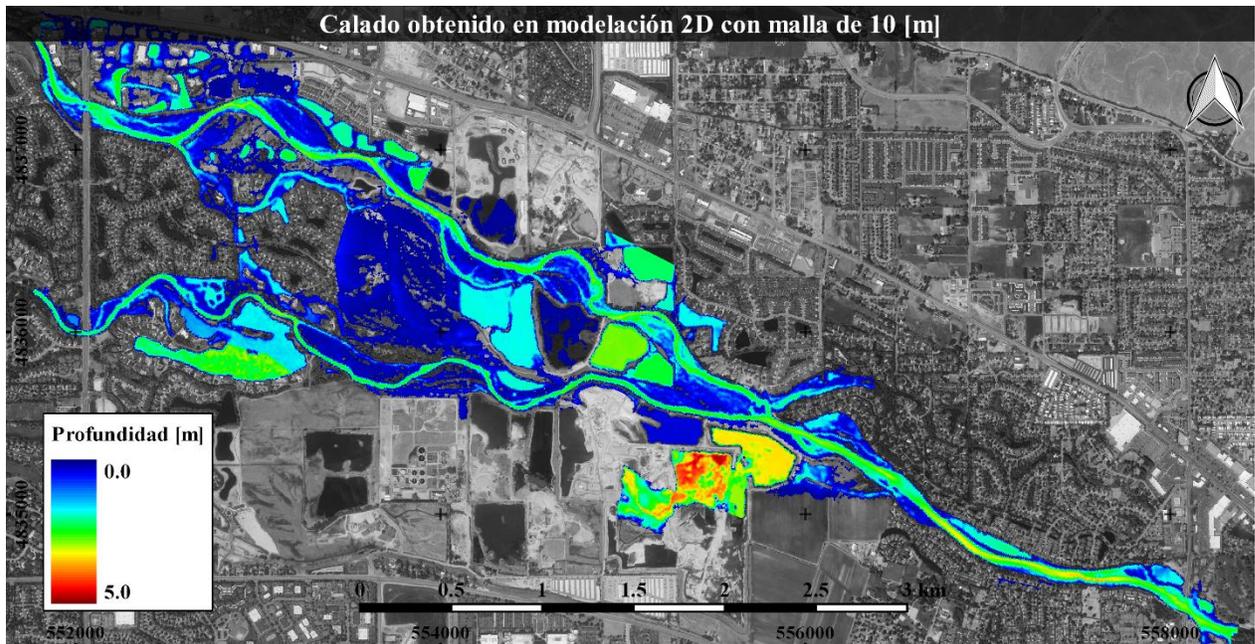


Figura 4.3. Profundidad en [m] obtenida al finalizar la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 10 [m]. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

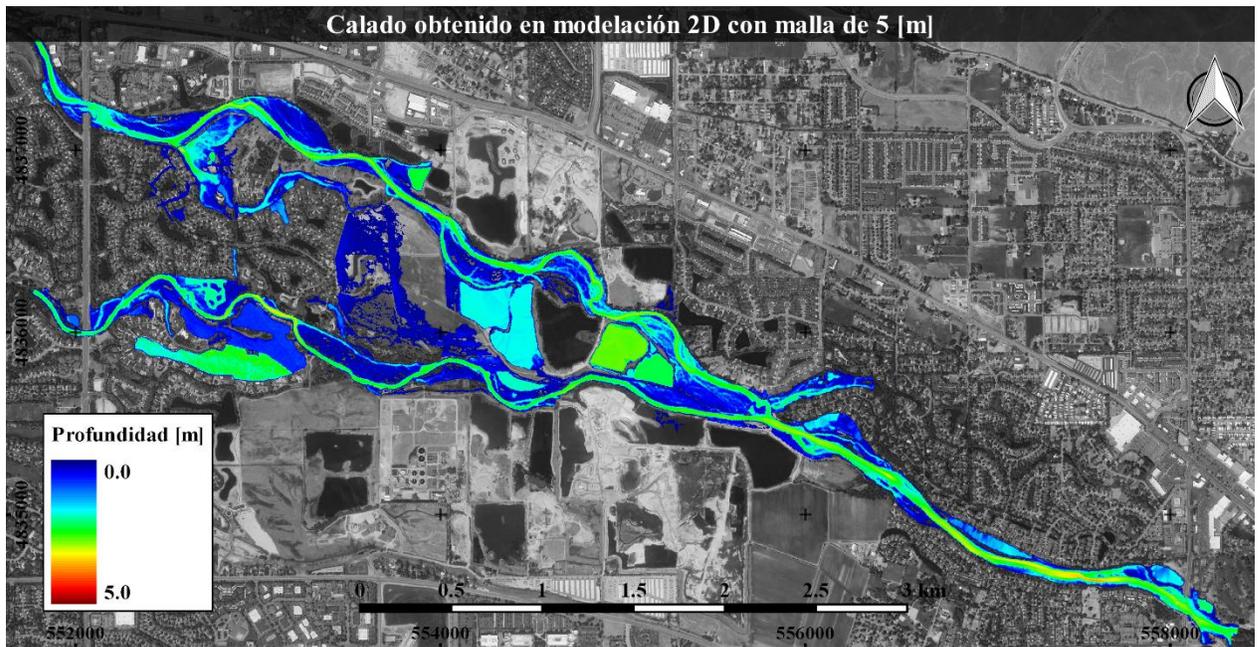


Figura 4.4. Profundidad en [m] obtenida al finalizar la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 5 [m]. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

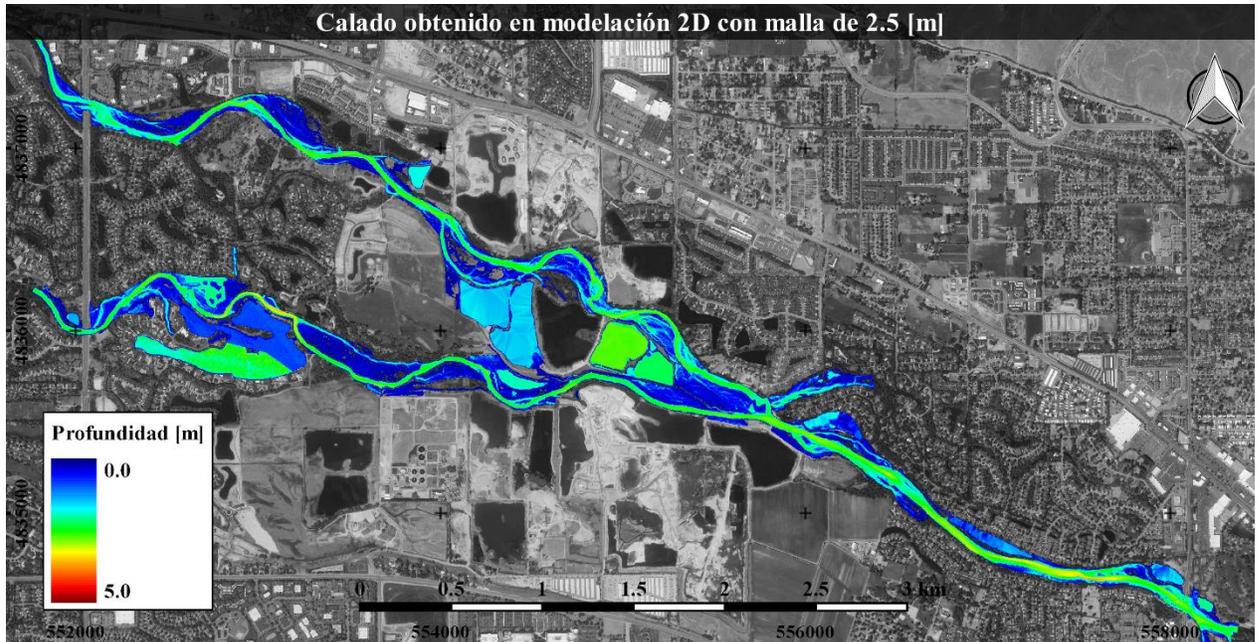


Figura 4.5. Profundidad en [m] obtenida al finalizar la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 2.5 [m]. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

El *stream power* se calculó para ambas direcciones por separado, utilizando la *ecuación (2.4)*, estimando la tasa de disipación de energía contra el lecho del río entre celdas vecinas para distancias de 1 m. En la dirección X el valor máximo obtenido es $35558083 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$ y el valor mínimo es $-26156134 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$, y los valores máximos absolutos se presentan en el río (Figura 4.6), mientras que en sectores inundados el *stream power* oscila entre -200000 y $200000 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$. Por otra parte, en la dirección Y el valor máximo obtenido es $18706393 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$ y el valor mínimo es $-21903419 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$, al igual que en la dirección X, los valores máximos absolutos se presentan en el río (Figura 4.7) y en los sectores inundados el *stream power* oscila entre los mismos valores. Los valores obtenidos en dirección Y son menores, esto se debe a la dirección en la cual fluye el río, por lo que el caudal y velocidad en dirección X son en la totalidad mayores en magnitud, y directamente proporcionales al valor del *stream power*.



Figura 4.6. *Stream power* por longitud unitaria en $[\text{kg m}^2/\text{s}^3]$ en dirección X, calculado a partir de la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 2.5 [m].
Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.



Figura 4.7. *Stream power* por longitud unitaria en $[\text{kg m}^2/\text{s}^3]$ en dirección Y, calculado a partir de la modelación bidimensional para 64800 [s] con malla no estructurada de 2.5 [m].
Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

El gradiente se calculó para estudiar como varía el *stream power* local en las direcciones X e Y utilizando la ecuación (2.5) para cada caso, y así poder definir áreas propensas a sufrir cambios morfológicos. En la dirección X el valor máximo obtenido es $47096494 \text{ kg m/s}^3$ y el valor mínimo es $-36038356 \text{ kg m/s}^3$, las máximas variaciones de *stream power* se encuentran en el río y no en sectores inundados (Figura 4.8). En la dirección Y el valor máximo obtenido es $23297137 \text{ kg m/s}^3$ y el valor mínimo es $-21393328 \text{ kg m/s}^3$, al igual que en el caso anterior dichos valores se encuentran en el río (Figura 4.9).

Con el fin de discriminar y obtener los máximos absolutos en ambas direcciones, se propuso estudiar las celdas con gradientes entre -48000000 y $-15000000 \text{ kg m/s}^3$, y entre 15000000 y $48000000 \text{ kg m/s}^3$. En dirección X se presenta una mayor cantidad de cambios bruscos entre celdas adyacentes que en dirección Y, por lo cual existe una mayor cantidad de áreas propensas a sufrir cambios morfológicos, en este caso no se puede asegurar si tales cambios corresponden a procesos de erosión o sedimentación ya que para el análisis no se comparan secciones locales versus secciones aguas arriba, sino que se estudia el comportamiento según la dirección y sentido del flujo.

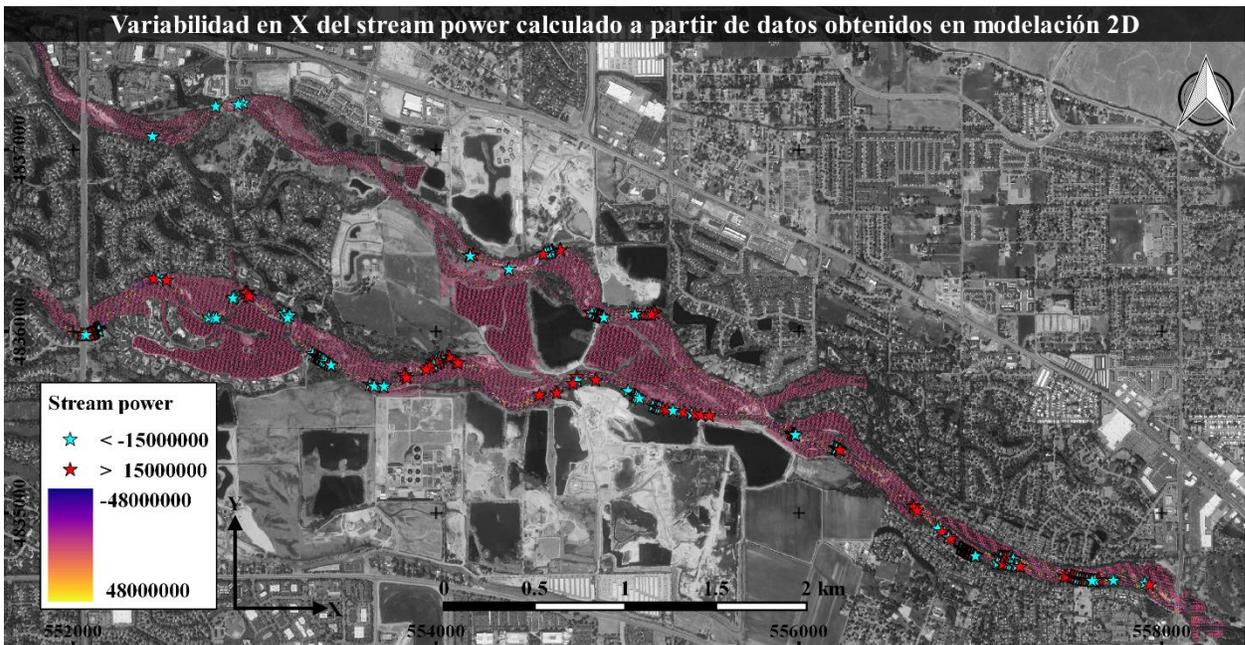


Figura 4.8. Gradiente de *stream power* en $[\text{kg m/s}^3]$ en dirección X con puntos máximos y mínimos. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.



Figura 4.9. Gradiente de *stream power* en $[\text{kg m/s}^3]$ en dirección Y con puntos máximos y mínimos. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

En el caso de la dirección X se cuenta con 386 celdas de 1 m^2 cada una con valores máximos absolutos mayores a $15000000 \text{ kg m/s}^3$ (Figura 4.8), y para la dirección Y se cuenta con 29 celdas con las mismas características (Figura 4.9).

4.3. Áreas propuestas para posterior estudio

Con el fin de sugerir áreas propensas a sufrir cambios morfológicos con el objetivo de ser medidas ante un posible evento y así efectuar una posterior verificación de la metodología, se analizaron en conjunto los resultados obtenidos en cada modelación unidimensional y bidimensional en la zona de estudio donde se realizó la modelación con Iber. Se obtuvieron un total de cinco secciones transversales correspondientes a la modelación en HEC-RAS, y 415 celdas correspondientes a la modelación en Iber (Figura 4.10), las celdas son de 1 m^2 lo cual es considerada un área reducida para un eventual estudio, por lo que se proponen tramos para ser analizados en un futuro.



Figura 4.10. Sección del río Boise modelada bidimensionalmente con puntos en los cuales se obtuvieron los máximos gradientes de *stream power* a partir de modelaciones 1D y 2D. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

Se proponen un total de 29 tramos para posterior análisis, todos de longitudes diferentes, considerando en ellos las cinco secciones transversales del modelo unidimensional (Figura 4.11), se espera que ocurran cambios morfológicos en dichos tramos del río Boise ante grandes eventos, pero no se pueden confirmar si corresponden a procesos de erosión o sedimentación.

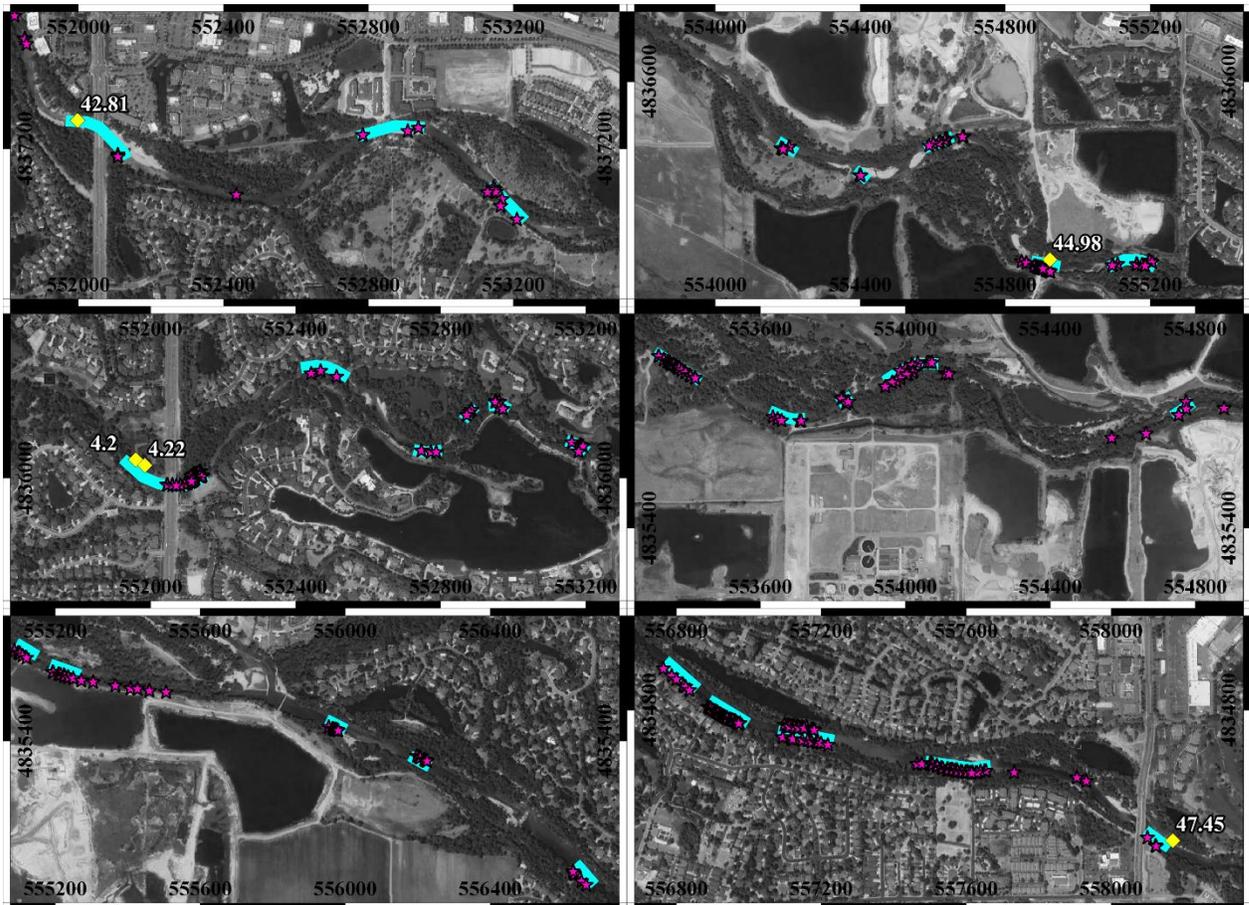


Figura 4.11. Tramos del río Boise propuestos para posterior análisis, los tramos se representan en color cian. Proyección: WGS84 / UTM zona 11N.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Capítulo 5. Conclusiones

Se desarrolló una metodología para predecir cambios morfológicos en ríos de lechos no cohesivos, basado en modelaciones hidráulicas unidimensionales y bidimensionales del río Boise con el objetivo de calcular el gradiente de *stream power*. En el caso de la modelación unidimensional se utilizó el *software* HEC-RAS para flujo en estado permanente y régimen subcrítico. Para el caso de la modelación bidimensional se utilizó el *software* Iber aplicando el método de volúmenes finitos. A partir de los datos obtenidos de los modelos desarrollados fue posible la cuantificación de la variabilidad espacial del *stream power* en los casos 1D y 2D.

Se analizaron en conjunto los resultados de gradiente de *stream power* obtenidos de ambos modelos, logrando identificar una gran cantidad de zonas en el río propensas a sufrir cambios morfológicos. Para el caso de estudio del río Boise, se proponen un total de 29 tramos de río ubicados mayoritariamente en curvas y zonas de puentes, en los cuales se obtuvieron los mayores gradientes de *stream power* en valor absoluto. De acuerdo a la metodología propuesta, estos son candidatos a sufrir procesos de erosión o sedimentación ante posibles eventos críticos por lo cual debiesen ser medidos y monitoreados con el fin de verificar el método en un futuro.

Los dos modelos utilizados trabajan en dimensiones distintas, y los datos de entrada son diferentes, el modelo unidimensional necesita la geometría de secciones transversales de río y distancia entre estas, mientras que el modelo bidimensional necesita un modelo de elevación digital del río y sectores aledaños, lo cual implica una mayor cantidad de recursos. Al comparar ambos modelos, el modelo bidimensional es más fino, ya que analiza áreas de 1 m^2 y cuenta con la topografía completa del río. Por otro lado, el modelo unidimensional se centra sólo en las secciones transversales medidas, imposibilitando el estudio de forma más precisa. Ambos modelos exponen zonas propensas a sufrir cambios morfológicos, pero no es posible definir según este estudio cual de los dos modelos es mejor, es necesario comparar los resultados predichos con futuros sucesos reales medidos en terreno.

Nomenclatura

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad de medida</i>
Ω_T	: Stream power total	[kg m/s ³]
ρ	: Densidad del agua	[kg/m ³]
g	: Aceleración de gravedad	[m/s ²]
Q	: Caudal	[m ³ /s]
S_e	: Pendiente de energía	[m/m]
Ω_U	: Stream power unitario	[kg/s ³]
b	: Ancho del canal	[m]
$\Delta\Omega_U$: Gradiente de stream power unitario	[kg/m s ³]
$\Omega_{U L}$: Stream power unitario local	[kg/s ³]
$\Omega_{U AA}$: Stream power unitario aguas arriba	[kg/s ³]
L	: Distancia entre secciones	[m]
Ω	: Stream power	[kg m ² /s ³]
h	: Profundidad	[m]
v	: Velocidad	[m/s]
z	: Elevación del lecho	[m]
$\Delta\Omega$: Gradiente de stream power	[kg m/s ³]
ΔL	: Distancia entre celdas	[m]

Bibliografía

- Bizzi, S., Lerner, D.N. (2015). “The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes”. *River Res. Appl.* **31**: 16-27.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. (2014). “Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos”. *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing.* **30**: 1-10.
- Brookes, A. (1987). “The distribution and management of channelized streams in Denmark”. *Regul. Rivers: Res. Manage.* **1**: 3-16.
- Brunner, G.W. (2016). “HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual”. US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis.
- García, D.A., Matamoros, H. (2019). “Análisis y comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D”. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería.* **114**: 77-85.
- Gartner, J.D., Dade, W.B., Renshaw, C.E., Magilligan, F.J., Buraas, E.M. (2015). “Gradients in stream power influence lateral and downstream sediment flux in floods”. *Geology.* **43**: 983-986.
- Idaho Department of Environmental Quality, IDEQ. (2001). “Lower Boise River nutrient subbasin assessment”.
- Martín-Vide, J.P. (2013). “Erosión, sedimentación y restauración de ríos. Ejemplos de ingeniería e investigación”. *Tecnol. Cienc. Agua.* **4**: 5-18.
- Richardson, R., Guilinger, J. (2015). “Geomorphic assessment of the lower Boise River, Idaho”. Boise River Enhancement Network.
- Yochum, S.E., Sholtes, J.S., Scott, J.A., Bledsoe, B.P. (2017). “Stream power framework for predicting geomorphic change: The 2013 Colorado Front Range flood”. *Geomorphology.* **292**: 178-192.