



**Revista de la Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica**



ISSN 0716-3746 Volumen 37 Número 3 Diciembre 2022

REVISTA DE LA
SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCHID

Sede Instituto de Ingenieros de Chile – San Martín 352 – Fono 2 2698 4028 – Santiago CHILE

Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica

ISS 0716-3746

Volumen 37, Número 3, Diciembre 2022

DIRECTORIO SOCHID

Presidente: Hernán Alcayaga S.
Vicepresidente: Damaris Orphanópoulos S..
Tesorero: Cristián Núñez R.
Directores: Cristián Escauriaza M.
Karla González N.
Aldo Tamburrino T.
Secretario General: Francisco Romero B.

DIRECTORES HONORARIOS

Francisco J. Domínguez S. (Q.E.P.D.)
Horacio Mery M.
Eduardo Varas C.
Sergio Radrigán V.
Humberto Peña T.
Ernesto Brown F. (Q.E.P.D.)
Bonifacio Fernández L.
Jorge Bravo S
Luis Ayala R.
Ludwig Stowhas B.
Ricardo González V.
José Vargas B.
Luis Estellé A.
Raúl Demangel C.

EDITOR DE LA REVISTA

Aldo Tamburrino Tavantzis
atamburr@ing.uchile.cl
San Martín 352, Santiago
Fono 2 2698 4028
www.sochid.cl

Imagen de la portada: Diseño usado en el primer número de la Revista en 1986

**REVISTA DE LA SOCIEDAD CHILENA
DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

ÍNDICE

Editorial	1
Caracterización morfológica del río Duqueco aplicando el marco <i>River Styles</i> Francisca Salas, Santiago Yépez, José Vargas, Rolando Rodríguez, Víctor Osores, Andrea Nardini, Hervé Piégay	3
Estudio de la aplicación de métodos para la estimación de distancia peligrosa en depósitos de relaves no operativos en Chile Karina Monsalve, Christian Ihle, Aldo Tamburrino	19
Hidro-Grafía Aldo Tamburrino Tavantzis	37

EDITORIAL

Con este número de la Revista nos despedimos de 2022. Sin poco esfuerzo, se ha logrado editar tres números en el año, lo que no sucedía desde 1990. Esto ha sido posible solo gracias al aporte de quienes contribuyen con artículos, por lo que la invitación a hacerlo continúa abierta. De este modo, junto con agradecer a los autores, esperamos que el interés por contribuir con escritos continúe durante 2023.

El año 2022 fue muy intenso para nuestra Sociedad, la que organizó o patrocinó tres importantes eventos: el IX Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria (SIOP) realizado del 26 al 28 de octubre en Valparaíso; las XVI Jornadas de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, el 17 y 18 de noviembre y el Tercer Congreso Chileno de Ingeniería Ambiental en Sistemas Acuáticos (III CCHIASA), del 14 a 16 de diciembre, estos últimos en Santiago.

Una decisión relevante del Directorio de la SOCHID tomada este año fue el acuerdo de liberar el acceso libre a todos los artículos que se encuentran digitalizados, en particular los Congresos, Jornadas y la Revista. Respecto a esta última, se invita a los socios promover su difusión.

El próximo año tendrá lugar el XXVI Congreso Chileno de Hidráulica, el que tendrá lugar en Valdivia, organizado por la Universidad Austral. Evento al que desde ya estamos todos invitados a participar.

Aldo Tamburrino Tavantzis
Editor

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL RÍO DUQUECO APLICANDO EL MARCO RIVER STYLES

FRANCISCA SALAS C.¹, SANTIAGO YÉPEZ F.², JOSÉ VARGAS B.³, ROLANDO RODRIGUEZ L.⁴, VICTOR OSORES E.⁵, ANDREA NARDINI⁶, HERVÉ PIÉGAY⁷

¹ Ingeniera Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción
fransalas@udec.cl

² Profesor Asistente, Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Universidad de Concepción – syepez@udec.cl.

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción –
jvargas@udec.cl.

⁴ Profesor Asociado, Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Universidad de Concepción – rorodriguez@udec.cl.

⁵ Profesor Asistente, Departamento de Matemática, Física y Estadística, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Católica del Maule – vosoresh@ucm.cl

⁶ Fundación CREACUA, Riohacha, La Guajira (Colombia) – nardiniok@gmail.com

⁷ Research Director, CNRS UMR5600 EVS – Site of ENS Lyon, Université de Lyon, Auvergne-Rhône-Alpes, France – herve.piegay@ens-lyon.fr

RESUMEN

Los fenómenos asociados a la variabilidad climática a nivel global pueden provocar episodios extremos más intensos, originando así un aumento de las inundaciones y sequías prolongadas. Ante esta situación, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) tiene la responsabilidad de seleccionar qué obras ejecutará con mayor prioridad con el presupuesto anual, de tal manera que controlar y mitigar los efectos por inundaciones y otros eventos asociados a la variabilidad climática resulta de vital importancia. De allí surge la necesidad de contar con una herramienta que incluya la evaluación de la morfodinámica fluvial, permitiendo una gestión de las obras hidráulicas compatible con los procesos de respuesta y ajuste de los cauces.

El objetivo de este trabajo es caracterizar los estilos fluviales del río Duqueco en base a su geomorfología, para conocer el carácter y comportamiento del corredor fluvial. Se aplica la primera etapa del marco *River Styles*, que caracteriza y clasifica estilos fluviales en función de atributos hidromorfológicos medidos a escala de segmentos. Previamente, se utiliza el marco de desagregación y agregación, que determina atributos del cauce a escala local, para luego agregarlos en tramos mayores. Todo el proceso se realiza de forma semiautomatizada, gracias al conjunto de herramientas de creación propia *South Rivers Toolbox* (SRT), implementado en el software QGIS.

Como resultados se clasifican y caracterizan 43 estilos fluviales principales y 57 estilos complementarios y se analiza el cauce en 3 zonas. La zona alta, se caracteriza por ser mayoritariamente confinada, mono-canal, con lecho de cantos rodados y bloques, siendo altamente intervenida por obras de generación eléctrica. La zona media, sigue en su mayor

parte confinada y mono-canal, con un cambio en el tipo de lecho hacia cantos rodados. Finalmente, la zona baja es más diversa en estilos, mayoritariamente no confinada, con alta presencia de unidades geomórficas que dan paso a las formas en planta transicionales, y solo en zonas puntuales aparecen tramos multicanales.

Palabras claves: Rio Duqueco, Geomorfología, River Styles, South Rivers Toolbox

1. INTRODUCCIÓN

Los cambios a escala planetaria, como el aumento de la población, incremento de gases de invernadero, cambios en el uso del suelo, aumento de residuos sólidos y el cambio climático han degradado al sistema terrestre (Duarte *et al.*, 2006). Algunos efectos del calentamiento global, como el aumento de la temperatura global y el incremento de precipitaciones intensas (Panel Intergubernamental del Cambio Climático, 2014) puede llevar a episodios extremos más intensos, proyectándose un aumento de las inundaciones en la próxima década (Eissa y Zaqui, 2011).

En Chile, las inundaciones presentan mayor ocurrencia entre la V y X región. Entre sus efectos se contabilizan pérdidas humanas, deterioro de la infraestructura y la paralización de actividades económicas (Rojas, 2015). Para mitigar los efectos de los eventos extremos, la DOH realiza planes de manejo de cauces, para priorizar la construcción de obras, ejecutando estudios de monitoreo de precipitaciones, caudales, topografía, calidad de suelos, etc. De aquí la necesidad de contar con herramientas que incluyan la morfodinámica fluvial, en un enfoque integral, ante el precedente de la intensificación de los procesos relacionados al cambio climático.

La geomorfología fluvial se define como la ciencia que estudia los accidentes geográficos, formas y relieves ocasionados por los ríos sobre la superficie terrestre (Kellerhals y Church, 1989). Los avances de geomorfología y gestión de ríos nacieron del interés en la restauración de los cauces y el desarrollo sostenible. Los primeros elementos creados en este proceso presentaron problemas al poco tiempo, ya que se basaron en caracterizaciones de ríos locales y aisladas de la red de captación (Gregori *et al.*, 2008; Sear, 1994; Brookes, 1992). La incorporación de la visión holística espacial y temporal, permite entender los procesos y formas del cauce, predecir la respuesta del río ante perturbaciones y lograr una gestión sostenible (Brierley y Fryirs, 2005).

El aumento de la disponibilidad de datos de teledetección permite ampliar la escala temporal y espacial en la caracterización de los ríos, y de esta forma, mejorar la comprensión de la trayectoria fluvial. Todo esto con menores costos que la recolección de datos en terreno, utilizando estos últimos como medio de validación en un enfoque integral (Piegay *et al.*, 2020; Carbonneau y Piégay, 2012; Bizzi *et al.*, 2016).

De la misma forma, los datos continuos (*e.g* modelos de elevación digital, imágenes satelitales, fotos aéreas, etc.), permiten investigar la variabilidad de las métricas a lo largo de las redes de drenaje, en forma continua, en lugar de la tradicional medición puntual de

atributos (Orr *et al.*, 2008). Es así como el marco metodológico de Alber y Piegay (2011), permite delimitar tramos de río con características homogéneas de manera objetiva y replicable, siendo automatizado con el algoritmo *Fluvial Corridor Toolbox* (Roux *et al.*, 2015).

En el contexto introducido, se encuentra el marco *River Style* (Brierley y Fryirs, 2000), el cual proporciona una herramienta geomórfica para la evaluación del carácter, comportamiento, estado y evolución de los ríos en toda la cuenca, teniendo como objetivo la gestión sostenible del cauce.

1.1 Objetivo

El objetivo de este trabajo es caracterizar los estilos fluviales en base a la geomorfología del río Duqueco, aplicando el marco *River Styles*.

1.2 Zona de Estudio

El área de estudio comprende el cauce del río Duqueco, ubicado en la región del Biobío, en la cuenca alta del río Biobío, localizándose la subcuenca, entre las latitudes 37,30° y 37,36° S y las longitudes 71,29° y 72,30° W (Figura 1).

El río presenta un régimen hidrológico pluvial, sus caudales y calidad química del agua son monitoreados por las estaciones de “Río Duqueco en Villucura” y “Río Duqueco en Cerrillos”. Según el balance hídrico de Chile (DGA, 1987), las isotermas de la zona varían entre 4°-15°C y las isoyetas entre 1200–4000 mm/añual, con un fuerte gradiente orográfico en la zona cordillerana.

Finalmente, destaca la generación eléctrica en la parte alta de la cuenca, con cuatro centrales hidroeléctricas, dos centrales convencionales “Mampil” y “Peuchén”, y dos centrales de pasada “Los Padres” y “Lleurequeo”, las dos primeras funcionan con la acumulación de carga, gracias a las presas “Las Juntas” y “El Trintre”, finalizando el recorrido con el contraembalse “Rucacura”, que tiene por objeto restituir el régimen natural del río hacia aguas abajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Datos disponibles

Se trabaja con el modelo de elevación digital por interferometría de Radar TanDEM-X de 10m del DRL (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – German Aerospace Center) de Alemania, imágenes satelitales de la constelación de nanosatélites *Planet Scope* con una resolución de píxel de 3 metros, datos de granulometría del cauce en 4 estaciones de medición (ubicadas entre las estaciones fluviométricas), y un registro fotográfico del cauce adquirido durante la etapa de inspección y validación en terreno.

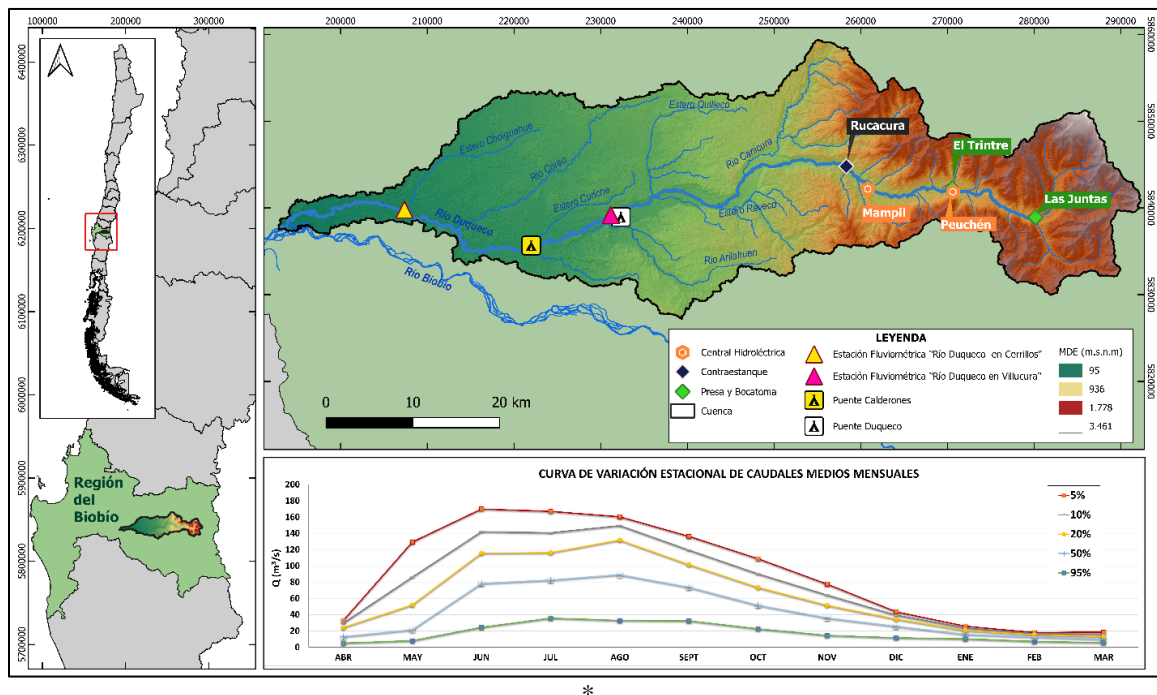


Figura 1. Área de estudio, cuenca del río Duqueco. La curva de variación estacional, es construida a partir de los registros fluviométricos de la estación “Río Duqueco en Villucura” entre 1987 y 2019, adquiridos de la Dirección General de Aguas (DGA).

2.2 Procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes satelitales permite generar objetos geográficos unitarios relevantes para el análisis, con mayor eficacia que una delimitación manual. Estos objetos son: el canal activo del río Duqueco de aguas altas, barras, islas, y elementos fluviales de la llanura de inundación. En el software ENVI-IDL 5.6, se construye un mosaico multispectral de la cuenca en condición de aguas altas (30/06/2019 al 05/07/2019) y aguas bajas (29/01/2019 al 31/01/2019), y se calcula el índice de agua de diferencia normalizado (NDWI) (McFeeters, 1996), que distingue las zonas con agua de aquellas con suelo seco y vegetación, influenciado por la separación espectral de estos materiales. Finalmente, se combina el procesamiento de imágenes con diferentes fechas, con escenarios de condición de aguas altas y bajas, siendo estas últimas útiles para identificar islas y barras del canal activo.

2.3 Marco de desagregación y agregación del corredor fluvial

El marco desarrollado por Alber y Piégay (2011), consiste en la delimitación y caracterización de métricas fluviales basadas en datos brutos a escala regional *e.g.* modelos de elevación digital, fotos aéreas, mapas antiguos, entre otros insumos (Figura 2). Posee cuatro grandes pasos que se explican a continuación:

Objetos geográficos unitarios (UGO): son las unidades espaciales lineales y poligonales que delimitan componentes biofísicos. En este trabajo se extraen las siguientes unidades: canal activo y su envolvente; unidades geomorfológicas del lecho (barras e islas) y de la

llanura de inundación (paleocauces, meandros cortados, etc.); llanura de inundación; y las líneas centrales del canal activo y llanura de inundación.

Objetos geográficos desagregados (DGO): son los UGO discretizados longitudinalmente. En este caso se realiza la segmentación cada 50 metros, sobre el eje de la línea central de la envolvente del canal activo, establecido en base a una relación 1:1 con el ancho promedio del cauce activo.

Métricas a escala local: se calculan atributos del corredor fluvial y su llanura de inundación de forma sistemática en cada DGO. Entre ellas se puede encontrar: ancho de la llanura de inundación y la envolvente del canal activo, número de canales activos, sinuosidad, área de drenaje, elevación, pendiente, forma en planta, grado de confinamiento y causa, material del lecho y potencia de la corriente específica.

En el caso particular de la forma en planta, se aplica el algoritmo desarrollado por Nardini y Brierley (2021), que automatiza la identificación de la forma en planta, al evaluar el grado de similitud de cada segmento con un arquetipo, estos prototipos son una versión modificada del esquema de clasificación de Kleinhans y Van den Berg (2011), para adaptarse al marco *River Style*.

Objetos geográficos agregados (AGO): Son segmentos del cauce que guardan un grado de homogeneidad con respecto a un atributo. En particular, se obtienen tramos del río, que son la escala de análisis que se utiliza de aquí en adelante, al interceptar los AGOs de la forma en planta y el material del lecho.

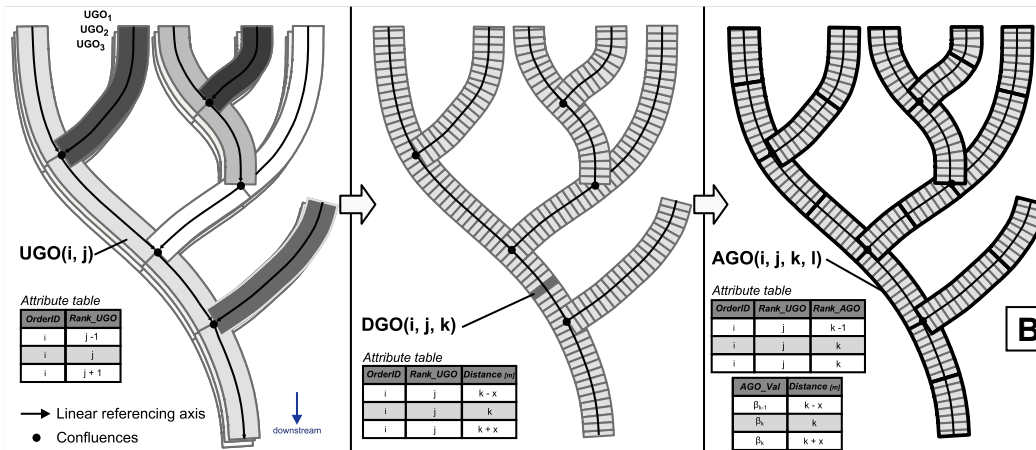


Figura 2. Esquema del marco de desagregación y agregación (Alber y Piégay, 2011)

2.4 Marco River Styles: Etapa 1

La primera etapa del marco *River Styles* contempla conocer el carácter y comportamiento del río a través de la definición y caracterización de los estilos fluviales. Para esto, se evalúan los atributos del árbol procedimental de la Figura 3 en cada tramo del río. Este árbol es una versión simplificada del original propuesto por los autores Brierley y Fryirs (2005), Nardini *et al.* (2020a), Fryirs y Brierley (2018).

- Confinamiento: se determina el porcentaje de contacto entre el canal activo y la llanura de inundación, con el cual se cataloga al tramo del cauce como: confinado, parcialmente confinado o lateralmente no confinado.
- Causa del confinamiento: en base a interpretación visual se discretiza si la causa del confinamiento del río se debe a una forma aluvial (terrazas, abanicos, etc.), al valle (la misma topografía, cerros o valles) o a la intervención humana (puentes, defensas fluviales, carreteras).
- Forma en planta: se clasifica el cauce según los arquetipos de forma en planta definidos por Nardini y Brierley (2021), el proceso se realiza a través de un algoritmo que reúne métricas locales del cauce, para luego otorgar un puntaje, según el grado de similitud con cada tipo de forma en planta.
- Material del lecho: a partir de datos de granulometría obtenidos en la ribera del río Duqueco en cuatro sectores distribuidos aguas abajo de la estación fluviométrica “Río Duqueco en Villucura” y fotografías del lecho del río, se asigna una clase a cada tramo según la clasificación de Wentworth (1922).
- Unidades geomórficas (UG): se evalúa la presencia de barras e islas en los DGO, con un atributo binario 1/0, para presencia/ausencia, y luego se determina a mayor escala si la presencia de ellos es significativa para cada tramo del río.

El conjunto de atributos antes descrito es sometido a una clasificación no supervisada (*clúster*), por medio de la herramienta “*Attribute based clustering*” de QGIS, la que genera grupos con la misma combinación de atributos, denominados estilos fluviales (*River Styles*).

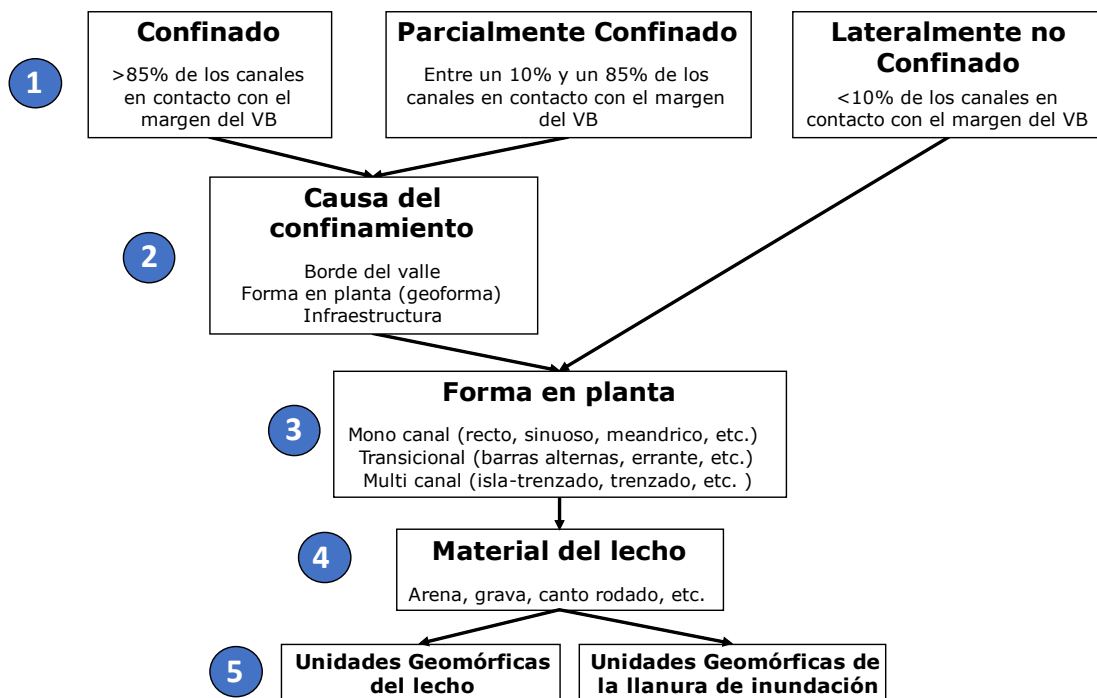


Figura 3. Árbol procedimental modificado del marco *River Styles* (Modificado de Nardini et al., 2020a)

2.5 Semiautomatización del proceso mediante South Rivers Toolbox

La cantidad de atributos que se ha descrito en los numerales anteriores y que deben ser determinados a lo largo del cauce, implican mucho tiempo y esfuerzo. De esta forma, si se establecieran únicamente con mediciones manuales, la caracterización geomorfológica bajo el marco River Style sería absolutamente impracticable para grandes cuencas hidrográficas. Recientemente en 2020, a través de la publicación de un importante conjunto de trabajos en el río Magdalena – Colombia, enmarcados en el proyecto GeoMagda, financiado por la ONG–The Nature Conservancy, se evaluaron distintos algoritmos y programas de análisis morfométricos con diferentes enfoques, allí se compararon las mejores herramientas utilizadas a nivel mundial en la extracción de métricas fluviales. Para ello, se utilizaron sensores remotos y técnicas SIG, el desarrollo de algunas mejoras por parte de los autores del estudio y desarrollos propios programados en Python. Estas readecuaciones, permitieron generar una herramienta inédita para el diseño y programación de un toolbox integral, compuesto por una secuencia de herramientas orientado a la implementación del marco *River Styles* de forma semiautomatizada, minimizando en lo posible, el criterio de experto (Nardini et al., 2020a, 2020b, 2020c). En este contexto, se ha desarrollado la caja de herramientas denominada South Rivers Toolbox (SRT), que contiene diversas funciones para semiautomatizar el proceso, permitiendo la reducción considerable de los tiempos de trabajo, asegurando una visión holística y objetiva en el cálculo de los parámetros fluviales, así como también la posibilidad de replicar los análisis en cualquier otro río. Actualmente, es de código abierto y se encuentra disponible como complemento experimental para QGIS, en el repositorio: <https://github.com/vosores/SouthRiversToolbox>.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de las métricas locales del río Duqueco, es posible visualizar la variación de estas a lo largo del cauce y cómo interactúan las variables pendiente, elevación, área de drenaje, ancho de la llanura de inundación y del canal activo, confinamiento, potencia de la corriente específica, entre otras.

En el primer y segundo gráfico de la Figura 4, es posible visualizar cómo el área de drenaje (y por ende el caudal del cauce) aumenta de forma escalonada debido a la entrada de los principales tributarios. En cuanto a la pendiente, esta es fuerte en los primeros 36 kilómetros, con valores que alcanzan los 0,15 m/m, luego disminuye progresivamente hasta la confluencia con el río Biobío. En base a lo anterior, la potencia específica del cauce que depende de la pendiente y del caudal del cauce, alcanza sus mayores valores en la zona media-alta del cauce, donde la combinación de estas variables es máxima.

Por otro lado, el tercer gráfico de la Figura 4, muestra el ancho de la llanura de inundación y la clasificación del confinamiento, con una llanura aluvial muy estrecha en el nacimiento del cauce, prácticamente confinada en toda su extensión hasta el kilómetro 42, de aquí hacia aguas abajo se pierde el confinamiento, permitiendo una mayor extensión a la llanura aluvial, y más libertad de movimiento del cauce.

En segundo lugar, producto de la clasificación no supervisada que agrupa los atributos del cauce, resultan 43 estilos fluviales principales y 57 estilos complementarios, los cuales se muestran en la Figura 5. Del análisis de sus longitudes se desprende que, el 56,9% de los estilos fluviales se caracteriza por una forma en planta de tipo monocal, un 37,4% canal de tipo transición y solo un 5,6% de tipo multicanal, como ayuda visual se representaron todos los estilos fluviales mono canal y de transición en tonalidades verde y azul y, el multicanal en tono rojo, por lo que se puede apreciar gráficamente la predominancia de los dos primeros sobre los pequeños tramos multicanal.

En coherencia con los resultados locales, los estilos fluviales 11 y 12 (ambos monocal) que predominan en la zona alta, se encuentran completamente confinados por el valle, y aguas abajo ya fuera de la zona acordonada por los valles, el estilo fluvial 10, también de tipo monocal se presenta confinado en contactos con terrazas aluviales de la zona.

Los estilos fluviales de tipo transición, predominan los estilos 23, 28 y 29, siendo todos ellos de forma en planta *Wandering*, caracterizados por prevalecer el tipo monocal, con alta frecuencia de barras laterales, un brazo dominante y ausencia de ensanchamientos bruscos de la envolvente de canales.

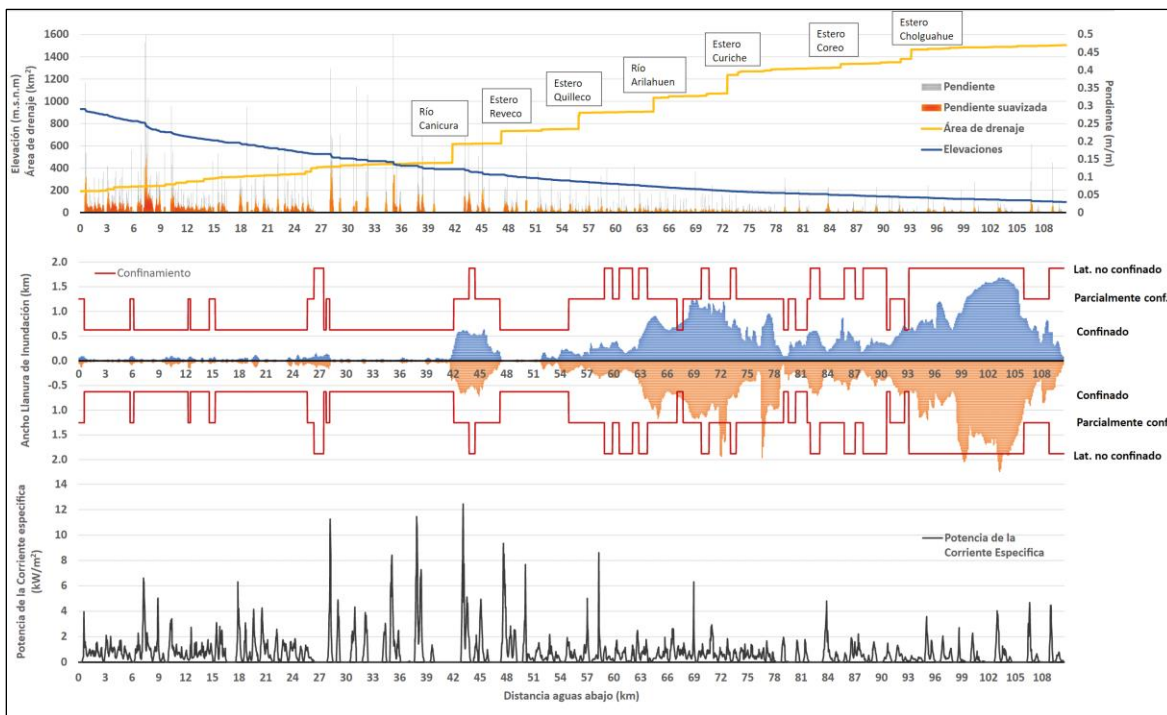


Figura 4. Evolución espacial de las métricas locales a lo largo del río Duqueco.

Finalmente, en las pocas zonas con estilos fluviales multicanal, predomina el estilo 41, caracterizado por la forma en planta de *Anabanching*, el cual se caracteriza por tener canales bastante separados, con uno de los brazos dominante, alta densidad de islas y poca o nula presencia de barras.

Globalmente, se puede clasificar al río en 3 zonas:

Río Duqueco en zona alta: se caracteriza por la presencia de los estilos fluviales 11 y 12, ambos son muy similares, caracterizan al río como totalmente confinado, con forma en planta de mono-canal de sinuosidad confinada, no hay presencia importante de ningún tipo de unidad geomórfica y el lecho del cauce está caracterizado por cantos rodados y bloques, diferenciándose únicamente por la causa del confinamiento, mientras en la zona más alta el cauce (estilo 11) se encuentra limitado por las laderas de la cordillera de los Andes, aguas abajo las laderas comienzan a distanciarse y el estilo 12 se encuentra confinado por terrazas. En cuanto a su comportamiento, la potencia de la corriente específica no tiene validez en la zona intervenida por las presas. Aun así, el alto valor de la pendiente, y baja presencia de unidades geomórficas, la identifican como una zona de transporte de sedimentos. En la zona aguas abajo del contraembalse se encuentran los valores más altos de la potencia de la corriente específica, lo que la hace una zona de alta erosión y transporte de sedimentos, pero debido al confinamiento de la zona, el río tiene muy poco o nulo espacio para ajustarse, por lo que es poco sensible a sufrir cambios luego de un evento extremo.

Río Duqueco en zona media: zona comprendida entre el primer ensanchamiento de la llanura de inundación hasta el puente Duqueco. Se caracteriza por la presencia mayoritaria de los estilos fluviales 10, 23, 28 y 29. A partir de esta zona, el lecho es solo de cantos rodados, sigue mayoritariamente confinado por terrazas, pero aparecen los primeros segmentos no confinados o parcialmente confinados (*e.g.* estilos fluviales 23, 28 y 29). La forma en planta prevalece el monocanal sinuoso confinado para el estilo 10, y transicional para los demás estilos, por la presencia de barras, que se acentúa en la zona cercana al puente Duqueco. Respecto al comportamiento, el potencial de la corriente específica alcanza sus mayores valores en el inicio de la zona media, al igual que la zona alta, estos puntos se encuentran confinados, por lo que la erosión no afecta la forma del río (migraciones laterales). Solo existe un punto con alta energía de corriente específica ubicado en las cercanías del puente Duqueco, que no se encuentra confinado (estilo 23), por lo que tiene libertad de ajustar su forma en el largo plazo o durante eventos extremos.

Río Duqueco en zona baja: es la zona más extensa que va desde el puente Calderones hasta la confluencia con el río Biobío. Se caracteriza por la presencia mayoritaria de los estilos fluviales 23, 28 y 29 como canales transicionales, con la aparición puntual del estilo 41 multicanal. A partir de esta zona hay un marcado ensanche de la llanura de inundación, se encuentra en mayor parte no confinado, y aumentan los segmentos multicanales, aunque sigue prevaleciendo el mono-canal. La variedad de estilos fluviales es mucho más amplia, debido a la mayor frecuencia de UG que dan paso a segmentos de transición o multicanales. En cuanto a su comportamiento, es más propensa a ajustes en la forma en planta del río, por ser en gran parte no confinada y poseer la libertad del movimiento. Por otro lado, el potencial de la corriente específica tiene un valor bajo, por lo que es una zona de sedimentación (de ahí la gran formación de UG).

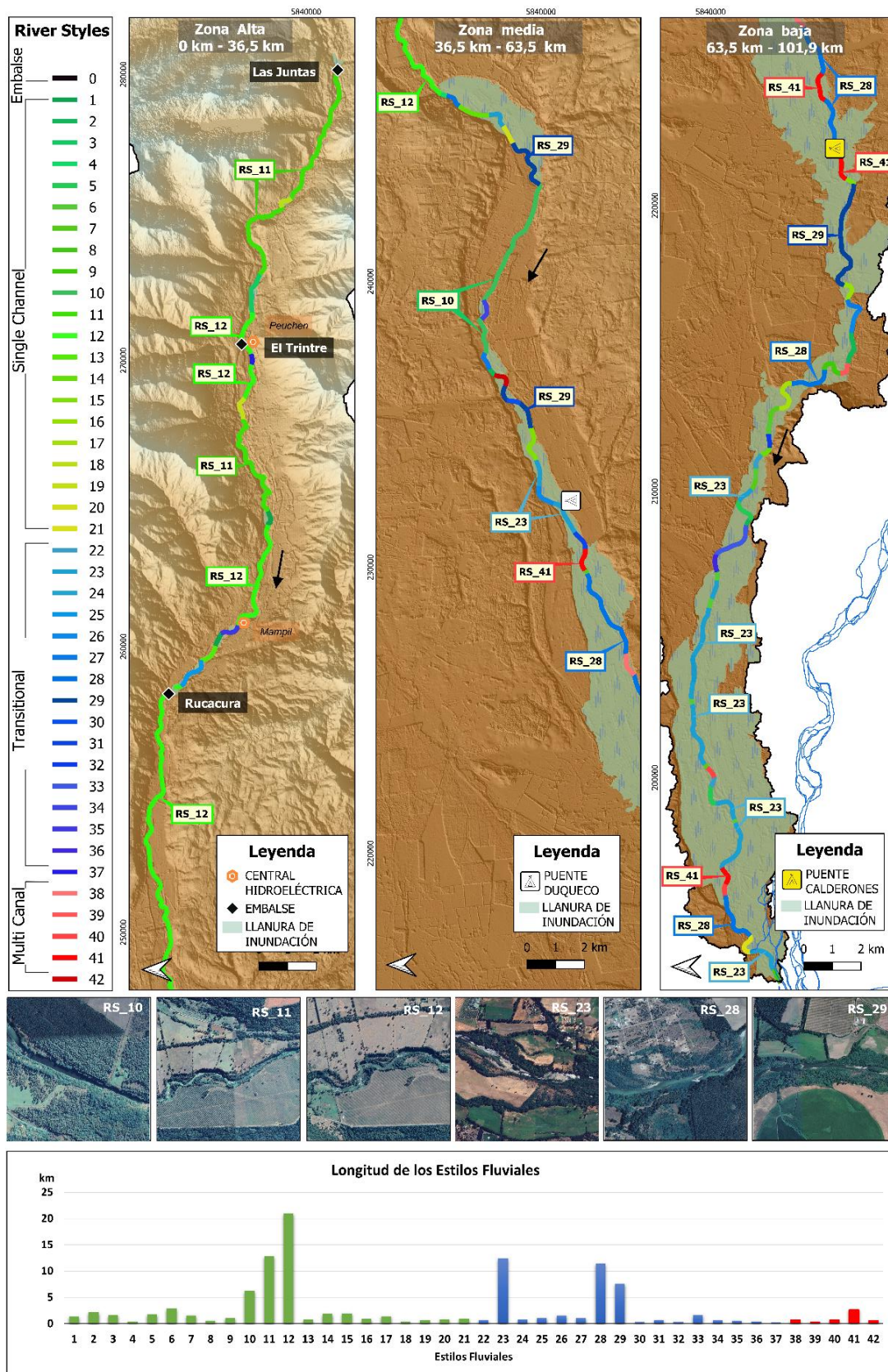


Figura 5. Distribución de estilos fluviales en el río Duqueco

4. CONCLUSIONES

La aplicación del marco de agregación y desagregación permite la obtención de los atributos hidromorfológicos del río Duqueco, a distintas escalas espaciales, de forma semi-automatizada, gracias al conjunto de herramientas que fuera desarrollado por los autores de este estudio, denominado *South Rivers Toolbox*, con criterios objetivos, que proporcionan un mayor grado de seguridad y menor subjetividad al compararse con un análisis netamente basado en juicio experto (haciéndolo replicable para otros usuarios).

Particularmente, los atributos hidromorfológicos más simples son el ancho del canal, el número de canales, la sinuosidad y el confinamiento local, todos automatizados por herramientas de SRT. Su buen desempeño en el cálculo depende solamente de la delimitación de los objetos geográficos unitarios. Por otro lado, los atributos de elevación, pendiente, área de drenaje y potencial de la corriente específica, tienen la dificultad de requerir el “quemado” del DEM en una etapa anterior, lo que genera un grado de inexactitud en las medidas, que para efectos prácticos es despreciable.

En el caso de la potencia de la corriente específica, es llamada “gruesa”, por carecer del dato de caudal *bankfull* a lo largo del río, y realizar una estimación en base a la relación empírica entre el caudal y el área de drenaje. Se concluye que, a pesar de la falta de precisión en su estimación, entrega una tendencia sobre las zonas erosivas, dato que es fundamental para entender el comportamiento del río.

Respecto a la configuración en planta, la planilla programada en Excel predice asertivamente su forma en la mayor parte de las secciones del cauce, con pequeñas correcciones manuales y juicio experto. Esto permite concluir que, a pesar de requerir una gran cantidad de datos de entrada, estos son fáciles de cuantificar y el resultado final es confiable, objetivo y sobre todo replicable.

Siguiendo con los atributos hidromorfológicos, pero esta vez calculados sobre los tramos homogéneos del río, el confinamiento se obtiene de forma totalmente automatizada con las herramientas del SRT, su causa, aunque requiere procedimientos manuales y criterio propio, es un proceso innovador que no se ha implementado en ningún otro algoritmo hasta el momento, por lo que tiene un valor agregado. Finalmente, el material del lecho al no contar con datos de la granulometría a lo largo de todo el corredor fluvial se supuso igual en toda la zona baja, en base a 4 estaciones donde fue calculada la granulometría (utilizando para ello técnicas tradicionales de conteo), mientras para la zona más alta, se utilizó un chequeo visual en terreno basado en un registro fotográfico, a lo largo de todo el canal activo del río. Actualmente, el equipo de trabajo se encuentra desarrollando nuevas metodologías a partir del análisis de ortomosaicos usando técnicas de SFM (Structure From Motion) con cámaras RGB de alta resolución acoplados a drones a baja altura, para estimar la granulometría en barras expuestas del cauce activo, de manera de aumentar el número de estaciones de medición precisas y de forma rápida y eficiente, al cuantificar la granulometría usando estas imágenes dentro del programa BaseGrain en Matlab (Detert & Weitbrecht, 2012).

La validación de los atributos se realiza principalmente a partir de las imágenes satelitales (nanosatélites Planet), donde se comprueba de forma visual, que los resultados del ancho del

canal, número de canales, sinuosidad, confinamiento y su causa, forma en planta y presencia de UG, resultan coherentes con lo que se observa en las imágenes. El área de drenaje es validada con la coincidencia entre los aumentos bruscos del área de drenaje, y la llegada de los principales tributarios al río Duqueco. Finalmente, el ancho de la llanura de inundación depende de la delimitación precisa del polígono de la llanura de inundación, siendo calibrado y validado mediante un mapa de inundación (Asociación de Municipalidades de la Región del Biobío, AMRBB, 2015), un mapa geológico (Servicio Nacional de Geología y Minería, Sernageomin, 2000) y perfiles de elevación transversales al cauce.

Con la implementación de la primera etapa del marco River Style sobre el río Duqueco, se determinaron 43 estilos fluviales principales y 57 estilos complementarios, que informan del carácter y comportamiento del río. En cuanto al carácter del río, la zona más alta presenta estilos fluviales completamente confinados, por el valle de la cordillera Andina y terrazas aluviales, mono-canal, con lecho de cantos rodados y bloques. La zona media, mayoritariamente confinada y mono-canal, con un cambio en el tipo de lecho a cantos rodados. Finalmente, la zona baja es más diversa en estilos, mayoritariamente no confinada, con alta presencia de UG que dan paso a las zonas multicanales y de transición. En cuanto al comportamiento del río Duqueco, se caracteriza por una alta tasa de transporte de sedimentos en la zona alta y media-alta de la cuenca, hasta la zona del puente Duqueco mientras que en la parte baja de la cuenca, la energía de la corriente disminuye, baja el transporte de sedimentos y aumentan progresivamente las áreas de depositación. El confinamiento restringe el movimiento lateral del río, en la zona alta y media-alta, mientras que lo libera en la zona más baja. Se concluye que, la zona cercana al puente Calderones (Figura 1), es una de las más críticas al presentar un alto potencial de corriente específica y no encontrarse confinada. Esto coincide con la evidencia existente de la inundación que se produjo en Julio del año 2006, con la pérdida de conectividad del puente, y el anegamiento de los vecinos del sector Llano Blanco (aguas abajo del puente Calderones).

Este trabajo aporta a la meta de incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales, al tratarse de una herramienta que permitirá evaluar la geomorfología de los ríos y en concreto, las zonas propensas a sufrir cambios. Contribuyendo así a una mejor gestión de los cauces y apoyo en la mitigación de afectación de obras hidráulicas, ante el incremento de escenarios extremos ligados al cambio climático. Esto último vinculado al objetivo de desarrollo sostenible para “adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”.

En resumen, podemos decir que este enfoque modificado de la clasificación *River Styles* que estamos proponiendo no sólo organiza el río con características geomorfológicas similares, sino que proporciona un marco conceptual y de trabajo para comprender la complejidad del continuo fluvial y los efectos de la cuenca aguas abajo sobre la ecología, además de su usabilidad como una herramienta de apoyo importante para otras interrogantes científicas como la evaluación del riesgo de inundación. La clasificación de estos estilos fluviales representa un ajuste dinámico en términos del flujo líquido y sólido, pero también de la energía para transferir este material aguas abajo. Este ajuste del río a estas condiciones da lugar a una morfología de cauce específica para cada estilo fluvial, y en consecuencia la modificación de esta morfología repercute, en menor o mayor medida, en el ajuste

geométrico del cauce diseñado por el río, alterando el equilibrio y por tanto las condiciones naturales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento recibido a través del proyecto Innova Chile - CORFO (19BP-117424), Bienes Públicos Adaptación al Cambio Climático, titulado *South Rivers Toolbox: Modelo predictor de la morfodinámica fluvial para apoyar la gestión de cauces 2020-2023*. Asimismo, deseamos expresar nuestra gratitud a la empresa PLANET, por facilitar gratuitamente las imágenes Planet Scope (nanosatélites) utilizadas en este estudio. Adicionalmente, a la Agencia Aeroespacial Alemana - DLR con el proyecto TanDEM-X DEM GEOL08450, por proporcionar el modelo de elevación del terreno de alta resolución espacial para la cuenca del río Biobío. Finalmente, y no menos importante, quisiéramos agradecer a las funcionarias de la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP - Ing. Betsabé Gallardo e Ing. Isabel Drews representantes como institución mandante, por su valioso apoyo incondicional a lo largo de estos últimos 3 años del proyecto.

REFERENCIAS

- Alber, A., y Piégay, H. (2011) “Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France)”. *Geomorphology*, 125(3), 343-360.
- Asociación de Municipalidades de la Región del Bío Bío (2015). *Planificación Estratégica Participativa en Reducción de Riesgos de Desastres en las comunas pertenecientes a la Comisión de Municipios Ribereños del Río Bío Bío de la Asociación de Municipalidades de la Región del Bío Bío*, (No3).
- Bizzi, S., Demarchi, L., Grabowski, R. C., Weissteiner, C. J., y Van de Bund, W. (2016) “The use of remote sensing to characterise hydromorphological properties of European rivers”. *Aquatic sciences*, 78(1), 57-70.
- Brierley, G. J., y Fryirs, K. (2000) “River styles, a geomorphic approach to catchment characterization: Implications for river rehabilitation in Bega catchment, New South Wales, Australia”. *Environmental Management*, 25(6), 661-679.
- Brierley, G., y Fryirs, K. (2005) *Geomorphology and river management: applications of the river styles framework*. John Wiley & Sons.
- Brookes, A., Boon, P. J., Calow, P., y Petts, G. E. (1992). Recovery and restoration of some engineered British river channels. In Unknown Host Publication Title. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- Brookes, A. (1992) “Recovery and restoration of some engineered British river channels”, in *River Conservation and Management* (eds P.J. Boon, P. Calow and G.E. Petts), Wiley, Chichester, UK. pp. 337–352.
- Carbonneau y Piégay (Eds.). (2012). *Fluvial remote sensing for science and management*. John Wiley & Sons.
- Detert, M.; Weitbrecht, V. “Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains—A free stand-alone tool”, in *River Flow*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2012; pp. 595–600.

- Dirección General de Aguas. (1987). Balance hídrico de Chile. Santiago, Chile.
- Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo, M., Valladares, F., Ríos, A. F. y Simó, R. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, Madrid.
- Eissa, A. E., y Zaki, M. M. (2011) “The impact of global climatic changes on the aquatic environment”, *Procedia Environmental Sciences*, 4, 251–259.
- Fryirs, K. A., y Brierley, G. J. (2018) “What’s in a name? A naming convention for geomorphic river types using the River Styles Framework”, *PloS One*, 13(9).
- Gregory, K. J., Benito, G., y Downs, P. W. (2008) “Applying fluvial geomorphology to river channel management: Background for progress towards a palaeohydrology protocol”, *Geomorphology*, 98(1-2), 153-172.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.). IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp.
- Kellerhals, R., y Church, M. (1989) “The morphology of large rivers: characterization and management”. Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences/Publication speciale canadienne des sciences halieutiques et aquatiques. 1989.
- Kleinhans, M. G., y van den Berg, J. H. (2011) “River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method” *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(6), 721-738.
- McFeeters, S. K. (1996) “The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features” *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Nardini, A., y Brierley, G. (2021) “Automatic river planform identification by a logical-heuristic algorithm”. *Geomorphology*, 375, 107558.
- Nardini, A., Yepez, S., Zuniga, L., Gualtieri, C., & Bejarano, M. D. (2020a) “A Computer Aided Approach for River Styles—Inspired Characterization of Large Basins: The Magdalena River (Colombia)”. *Water*, 12(4), 1147
- Nardini, A., Yepez, S., & Bejarano, M. D. (2020b) “A Computer Aided Approach for River Styles—Inspired Characterization of Large Basins: A Structured Procedure and Support Tools”, *Geosciences*, 10(6), 231.
- Nardini, A., Yépez, S., Mazzorana, B., Ulloa, H., Bejarano, M. D., & Laraque, A. (2020c) “A Systematic, Automated Approach for River Segmentation Tested on the Magdalena River (Colombia) and the Baker River (Chile)”, *Water – Special Issue “River Evolution Research”*, 12(10), 2827.
- Orr, H. G., Large, A. R. G., Newson, M. D., y Walsh, C. L. (2008) “A predictive typology for characterizing hydromorphology”, *Geomorphology*, 100(1-2), 32-40.
- Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Bertrand, M., Bizzi, S., Carbonneau, P., Dufour S., Liébault, F., Ruiz-Villanueva, V. y Slater, L. (2020) “Remotely sensed rivers in the Anthropocene: State of the art and prospects”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(1), 157-188.
- Rojas, O. (2015). *Cambios Ambientales y Dinámica de Inundaciones Fluviales en una Cuenca Costera del Centro Sur de Chile* (Tesis Doctoral), Universidad de Concepción, Concepción.

- Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L., y Piégay, H. (2015) “FluvialCorridor: A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration”. *Geomorphology*, 242, 29-37.
- Sear, D. A. (1994) “River restoration and geomorphology”, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 4(2), 169-177.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2000). *Mapa Geológico de Chile. Escala 1:1.000.000*.
- Wentworth, C. K. (1922) “A scale of grade and class terms for clastic sediments”, *The Journal of geology*, 30(5).

ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE DISTANCIA PELIGROSA EN DEPÓSITOS DE RELAVES NO OPERATIVOS EN CHILE

KARINA MONSALVE¹, CHRISTIAN IHLE^{2,4}, ALDO TAMBURRINO^{3,4}

¹Departamento de Evaluación de Proyectos Mineros, Servicio Nacional de Geología y Minería

karina.monsalve@sernageomin.cl

ORCID: 0000-0003-4665-7668

²Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile

cfihle@uchile.cl

ORCID: 0000-0003-2669-8948

³Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

atamburr@ing.uchile.cl

ORCID: 0000-0001-5406-370X

⁴Centro Avanzado de Tecnología para la Minería, Universidad de Chile

RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivo analizar críticamente diferentes métodos planteados para la estimación de distancia peligrosa en depósitos de relaves. Para cumplir este objetivo, se desarrolla una revisión bibliográfica sobre un conjunto de métodos disponibles para realizar dicha estimación. Posteriormente, se analiza la factibilidad de aplicar los métodos en un conjunto de depósitos de prueba. Finalmente, se desarrolla satisfactoriamente la implementación computacional de los métodos identificados previamente.

La aplicación de los diferentes métodos para la estimación de distancia peligrosa ha permitido definir ventajas y limitaciones en cada uno de ellos. Los métodos analizados corresponden a aplicaciones simples, con pocos requerimientos de información o costo computacional. Aún en este caso, el conocimiento de parámetros clave del relave incluyendo la geometría del depósito, esfuerzo de fluencia del relave en la cubeta, topografía y presencia de cuerpos de agua a lo largo de la trayectoria de descarga, pueden mejorar significativamente las estimaciones obtenidas.

Respecto de los resultados obtenidos al implementar los diferentes métodos, se concluye que la metodología de Rico et al. (2008a) en forma general es la que entrega menores magnitudes de distancia peligrosa, siendo éste un método empírico basado en estadísticas a partir de fallas ocurridas a nivel mundial. Por su parte, los métodos que entregan mayores magnitudes de distancia peligrosa son las de Jeyapalan et al. (1983) y Blight y Bentel (1983). Los valores obtenidos en ambas dependen fuertemente del esfuerzo de fluencia.

Palabras claves: Relaves, distancia peligrosa, plástico de Bingham.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La minería es la actividad económica más relevante en Chile, representando más del 10% del PIB. No obstante, al igual que en el resto de los países donde se desarrolla, ha generado diversos impactos sociales y ambientales. En Chile, dichos impactos incluyen la producción de una gran cantidad de depósitos de relaves, muchos de ellos en condición de inactivos y/o abandonados, que no han tenido adecuados procesos de cierre.

El relave es un sólido finamente molido, que se descarta de los procesos de concentración de mineral en las operaciones mineras. Los relaves son transportados hasta lugares especialmente habilitados para su depositación. En la mayoría de los casos, el relave está contenido por un muro o prisma resistente construido por su fracción más gruesa o por empréstito, y en su interior o cubeta los sólidos finos sedimentan formando en la superficie la laguna de aguas claras tal como se observa en la Figura 1.

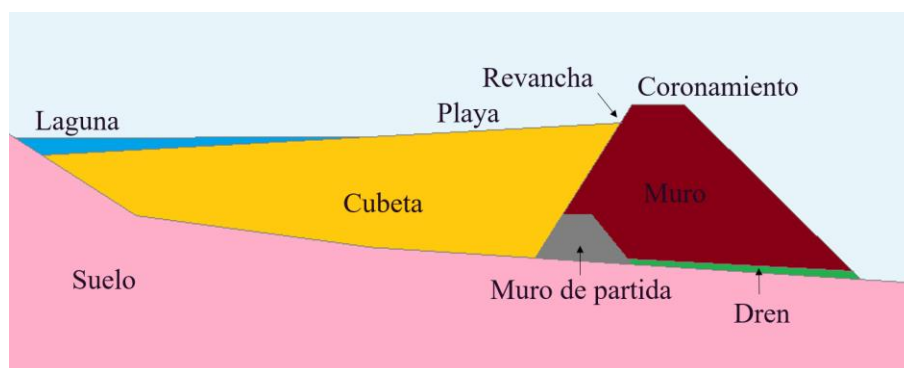


Figura 1 Estructura de un depósito de relaves convencional.

Según cifras de SERNAGEOMIN, a octubre de 2022 se tiene registro de 764 depósitos de relave. La mayor parte de éstos se encuentran en las regiones III y IV, representando un 23% y un 51% del total, respectivamente. Este mismo registro considera cinco tipos de estado: activos, inactivos, abandonados, en construcción y en revisión. A continuación se entrega una breve definición de cada estado:

- Activo:** Depósito de relaves que se encuentra en operación, y que cuenta con todas las autorizaciones que deben ser otorgadas por SERNAGEOMIN.
- Inactivo:** Depósito de relaves que ha cesado su operación, y que cuenta con las autorizaciones que deben ser otorgadas por SERNAGEOMIN.
- Abandonado:** Depósito de relaves que ha cesado su operación y que no cuenta con empresa o titular responsable.
- En construcción:** Depósito de relaves que se encuentra en fase de construcción, pero aún no inicia su fase de operación.

En revisión: Depósito de relaves que se encuentra en condición de proyecto, y en revisión por parte de las autoridades.

De acuerdo con esta clasificación, los relaves inactivos representan un 62% del total, y los relaves abandonados representan un 23% del total. Para efectos de la presente investigación, un depósito no operativo corresponde a un depósito inactivo o abandonado.

La operación de un depósito de relaves implica ciertos peligros asociados, entre los que se incluye la falla del muro del tranque generando el vaciamiento de parte o la totalidad de su contenido hacia aguas abajo del muro. En este sentido, se pueden mencionar algunos eventos de falla que han marcado la forma de hacer ingeniería en torno a los depósitos de relave a nivel internacional, como es el caso del depósito Mount Polley en Canadá el año 2014, el caso de Samarco en Brasil el año 2015, o el caso de Córrego de Feijão en Brasil el año 2019. Durante el año 2022, ya se han registrado dos fallas de depósitos de relaves a nivel internacional, un caso ocurrido en Sudáfrica en el mes de septiembre y otro caso ocurrido en Tanzania en el mes de noviembre. En Chile, también han ocurrido fallas importantes, destacando la falla del depósito El Cobre en la comuna de Nogales para el terremoto del año 1965, y la falla del depósito Las Palmas en la comuna de Penciahue para el terremoto del año 2010.

La normativa que regula el diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves es el Decreto Supremo N°248 (DS N°248), vigente desde abril del 2007. En éste, se define la distancia peligrosa como la distancia, en kilómetros, que recorrería el relave en el caso de colapso del depósito (Ministerio de Minería, 2007). Este decreto establece entonces la necesidad de conocer de manera aproximada el área sobre la cual los relaves fluirían, ante un eventual colapso de la estructura principal, de modo de generar medidas preventivas que reduzcan el potencial impacto. Sin embargo, el decreto no establece un método específico que permita la estimación de la distancia aguas abajo que afectaría un posible colapso de la estructura, quedando a criterio de la compañía minera la manera de determinarla.

En general, las grandes empresas mineras realizan modelaciones asociadas a los estudios de rotura (dam break analysis), siguiendo estándares internacionales (ej. CDA) y utilizando avanzados softwares de modelación. Por su parte, las empresas mineras pequeñas y medianas utilizan cualquiera de los métodos disponibles en la literatura, obteniendo resultados tan variables como el origen del método utilizado.

Entre los métodos publicados para la estimación de distancia peligrosa, es posible nombrar los propuestos por Lucia et al. (1981), Rico et al. (2008a) y Concha y Lall (2018), desarrollados de manera empírica y de fácil implementación. Por otro lado, se tienen los métodos de Jeyapalan et al. (1983), Blight y Bentel (1983) y Hungr (1995), basados en métodos numéricos y que requieren una cantidad mayor de datos de entrada y una mayor capacidad computacional que los primeros.

El Estado tiene la responsabilidad de velar por la seguridad de la población a través del establecimiento de normativas específicas. De esta forma, el DS N°248, publicado el año 2007, regula la construcción de depósitos de relave. Por su parte, el Decreto 132, publicado el año 2002, correspondiente al Reglamento de Seguridad Minera, en su título X entrega regulaciones para el cierre de depósitos de relaves. Finalmente, el año 2011 se promulgó la Ley 20551, que regula de forma exclusiva el cierre de faenas e instalaciones mineras. A la fecha de publicación de las distintas normativas mencionadas, el número de depósitos de relaves no operativos era cuantioso, y la capacidad de fiscalización del estado ha priorizado sus esfuerzos en los depósitos en operación.

Los depósitos de relaves no operativos pertenecen mayoritariamente a la pequeña y mediana minería, donde los estándares de control y monitoreo durante la construcción, operación y cierre son muchas veces insuficientes para asegurar la estabilidad física de las instalaciones. En particular, Rico et al. (2008b), basados en estadísticas mundiales indican que la mayor cantidad de fallas se presentan en depósitos de relaves que poseen muros con una altura inferior a 30 m.

Sumando a lo anterior, entre principios del siglo XX y el año 2013 se ha reportado un total de 38 casos de fallas en depósitos de relaves en Chile, provocados principalmente por licuación sísmica. Estos casos se produjeron en depósitos con muros de arena construidos bajo el método aguas arriba, de alturas menores a 40 m, en estado de operación (53%) o abandonados (47%), y asociados a la industria minera de mediana escala (Villavicencio et al., 2014).

Frente a la situación planteada, surge la necesidad de estudiar la posibilidad de determinar con información pública disponible, la distancia peligrosa y la trayectoria del flujo más probable, ambas asociadas a depósitos de relaves no operativos. El presente trabajo de investigación busca determinar la factibilidad de aplicación asociada a la estimación de distancia peligrosa en depósitos de relaves no operativos utilizando los métodos anteriormente mencionados, y finalmente determinar la distancia peligrosa en un conjunto de depósitos de relaves no operativos de Chile.

2. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE DISTANCIA PELIGROSA

Dentro del conjunto de métodos publicados para la estimación de distancia peligrosa, se encuentran el método de Rico et al. (2008a), Concha y Lall (2018), y Lucia et al. (1981) los cuales se desarrollan de manera empírica. En contraste, los métodos de Jeyapalan et al. (1983), Blight y Bentel (1983) y Hungr (1995) están basados en la aplicación de principios de mecánica de medios continuos. En las subsecciones a continuación se describen brevemente cada una de estos métodos.

2.1 Método de Rico et al. (2008a)

El estudio realizado por Rico et al. (2008a) recopila información disponible de 29 fallas históricas de depósitos de relaves, con el propósito de establecer una correlación simple entre los parámetros geométricos (altura de muro, volumen del relave contenido) y las características hidráulicas de la inundación resultante a partir del relave liberado. De esta forma, se obtienen dos correlaciones presentadas en las ecuaciones (1) y (2).

La primera correlación obtenida relaciona el volumen liberado con el volumen contenido en el depósito tal como se presenta en la ecuación (1).

$$V_F = 0,354 \times V_T^{1,01} \quad (1)$$

$$R^2 = 0,86$$

En la ecuación (1), V_F es el volumen de relaves liberado y V_T es el volumen total del depósito de relaves, ambos términos en Mm^3 .

Luego, la distancia peligrosa se relaciona con el factor de embalse el cual equivale a la multiplicación de la altura del depósito y el volumen liberado, tal como se presenta en la ecuación (2).

$$L = 1,61 \times (HV_F)^{0,66} \quad (2)$$

$$R^2 = 0,57$$

En la ecuación (2), H es la altura del depósito en m y L es la distancia peligrosa en km.

Los autores indican que los resultados obtenidos en el estudio deben ser tratados con precaución debido a la incertidumbre en la evidencia documentada y debido a la diversidad de los depósitos de relaves. Sin embargo, la regresión propuesta provee una primera aproximación para evaluar algunos parámetros de riesgos en depósitos de relaves con falta de información o previo a estudios más detallados.

2.2 Método de Concha y Lall (2018)

El estudio realizado por Concha y Lall (2018) realiza una actualización de la base de datos de fallas históricas de depósitos de relaves utilizada en el estudio de Rico et al. (2008a).

La primera correlación obtenida relaciona el volumen liberado con el volumen total del depósito de relaves a través de la ecuación (3).

$$V_F = 0,332 \times V_T^{0,95} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,887$$

En la ecuación (3), V_F es el volumen de relaves liberado y V_T es el volumen total del depósito de relaves, ambos términos en Mm^3 .

Adicionalmente, define matemáticamente el término “predictor” (H_f), tal como se presenta en la ecuación (4), el cual considera la energía potencial asociada con la fracción del volumen liberado, en contraposición con el volumen total del depósito de relaves.

$$H_f = H \left(\frac{V_F}{V_T} \right) V_F \quad (4)$$

En la ecuación (4), H es la altura del depósito en m.

Por último, la distancia peligrosa se define en función del predictor (H_f), a través de la ecuación (5).

$$L = 3,04 \times H_f^{0,545} \quad (5)$$

$$R^2 = 0,658$$

En la ecuación (5), L es la distancia peligrosa en km.

Respecto de este estudio, Concha y Lall (2018) dan cuenta del carácter empírico de sus ajustes, en ausencia de información clave como, por ejemplo, la cuantificación del volumen de agua atrapada en el depósito, el carácter de la falla observada y el valor de la reología representativa del relave embalsado.

2.3 Método de Lucia et al. (1981)

El estudio de Lucia et al. (1981) se realizó en base a la información recopilada de un conjunto de 25 fallas históricas de depósitos de relaves. La revisión de casos históricos indica que los suelos licuados pueden mantenerse estables en pendientes suaves. Por ello, se plantea una sección transversal idealizada como se muestra en la Figura 2.

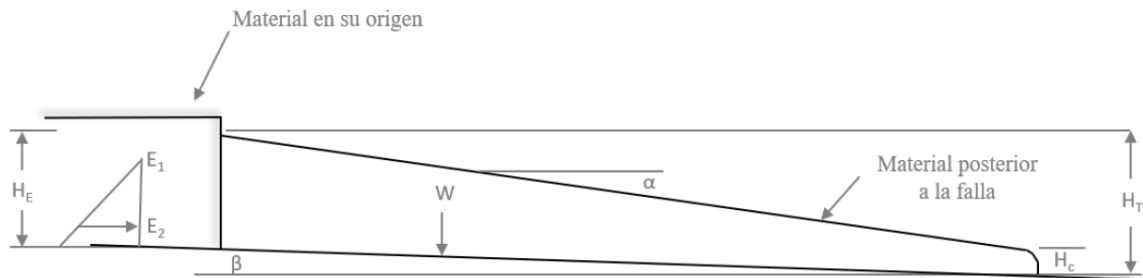


Figura 2 Sección transversal idealizada (Lucia et al. 1981).

Bajo una serie de condiciones, se establece la ecuación de estabilidad de forma adimensional.

$$\frac{W}{\gamma H_T^2} \sin \beta - \frac{S_u L}{\gamma H_T^2 \cos \beta} + \frac{E_2}{\gamma H_T^2} \cos \beta - \frac{E_1}{\gamma H_T^2} \cos \beta = 0 \quad (6)$$

En la ecuación (6), W es el peso total del relave propagado, γ es el peso unitario del relave (densidad promedio multiplicada por la aceleración de gravedad), β es la pendiente del terreno, S_u es la resistencia al corte residual del relave, L es el largo de la propagación del relave, E_1 es el empuje en 1 y E_2 es el empuje en 2.

Posteriormente, el método plantea un algoritmo de resolución de la ecuación para la estimación del término L .

2.4 Método de Jeyapalan et al. (1983)

El estudio realizado por Jeyapalan et al. (1983) presenta un procedimiento analítico para evaluar el daño causado por una falla de un depósito de relaves, en base a la predicción de las características del flujo y la magnitud de su movimiento. Para ello, indica que el modelo de fluidos de los flujos de relaves licuados se aproxima a un plástico de Bingham, el cual posee un esfuerzo de fluencia (τ_y) y una viscosidad plástica (η_p).

El estudio describe el flujo al recorrer un plano inclinado y valles prismáticos en base a las ecuaciones de conservación de momentum y masa. Además, supone un comportamiento laminar.

2.5 Método de Blight y Bentel (1983)

El estudio presentado por Blight y Bentel (1983) describe y analiza diferentes aspectos del comportamiento de un lodo. Uno de estos aspectos refiere al flujo del lodo después de la rotura de un depósito. En este contexto, proponen la ecuación (7) para el cálculo de distancia peligrosa.

$$\frac{L}{H} = \frac{1}{\frac{\tau}{\rho g H} \cdot 2(1 - 2 \sin \beta) - \sin \beta} \quad (7)$$

En la ecuación (7) se presenta la relación entre la longitud del flujo (L) y la profundidad del lodo al momento de la ruptura (H) para valores dados de esfuerzo de fluencia (τ), densidad (ρ), y el gradiente topográfico (β).

La base de aquel análisis se muestra en la Figura 3. Se supone que el lodo fluye y la pendiente de su superficie disminuye hasta alcanzar un equilibrio entre la presión del fluido ejercida por el lodo retenido al momento de la ruptura (de profundidad H) y el esfuerzo de fluencia a lo largo de la base de la cuña de deslizamiento del lodo. En esta etapa, el movimiento cesa. La altura de la cuña será la altura en la cual el banco de lodo se mantendrá sin soporte.

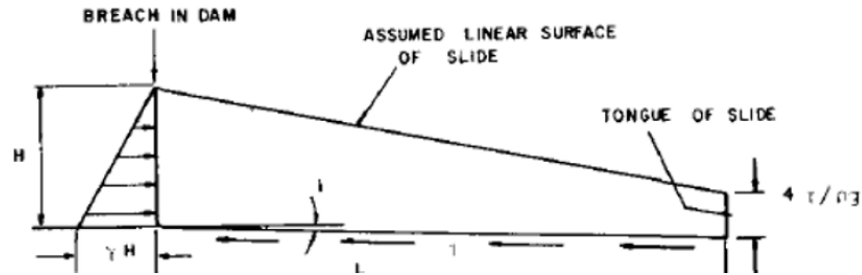


Figura 3 Diagrama esquemático para la falla de un depósito (Blight y Bentel, 1983).

2.6 Método de Hungr

Hungr (1995) desarrolla un modelo para simular las características de deslizamientos rápidos en flujos de detritos, avalanchas, fallas por licuefacción a gran escala, y deslizamientos de rellenos de residuos mineros.

El modelo está basado en la solución lagrangiana de las ecuaciones de movimiento y permite la selección de una variedad de materiales cuya reología puede variar a lo largo de la zona de deslizamiento, o al interior de la masa que se desliza.

Adicionalmente, presenta una solución aproximada en base al balance de energía.

2.6.1 Solución aproximada de energía

La solución relaciona un problema simple de ruptura de un depósito, ilustrado en la **Figura 4**, y considera un segmento de ancho unitario. El depósito decansa en una base horizontal, tiene una altura inicial H , y retiene un depósito con una longitud inicial x_0 . El contenido del depósito o volumen por unidad de ancho, $V = Hx_0$, se licua instantaneamente y alcanza un esfuerzo de fluencia constante en estado estable, τ_y . El material fluye y se detiene con una coordenada frontal, x_f , y una profundidad máxima, H_f . El perfil final de flujo se supone como una parábola. Ésta es una aproximación, basada en la teoría de ondas rodantes en medios plásticos.

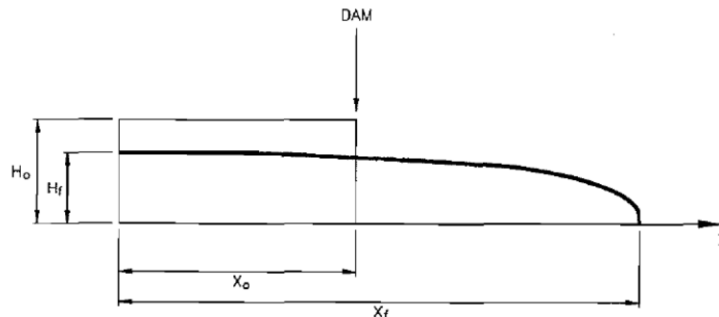


Figura 4 Problema de ruptura de un depósito en un fluido plástico (Hungr, 1995).

El volumen inicial y final es igual representado por medio de la ecuación (8).

$$V = Hx_0 = \frac{2}{3}H_f x_f \quad (8)$$

El desplazamiento vertical del centro de gravedad del material se representa por la ecuación (9).

$$\Delta h = \frac{H}{2} - \frac{3}{8}H_f \quad (9)$$

La energía potencial perdida por unidad de ancho se representa por la ecuación (10).

$$\Delta E = \gamma H x_0 \Delta h \quad (10)$$

Por último, el trabajo realizado por el esfuerzo de fluencia que actúa en la base del flujo se representa por la ecuación (11).

$$W = \frac{\tau_y}{4} (x_f^2 - x_0^2) \quad (11)$$

Igualando la pérdida de energía potencial y el trabajo realizado, es posible calcular el valor de x_f y con ello la distancia peligrosa.

3. FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS

La factibilidad de aplicación de los métodos descritos se debe realizar en base a los parámetros de entrada de cada uno. La Tabla 1 resume los parámetros de entrada que requiere cada uno de estos métodos.

Luego, se debe analizar la información disponible para cada parámetro de entrada, la que se presenta a continuación:

Altura: La información de altura proviene de dos fuentes de información. En primer lugar, estimaciones registradas en informes de terreno elaborados por SERNAGEOMIN. En segundo lugar, para los casos que no se cuenta con información de terreno, se realiza una estimación en base a información topográfica satelital proveniente del modelo Aster Global Digital Elevation Model (ASTGTM) V002 (U.S. / Japan ASTER Science Team, 2011). Este modelo de elevación digital (DEM) de 60 km por 60 km, posee una precisión vertical de error cuadrático medio entre 10 m y 25 m.

Volumen almacenado: La fuente de información de este parámetro de entrada corresponde al catastro 2019 de SERNAGEOMIN, particularmente la descripción de volumen aprobado.

Largo: Se realiza una estimación por medio del Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS.

Tabla 1 Parámetros de entrada requeridos por cada formulación descrita.

		Rico et al. (2008a)	Concha y Lall (2018)	Lucia et al. (1981)	Jeyapalan et al. (1983)	Blight y Bentel (1983)	Hungr (1995)	Hungr (1995)**
Altura	H	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Volumen almacenado	V_T	✓	✓				✓*	
Ancho	-						✓*	
Largo	-						✓*	✓
Peso unitario	γ			✓	✓	✓	✓	✓
Esfuerzo de fluencia	τ_y				✓	✓	✓	✓
Viscosidad plástica de Bingham	η_p				✓		✓	
Resistencia al corte residual	S_u			✓				
Ángulo del terreno	β			✓	✓	✓	✓	
Volumen liberado	V_F			✓				

* Método de Hungr (1995) requiere caracterizar en detalle las condiciones iniciales del depósito de relaves.

** Solución aproximada descrita en la sección 2.6.1.

Peso unitario (γ): La densidad utilizada corresponde a una estimación de la densidad promedio obtenida a partir del volumen aprobado y tonelaje aprobado para cada depósito, datos publicados por el catastro de SERNAGEOMIN. Dicho valor se estima en 1.500 kg/m³ y es equivalente a la densidad de un relave de sulfuro de cobre no saturado, de gravedad específica 2,7, con un índice de vacíos de 0,8. Cabe mencionar que este valor se debe tomar como un dato referencial, ya que en general no se conocen con precisión variables tales como el índice de vacíos, o el grado de saturación de la cubeta.

Esfuerzo de fluencia: La estimación del esfuerzo de fluencia es compleja, debido a que este valor depende directamente de la constitución mineralógica, densidad y porcentaje de sólidos que tenga el relave, y es un valor sumamente variable. Sin embargo, es posible encontrar estimaciones publicadas en literatura y, a partir de ello, realizar algunas estimaciones.

En base a lo anterior, el esfuerzo de fluencia se puede proyectar como un valor que fluctúa entre 300 Pa y 1.200 Pa. Para efectos del presente estudio, se considera un valor de 300 Pa. Este valor se aplica al considerar un criterio conservador, dado que los relaves contenidos en depósitos no operacionales han contado con un tiempo suficiente para drenar parte de su contenido de agua.

Viscosidad plástica de Bingham: La viscosidad plástica de Bingham se aproxima en base a los datos publicados por Urrutia (2016), quien caracteriza reológicamente diferentes pulpas en función del contenido de sólidos en volumen, contenido de arcillas en la fase sólida y tamaño de partículas. El ajuste de las mediciones realizadas corresponde a un modelo de Bingham. Para efectos del presente estudio se utiliza el valor más alto, equivalente a 0,3235 Pa s. Este valor se respalda en los resultados obtenidos por Norambuena et al. (2018).

Resistencia al corte residual: La resistencia al corte residual se calcula por medio de la ecuación (12) propuesta por Ishihara et al. (1990), la cual supone que la pendiente del terreno y la pendiente del relave son aproximadamente paralelas cuando este se detiene.

$$S_u = \gamma H \sin \beta \cos \beta \quad (12)$$

Ángulo del terreno: El ángulo de la pendiente se calcula con el apoyo del Sistema de Información Geográfica QGIS y de la topografía del terreno levantada a partir del modelo ASTGTM V002.

Volumen liberado: El volumen liberado se calcula por medio de la ecuación (3) planteada por Concha y Lall (2018).

En base a la información indicada anteriormente, se concluye que es posible aplicar la totalidad de los métodos, descontando el método tradicional planteado por Hungr (1995), debido a que requiere caracterizar en detalle las condiciones iniciales del depósito de relaves, especialmente la geometría, para proceder a simular el alcance del flujo posterior a su ruptura.

4. SELECCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE PRUEBA

De acuerdo al catastro de SERNAGEOMIN del 2019 (fecha de realización del estudio), existía un total de 518 depósitos no operativos. A partir de este universo de depósitos de relaves se debe seleccionar un conjunto de depósitos de prueba.

A partir de antecedentes históricos internacionales y nacionales, se definen 8 criterios de selección que corresponden a condiciones que aumentan la probabilidad de falla si se encuentran presentes en los depósitos de relaves. Con el propósito de valorizar dichos criterios, se asigna una puntuación al cumplimiento de cada uno. Para efectos del presente estudio, se considera que cada criterio afecta de igual forma al depósito, y por lo mismo, la puntuación asignada a cada uno es equivalente a 1/8. Esta valorización se observa en la Tabla 2. En el caso que el depósito cumpla con todos los criterios de selección, el valor obtenido en su calificación será igual a 1. En el caso que un depósito cumpla con un subconjunto de los criterios, su calificación será un número entre 0 y 1.

Luego, la Tabla 3 permite clasificar los depósitos en función de la calificación obtenida, diferenciando dos tipos. Si el depósito analizado obtiene una puntuación sobre 0,9 pertenece al espacio muestral, en caso contrario, no pertenece.

Tabla 2 Tabla de clasificación según los criterios de selección establecidos de acuerdo con la metodología propuesta.

	Criterio de selección	Valor
1	Actividad sísmica	
	Alta	1/8
	Media	1/16
	Baja	0
2	Método de construcción	
	Aguas arriba	1/8
	Eje central	1/16
	Aguas abajo	0
	Sin información	1/8
3	Nivel y/o intensidad de precipitaciones	
	Pp anual > 30 mm	1/8
	Pp anual 0 - 30 mm	0
4	Tipo de instalación	
	Tranque de relaves	1/8
	Embalse de relaves	1/16
	Otro	0
5	Volumen	
	$\geq 10.000 \text{ m}^3$	1/8
	$< 10.000 \text{ m}^3$	0
	Sin información	1/8
6	Altura de muro	
	$\geq 15 \text{ m}$	1/8
	$< 15 \text{ m}$	0
7	DS N°248	
	No aplicado	1/8
	Aplicado	0
	Sin información	1/8
8	Decreto 132 / Ley 20.551	
	No aplicado	1/8
	Aplicado	0
	Sin información	1/8

Tabla 3 Tabla de clasificación según la valorización de los criterios de selección de acuerdo con la metodología propuesta.

Valor	Pertenece al espacio muestral	Número de depósitos
0,9 – 1,0	Sí	130
0 – 0,9	No	388

Al aplicar la clasificación antes mencionada se obtiene un total de 130 depósitos en el espacio muestral (25% del universo de estudio), el cual debe seguir siendo acotado para obtener un subconjunto de depósitos de prueba, por ello se realiza un análisis asociado al nivel de riesgo.

La falla de un depósito de relaves implica impactos en la infraestructura instalada aguas abajo, importantes daños en el medio ambiente y la pérdida de vidas humanas. La presente investigación prioriza la dimensión asociada a las personas, y por ello, se establece como objetivo determinar el riesgo en función de las pérdidas de vidas humanas como consecuencia. Por ello, se realiza un análisis de la población colindante aguas abajo al depósito de relaves. Para desarrollar este análisis se deben realizar dos estimaciones:

Área peligrosa de los depósitos de relaves en estudio:

En primer lugar, se debe determinar una distancia peligrosa, cuya aproximación se obtiene a través del método de Concha y Lall (2018). Luego a partir de la topografía disponible se define la trayectoria más probable. Posteriormente, a través de un análisis de escalas de escurrimiento, se aproxima un área del material derramado considerando el relave como un plástico de Bingham.

Población en riesgo en función del área peligrosa:

El área peligrosa se contrasta con la densidad poblacional aguas abajo del depósito de relaves, y de esta forma es posible estimar el número de personas impactadas en caso de una falla del depósito. La información de densidad poblacional es obtenida del censo publicado por el Instituto Nacional de Estadísticas (2017).

Finalmente, considerando los depósitos que representan un mayor riesgo a la población colindante, se seleccionan 10 depósitos de prueba.

5. RESULTADOS

El cálculo de distancia peligrosa se realiza aplicando los parámetros de entrada indicados en la sección 3 en cada uno de los métodos descritos, según corresponda.

La simulación por medio del método de Jeyapalan et al. (1983) se realiza por medio del simulador provisto por WISE Uranium Project (2014).

La Tabla 4 indica los parámetros supuestos asociados al relave correspondientes a peso unitario, esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica de Bingham. Luego, la Tabla 5 indica los parámetros de volumen y altura asociado a los depósitos y el ángulo de terreno aguas abajo.

Tabla 4 Caracterización reológica del relave considera para el presente estudio.

Peso unitario (N/m ³)	14.700
Esfuerzo de fluencia (Pa)	300
Viscosidad plástica de Bingham (Pa s)	0.3435

Los resultados obtenidos del cálculo de distancia peligrosa con los diferentes métodos se presentan de forma gráfica en la Figura 5.

6. DISCUSIÓN

En el proceso de selección de los métodos de distancia peligrosa empleados en el presente trabajo, resumidos en la Tabla 1, se ha privilegiado su facilidad de aplicación. Esto ha derivado naturalmente en el uso de metodologías empíricas, basadas en el estudio estadístico de fallas históricas y, en un caso, en el uso de una aplicación de software disponible sin costo para la estimación de distancia peligrosa con un bajo requerimiento de datos de entrada en comparación con otros métodos de cálculo o herramientas disponibles. A pesar de esto, aún en el reducido conjunto de métodos seleccionados, existe una diversidad de requerimientos de datos de entrada (geometría del depósito, características reológicas del relave, pendiente del terreno aguas abajo al depósito y volumen del relave liberado), que no se requieren simultáneamente en todos los métodos utilizados (Tabla 1).

A partir del análisis de los depósitos no operativos seleccionados, se observan las siguientes tendencias:

La metodología de Rico et al. (2008a) en forma general es la que entrega menores magnitudes de distancia peligrosa.

La magnitud obtenida a través de la metodología de Lucia et al. (1981) dependerá principalmente del volumen liberado, y por ende, del volumen almacenado en el depósito de relaves. En consecuencia, reporta mayores valores de distancia peligrosa cuando los volúmenes almacenados son mayores.

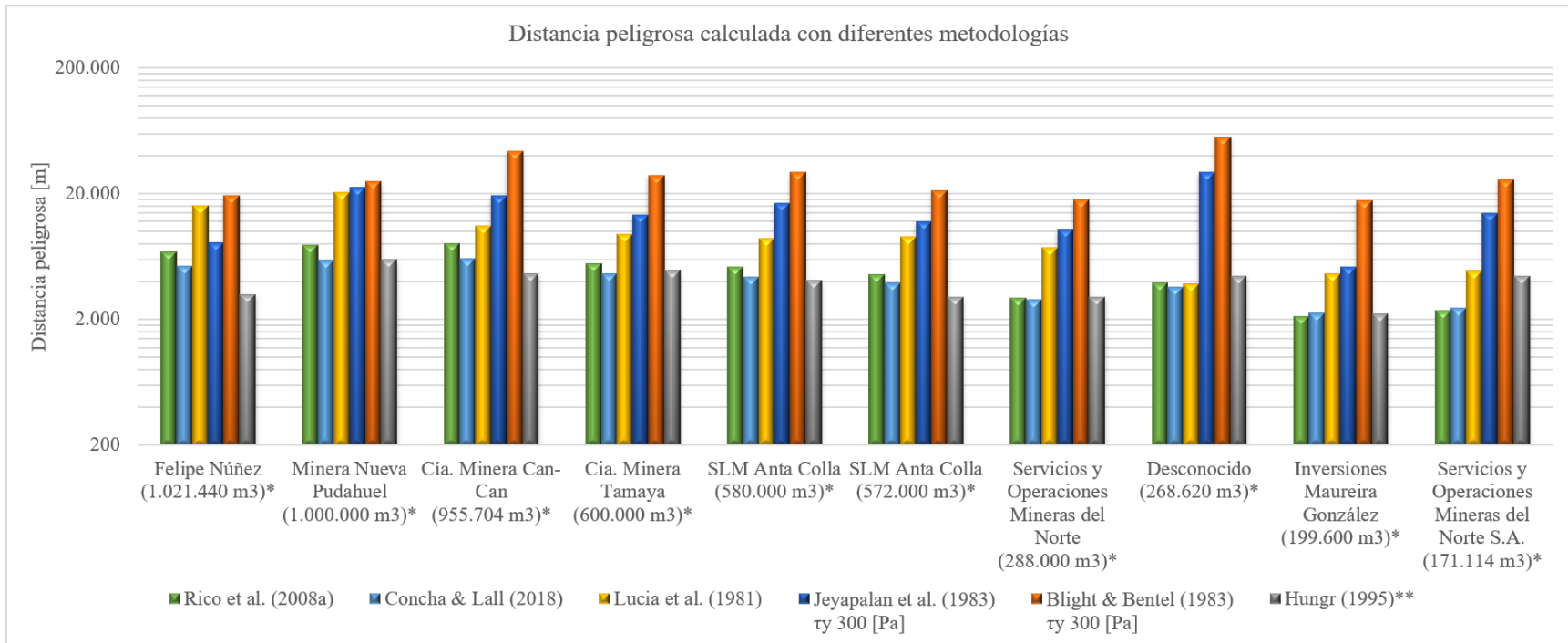
En términos absolutos, los métodos que entregan mayores magnitudes de distancia peligrosa son las de Jeyapalan et al. (1983) y Blight y Bentel (1983). Los valores obtenidos en ambas dependen fuertemente del esfuerzo de fluencia. Además, el método de Blight y Bentel (1983) resultó ser significativamente más sensible con respecto a la pendiente del terreno aguas abajo que el resto de los métodos que usan este parámetro como dato de entrada.

7. CONCLUSIONES

En el presente estudio se han evaluado satisfactoriamente diferentes métodos para la estimación de distancia peligrosa, aplicándolos al caso de depósitos no operativos de Chile. Dichos métodos corresponden a aplicaciones simples, con pocos requerimientos de información o costo computacional. Aún en este caso, el conocimiento de parámetros clave del relave incluyendo la geometría del depósito, esfuerzo de fluencia del relave en la cubeta, topografía y presencia de cuerpos de agua a lo largo de la trayectoria de descarga, pueden mejorar significativamente las estimaciones de distancia peligrosa. Teniendo en consideración que esta información es difícil y/o costosa de obtener, el empleo de información de tipo benchmarking, que brinda órdenes de magnitud de los resultados, resulta razonable y dan sustento a la aproximación planteada en el presente estudio.

Tabla 5 Caracterización de los depósitos de estudio.

N°	Empresa	Instalación	Volumen aprobado (m³)	Altura (m)	Ángulo del terreno (°)
1	Felipe Núñez	Tranque 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7	1.021.440	25	0,6682
2	Minera Nueva Pudahuel	La Africana 1-2	1.000.000	31	0,1475
3	Cía. Minera Can-Can	Terrazas 1 y El Durazno	955.704	34	1,0822
4	Cia. Minera Tamaya	Delirio 1	600.000	31	0,4719
5	SLM Anta Colla	Anta Colla 1	580.000	29	0,9434
6	SLM Anta Colla	Anta Colla 2	572.000	24	1,0656
7	Servicios y Operaciones Mineras del Norte S.A.	Tranque De Relave 2	288.000	25	0,4482
8	Desconocido	Desconocido	268.620	41	0,7998
9	Inversiones Maureira González	Ana María 1	199.600	22	1,0529
10	Servicios y Operaciones Mineras del Norte S.A.	Tranque De Relave 3	171.114	30	0,4292



*Los depósitos se encuentran ordenados de forma decreciente de acuerdo a su volumen aprobado.

Figura 5 Distancia peligrosa calculada para los depósitos de relaves en estudio calculada por medio de diferentes métodos de cálculo.

AGRADECIMIENTOS

A los miembros de la comisión revisora del trabajo de tesis que sustenta este estudio, Roberto Gesche Schüller y Gabriel Villavicencio Arancibia.

A SERNAGEOMIN, particularmente la colaboración de Gullibert Novoa Godoy, coordinador de depósitos de relaves.

A CONICYT por la beca CONICYT-PCHA/Magíster Nacional/2017-22170904.

Christian Ihle y Aldo Tamburrino agradecen al Centro Avanzado de Tecnología para la Minería, ANID (Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo) AFB220002.

Christian Ihle agradece además el financiamiento de los proyectos ANID Fondef ID22I10199 y Anillo ACT 210027.

REFERENCIAS

- Blight, G. E. y Bentel, G. M. (1983) "The behaviour of mine tailings during hydraulic deposition". *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 73 - 86.
- Concha, P. y Lall, U. (2018) "Tailings dams failures: updated statistical model for discharge volume and runout". *Environments*, Vol. 5, N°2, pp. 28.
- Hungr, O. (1995) "A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, N°4, pp. 610-623.
- Instituto Nacional de Estadística (2017). *Resultados Definitivos Censo 2017*.
- Ishihara, K., Yasuda, S. y Yoshida, Y. (1990) "Liquefaction-induced flow failure of embankments and residual strength of silty sands". *Soils and foundations*, Vol. 30, N°3, pp. 69 - 80.
- Jeyapalan, J. K., Duncan, J. M. y Bolton Seed, H. (1983) "Analyses of flow failures of mine tailings dams". *Journal of geotechnical engineering*, Vol. 109, N°2, pp. 172-189.
- Lucia, P., Duncan, J. y Seed, H. (1981) "Summary of Research on Case Histories of Flow Failures of Mine Tailings Impoundments". In *Mine Waste Disposal Technology*, p. 4652.
- Ministerio de Minería (2007) "Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves". Santiago.
- Norambuena, R., Sepúlveda, D., Barrueto, C., Santos, E., Godoy, C., y Campaña, J. (2018) "Distancia peligrosa, retroanálisis de fallas en depósitos chilenos mediante métodos numéricos". X Congreso SOCHIGE. Valparaíso: Sociedad Chilena de Geotecnia.
- Rico, M., Benito, G., y Díez Herrero, A. (2008a) "Floods from tailings dam failures". *Journal of hazardous materials*, 79-87.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A., Díez-Herrero, A., y Pereira, H. (2008b) "Reported tailings dam failures. A review of the european incidents in the worldwide context". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 152, 846 - 852.
- U.S. / Japan ASTER Science Team (2011) ASTGTM V002. Recuperado el 2018, de <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv002/>

Urrutia, N. (2016) “Estudio reológico de relaves basado en técnicas de caracterización avanzada de minerales”. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención metalurgia extractiva, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago.

Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A., y Valenzuela, P. (2014) “Failures of sand tailings dams in a highly seismic country”. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 51, N°4, 449-464.

WISE Uranium Project (2014) “Tailings flow slide calculator”. Recuperado el 2020, de <http://www.wise-uranium.org/ctfs.html>

ACERCA DE LOS AUTORES

Karina Monsalve Stange es Ingeniera Civil en Metalurgia Extractiva de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y M.Sc. mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Desde el año 2018, ha focalizado su trabajo en investigación y proyectos asociados a depósitos de relaves, siendo actualmente parte del equipo evaluador de proyectos de depósitos de relaves del SERNAGEOMIN.

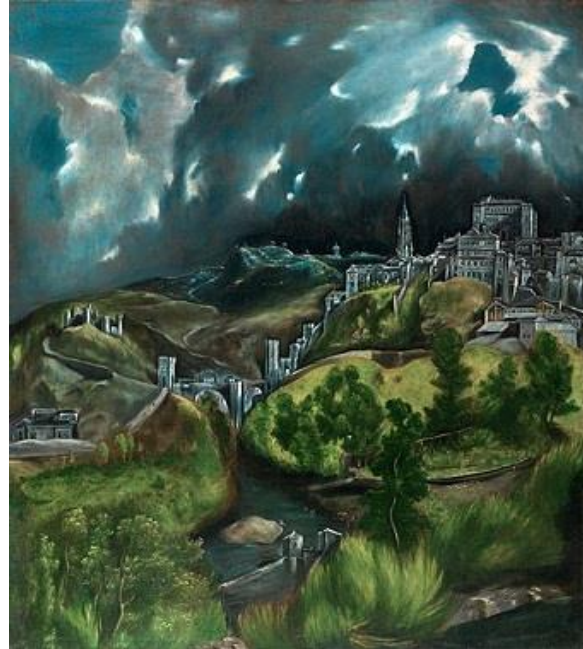
Aldo Tamburrino Tavantzis es Ingeniero Civil mención Hidráulica de la Universidad de Chile, M.Sc y Ph.D. in Civil Engineering de la Universidad de Minnesota, EEUU. Es Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil e Investigador Asociado del Centro de Tecnología Minera Avanzada de la Universidad de Chile. Como profesor enseña cursos de pre y postgrado de dicha universidad. Actualmente sus áreas de interés se centran especialmente en hidráulica fundamental, flujos detríticos, granulares y de fluidos no-newtonianos.

Christian Ihle Bacuñán es Ingeniero Civil Mecánico egresado de la Universidad de Chile, con un doctorado en Cs. de la Ingeniería (Fluidodinámica) de la misma institución. Su campo de especialización está relacionado con el transporte hidráulico de sólidos, la reología de concentrados de minerales y relaves, y el uso eficiente de agua y energía en plantas concentradoras. Es Investigador Principal y Subdirector del Centro de Tecnología Minera Avanzada de la Universidad de Chile. Con mas de 20 años de experiencia profesional, ha estado involucrado en varias iniciativas de investigación y proyectos de ingeniería y consultoría.

HIDRO-GRAFÍA

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

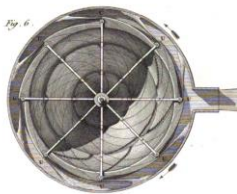
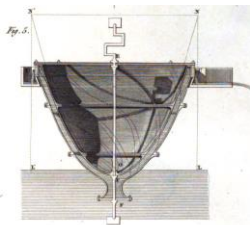
La imagen de la HIDRO-GRAFÍA de este número, corresponde a la “Vista de Toledo”, pintada entre 1598 y 1599 por Domenikos Theotokopoulos (1541-1614), “El Greco”. Sin entrar en detalles de la calidad artística de la obra (es uno de los primeros paisajes de la historia de la pintura), ella muestra una porción de la ciudad de Toledo y en la parte central inferior el río Tajo. Desde el punto de vista hidráulico, esta pintura es importante pues es el único registro contemporáneo de una obra hidráulica de gran importancia para la ciudad de Toledo, la que fue demolida en el siglo XIX. Esta obra es:



- El puente de Alcántara, puente romano en arco construido entre los años 103 y 104, que se ve en la zona central del cuadro
- Las edificaciones de un sistema de elevación de agua desde el río Tajo a la ciudad, cuyas torres se ven a lo largo de una diagonal en el centro de la pintura
- Un azud o barrera para desviar el agua a campos de regadío, visible en la parte central inferior del cuadro

NÚMERO ANTERIOR

La respuesta correcta a la HIDRO-GRAFÍA del número anterior es la alternativa a). Es el diseño de una bomba centrífuga que aparece en la edición de 1819 que la Académie des Sciences encargó a C-L Navier del enorme tratado que escribió Bernard Forest de Bélidor, *Architecture Hydraulique, ou l'Art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie*, cuya primera edición es de 1737.



Navier no alteró en nada el texto original de la obra de Belidor, pero lo complementó con tal cantidad de notas que ellas por sí solas fácilmente constituyen otro texto tan voluminoso como el de Bélidor. En las notas al pie del Libro II, Capítulo IV (págs. 619-623) que agregó Navier (y cuyo texto ocupa casi completamente todas las páginas), Navier escribe prácticamente todo un capítulo titulado *De la roue à force centrifuge*, en el que presenta la teoría de la bomba presentada en la figura.

INVITACION A CONTRIBUIR CON ARTÍCULOS

La Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica invita a contribuir con artículos para ser publicados en sus próximos números. Los artículos pueden ser en castellano o inglés.

Los artículos buscan difundir trabajos en el área de interés de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, especialmente aquellos relativos a la hidráulica, hidrología y mecánica de fluidos en general, así como otros aspectos relacionados con el agua, como su uso, gestión, recursos, tecnologías, historia, etc. Las contribuciones pueden ser de investigación teórica o aplicada, soluciones novedosas a problemas de ingeniería, difusión u otros temas de interés para la comunidad hidráulica nacional.

El formato de presentación de los trabajos puede solicitarse al Editor a la dirección electrónica atamburr@ing.uchile.cl

