

Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica



*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***

ISSN 0716-3746

Volumen 34, Número 1, Diciembre 2019

DIRECTORIO

Presidente

José Vargas Baecheler

DIRECTORES

Raúl Demangel Castro

Cristian Escauriaza Mesa

Luis Estellé Aguirre

Francisco Romero

Aldo Tamburrino Tavantzis

Scarlett Vásquez Paulus

DIRECTORES HONORARIOS

Ernesto Brown Fernández

Bonifacio Fernández Larrañaga

Horacio Mery Mery

Humberto Peña Torrealba

Sergio Radrigán Vogel

Eduardo Varas Castellón

Jorge Bravo Soissa

Luis Ayala Riquelme

Ricardo González Valenzuela

EDITOR DE LA REVISTA

Aldo Tamburrino Tavantzis

San Martín 352, Santiago

Fono 2 2698 4028

www.sochid.cl

Imagen portada:

Leonardo da Vinci. Bocetos de estudios de caídas de agua y remolinos que se generan.

Tabla de Contenidos

Tabla de contenidos	3
Editorial	5
Leonardo da Vinci (1452 – 1519): A quinientos años de su muerte Aldo Tamburrido Tavantzis	7
Laboratorios Nacionales de Ingeniería e Investigación Hidráulica se unen en red de cooperación	11
COP 25: Revisión de NDC y demandas sociales Alberto de la Fuente Stranger	13
Introducción del tornillo de Arquímedes en Asia (China, Corea, Japón) durante los siglos XVII y XVIII Albert Koenig	17
Expulsiones de sedimento fino de lechos de gravas asociado al flujo subsuperficial Natalia Bustamante Penagos y Yarko Niño Campos	31
Hidro-Grafía	42

EDITORIAL

Cerramos diciembre de 2019 con un número de la Revista que podrá parecer extraño para muchos. En mayor o menor medida, las movilizaciones que comenzaron el 18 de octubre nos han afectado a todos y, en particular a la SOCHID. Por segunda vez en la historia de los Congresos de Hidráulica, debió aplazarse uno. El primero fue el tercer coloquio (como se denominaba en sus inicios) que no se hizo cuando correspondía en 1975, concretándose en 1977. El segundo que no se realizó en su fecha programada es el XXIV Congreso. Programado para noviembre debió ser aplazado para abril de 2020. Esta decisión la tomó el Directorio de la SOCHID junto al Comité Organizador del Congreso al no poder garantizar la seguridad tanto de las personas como de las instalaciones donde se desarrollaría, decisión tomada en un contexto de movilizaciones que ya había llevado al gobierno a cancelar la realización en Chile de dos importantes eventos internacionales, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático COP 25 y el Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico APEC 2019.

Como miembros de la SOCHID, con este ejemplar de la revista queremos mostrar que en estos días y en los que vendrán, como ciudadanos de un país que está pasando por un momento decisivo de su historia, se nos demandará una mayor involucración cívica, pero que eso no puede ser excusa para dejar de lado las responsabilidades que como ingenieros hidráulicos hemos adquirido previamente.

En este número se presenta la Red Nacional de Laboratorios de Hidráulica, nacida a partir de una iniciativa del Instituto Nacional de Hidráulica y que acogieron los distintos laboratorios del país. Con una breve reseña de la obra hidráulica de Leonardo da Vinci nos sumamos a las conmemoraciones que se han desarrollado alrededor del mundo por los 500 años de la muerte del máximo exponente del renacimiento. Se incluye también un artículo respecto a las demandas sociales y los compromisos que adquirió Chile, de manera voluntaria, para la mitigación y adaptación del cambio climático, en el marco del acuerdo de París de 2015. Dos artículos técnicos son el fuerte de este número. El primero relacionado con la introducción del tornillo de Arquímedes en Asia en los siglos 17 y 18 y el segundo presenta la estructura del flujo en la cercanía de un lecho de grava y su relación con la eyección de sedimento fino. Por último, retomamos una sección que existía en la Revista hace años, en la que se reproduce algún fenómeno, mecanismo o problema de hidráulica o mecánica fluvial, dejándose al lector decidir a qué corresponde.

Aldo Tamburrino Tavantzis
Editor

LEONARDO DA VINCI (1452 – 1519): A QUINIENTOS AÑOS DE SU MUERTE

Aldo Tamburrino

atamburr@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile



Leonardo da Vinci. Autorretrato

Este año se celebran los quinientos años de la muerte del genio florentino, exponente máximo del humanismo renacentista que surgió en los siglos XV y XVI en Italia. Hijo natural de un abogado, nació en Vinci el 15 de abril de 1452 y murió en Amboise (Francia) el 2 de mayo de 1519. Abordó prácticamente todas las artes y ciencias de la época, mostrando su genio en el dibujo y pintura, escultura, música, filosofía natural, anatomía, botánica, geología, mecánica, ingeniería y arquitectura.

Conmemoraciones se han desarrollado no sólo en Italia, sino a través de todo el mundo, mediante charlas y exposiciones de su obra. Dentro de su vasta producción, son importantes sus notas y comentarios dedicados a la hidráulica y el movimiento del agua, destacando el código Leicester, el que contiene un índice, lo que hace suponer que Leonardo pensaba escribir un tratado sobre el tema. Las notas

conocidas de Leonardo suman

alrededor de 5000 páginas de comentarios y dibujos. Es lamentable que Leonardo no haya formado una escuela y, sin dejar discípulos, prácticamente todo el producto de su genio no se difundiera y tuviera que ser redescubierto por otros más tarde. Leonardo era un solitario, no transmitía sus ideas y su escritura especular de izquierda a derecha no favorecía su difusión. De este modo, sus descubrimientos tuvieron poco efecto en el desarrollo de la ciencia.

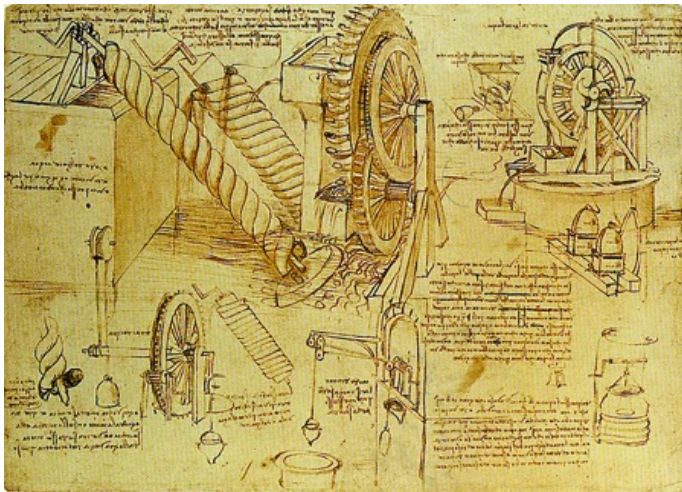
Sus manuscritos dedicados total o parcialmente a la hidrodinámica se crearon alrededor de 1495 (manuscritos H e I, París) y alrededor de 1508 (Codex Leicester, Seattle; manuscrito F, París). Los textos dispersos de Leonardo relacionados con el agua parecen haber sido compilados por primera vez en 1643 por



Estudios de obstáculos en un flujo y caídas de agua

Luigi Maria Arconati (*Del moto e misura dell'acqua*; Bibliotheca Apostolica Vaticana), que en nueve libros cubre los siguientes temas: 1) la superficie del agua; 2) el movimiento del agua; 3) olas; 4) vórtices; 5) agua que cae; 6) la fuerza destructiva del agua; 7) cuerpos flotantes; 8) flujos a través de orificios y tuberías; y 9) molinos y otras máquinas hidráulicas. Una edición de 1828 impresa en Bologna de esta compilación puede descargarse de internet.

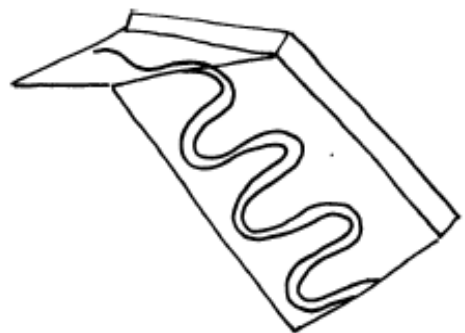
Entre los fenómenos hidráulicos que Leonardo fue el primero en describir o dibujar se encuentran la distribución de velocidades en un vórtice; la trayectoria de los chorros; la formación de vórtices en estelas y expansiones bruscas; la propagación, reflexión e interferencia de ondas; el resalto hidráulico. Fue el primero en realizar experimentos de visualización de flujo, al introducir pequeñas semillas en un estanque con paredes de vidrio a través de las cuales podía observar el movimiento de las partículas. El primer diseño de una



Diseños de Leonardo de mecanismos de elevación de agua.

bomba centrífuga se encuentra en uno de sus códices. Como si fuera poco, de una manera básica, formuló el principio de continuidad, el que no divulgó. Años más tarde sería reformulado por Abbé Benedetto Castelli (1577 – 1644), uno de los discípulos de Galileo Galilei. También fue uno de los precursores de la hidrología, al establecer el balance anual del agua “que subía a las montañas con la que bajaba a través de los ríos y de la atmósfera”.

Leonardo abordó el tema del origen de los ríos y rechazó la teoría de que el diluvio universal era el causante de la aparición de conchas marinas por sobre el nivel del mar. De sus observaciones del flujo en canales observó que la velocidad del flujo era mayor en la superficie que en el fondo, debido a la menor resistencia que oponía el aire respecto a la tierra del fondo del canal. Tenía claro que la velocidad del flujo es distinta a la de la onda superficial. Fue el primero en usar la palabra turbulencia (*tubolenza*) para describir el movimiento irregular vorticoso de un flujo de fluido y en describir la convección de los vórtices más pequeños por estructuras más grandes del flujo, precediendo a Richardson (1920). Además de la bomba centrífuga, diseñó otros mecanismos de elevación de agua y máquinas para dragado. Evidentemente, su capacidad analítica para entender



Esquema de un experimento relacionado con la formación de meandros en ríos. Macagno (1989).

la naturaleza, su ingenio para inventar máquinas y aparatos lo pone entre aquellas inteligencias excepcionales de la humanidad, bien definida por Freud cuando escribió "Fue como un hombre que se despertó demasiado temprano en la oscuridad, mientras que los demás todavía estaban dormidos".



Mapa del río Arno realizado por Leonardo, quien estudió la canalización del río para alterar su cauce.

Como si quisiera burlarse de nosotros, la última frase que Leonardo nos dejó escrita, se encuentra en un estudio geométrico (folio 245 del codice Arundel) y dice "*Ecc. perché la minestra si fredda*": "Etcétera porque la sopa se enfría". No concluyó la demostración que estaba haciendo, sino que con un etcétera nos indica que el estudio puede esperar. Disfrutar una sopa caliente también es cosa de genios.

Bibliografía

Freud, S. (1916) *Leonardo da Vinci*; Moffat, Yard & Co., New York.
www.bartleby.com/277/.

García Tapia, N. (1996) "Ingeniería del agua en los códices de Leonardo y en los manuscritos españoles del siglo XVI", Ing. Del Agua, Vol. 3, No. 2, pp. 17-38.

Leonardo da Vinci (1828) *Del motto e missura dell'acqua*, Bologna

Macagno, E. (1989) *Leonardian Fluid Mechanics. Unexplored low studies in the Codex Arundel 263*, IIHR Monograph No. 106. Iowa Institute of Hydraulic Research The University of Iowa

Pfister, L. (2018) "Leonardo da Vinci's conceptualisations of the water cycle", Geophysical Research Abstracts Vol. 20, EGU2018-13913.

Richardson, L.F. (1920) "The supply of energy from and to atmospheric eddies", roc. Royal Soc. A, ol. 97, No. 686, pp.354-373.

Rouse, H. and S. Ince (1957) *History of Hydraulics*, Dover Pub. Inc., New York.

Rouse, H. (1983) "Highlights in the History of Hydraulics." Books at Iowa, no.38, pp. 3-17.

Laboratorios Nacionales de Ingeniería e Investigación Hidráulica se unen en red de cooperación

La agrupación funciona desde marzo de 2018.

Con el objetivo de establecer un marco permanente de colaboración entre las instituciones nacionales dedicadas a investigación, docencia, asistencia y desarrollo tecnológico en materia de aguas y de su medio ambiente para potenciar su capacidad de servicio a la sociedad, a efectos de un desarrollo sostenible, nació en marzo de 2018 la Red de Laboratorios Nacionales de Ingeniería e Investigación Hidráulica.



Actualmente, la agrupación está formada por nueve organismos: Instituto Nacional de Hidráulica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Universidad de Valparaíso, Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Universidad Austral de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María y Universidad de Concepción.

La red se gestó tras la iniciativa de investigadores de las distintas instituciones, quienes visualizaron la necesidad de generar una mayor comunicación, intercambio de conocimiento y colaboración entre las distintas organizaciones, potenciar las fortalezas de cada institución en términos de capital humano, infraestructura y tecnología. Otra parte importante de la motivación es transferir capacidades hacia otros organismos con menos desarrollo en hidráulica, especialmente en regiones.

Tras tres encuentros sostenidos entre 2018 y 2019, se ha dotado de una gobernanza que permitirá avanzar en el cumplimiento de los objetivos específicos planteados en esta primera etapa.

La coordinación de la red es ejercida por el Instituto Nacional de Hidráulica el cual debe asegurar el cumplimiento de sus objetivos, finalidades y los acuerdos de su asamblea general, representarla, crear los comités de estudio y trabajo que considere pertinentes, entre otras funciones.

Asimismo, es presidida por Karla González Novion, quien debe dirigir las reuniones de la asamblea general, representar a la red y presentar a consideración de la asamblea general, el informe anual de gestión y de labores y el programa de trabajo del siguiente año.

Dentro de los principales desafíos de la agrupación para el año 2020 se encuentran: disponer de un catastro de la infraestructura de laboratorios presente en el país, generar instancias de capacitación y oportunidades de proyectos conjuntos.

Los objetivos específicos de la red son:

- a) Promover, realizar y difundir, de forma conjunta, investigaciones, desarrollos tecnológicos, estudios científicos y técnicos relativos a la ingeniería hidráulica - continental y marítima- y áreas afines, fomentando el desarrollo y la incorporación de nuevas concepciones, principios y tecnologías.
- b) Promover el fortalecimiento de la relación y colaboración continua entre las instituciones que integran la Red, detectando complementariedades y promoviendo su aprovechamiento conjunto, así como analizando la problemática técnica, administrativa y normativa generales y planteando soluciones de interés común.
- c) Colaborar con instituciones educacionales encargadas de impartir docencia en hidráulica, para favorecer una práctica de enseñanza de la hidráulica que contemple experimentación como parte sus planes docentes.
- d) Disponer de información conjunta entre los miembros de la red acerca de las capacidades nacionales disponibles en experimentación hidráulica.
- e) Fomentar el debate de cuestiones nacionales e internacionales de interés común (adaptación al cambio climático, grandes proyectos de desarrollo de infraestructura, programas de promoción de la investigación, programas de capacitación, entre otros) en el ámbito nacional.
- f) Establecer vínculos con organismos, asociaciones e instituciones nacionales internacionales asociadas con el agua con el fin de contribuir y participar en los estudios sectoriales y en la definición de políticas hídricas nacionales.

COP 25: Revisión de NDC y demandas sociales

Alberto de la Fuente Stranger

aldelafu@ing.uchile.cl

Profesor Asociado

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

aldelafu@ing.uchile.cl

Nationally Determined Contributions

Contexto

El 15 de octubre de 2019 se abrió el proceso de consulta ciudadana la revisión del denominado NDC de Chile (nationally determined contributions) en miras a la COP25 que se realizará en diciembre de 2019. Los NDC son compromisos nacionales voluntarios en mitigación y adaptación del cambio climático que se dan en el marco del acuerdo de París del año 2015, acuerdo que tiene objetivos específicos (Naciones Unidas, 2015):

1. Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;
2. Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos;
3. Elevar las corrientes financieras a un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

El primer NDC de Chile se presentó antes de la COP21 en París, y estos compromisos se debieran actualizar cada 5 años, siendo la actualización que se encuentra en consulta ciudadana la primera que se hace con posterioridad a conocer los términos del acuerdo de París. En materia de mitigación del cambio climático, Chile en su primer NDC se comprometió a reducir la intensidad de emisiones por unidad del PIB en un 30% respecto del valor de referencia del año 2007, siendo este compromiso considerado por la organización Climate Action Trackers como altamente insuficientemente ya que se asocian con un calentamiento global de cerca de 4°C respecto del período pre industrial (CAT, 2019).

Contenido

En cuanto a la revisión de los NDC que durante noviembre de 2019 se encuentra en período de consulta ciudadana del Ministerio del Medio Ambiente¹, en la sección titulada “Meta incondicional transversal a la economía, sin incluir al sector UTCUTS” se indica que:

- Chile se compromete a un presupuesto de emisiones de GEI entre 1.110 a 1.175 MMtCO₂eq, entre el 2020 y 2030, con un máximo de emisiones (peak) de GEI al 2027, y a alcanzar un nivel de emisiones de GEI de 97 MMtCO₂eq al 2030.

Este compromiso de mitigación es sin incluir el sector UTCUTS, que corresponde a emisiones/sumideros de gases de efecto invernadero por cambio del uso de la tierra y la silvicultura, que en el caso de Chile corresponde a un sumidero de emisiones equivalente a aproximadamente la mitad de las emisiones brutas de los otros sectores (energía, industria, residuos, etc). En cuanto a este sector, los compromisos incondicionales serían:

- Chile se compromete al manejo sustentable y recuperación de 200.000 hectáreas de bosques nativos, que representará capturas de GEI en alrededor de 0,9 a 1,2 MMtCO₂eq anuales, al año 2030.
- Chile se compromete a forestar 200.000 hectáreas de bosques, de las cuales al menos 100.000 hectáreas corresponden a cubierta forestal permanente, de las cuales, al menos 70.000 hectáreas, deben ser con especies nativas. La recuperación y forestación se realizará en suelos de aptitud preferentemente forestal y/o en áreas prioritarias de conservación, que representarán capturas de entre 3,0 a 3,4 MMtCO₂eq anuales al 2030.
- Reducir las emisiones del sector forestal por degradación y deforestación del bosque nativo en un 25% al 2030, considerando las emisiones promedio entre el periodo 2001-2013.

Los valores indicados en estos compromisos de la actualización del NDC de Chile están en unidades de CO₂ equivalente, que resulta de combinar emisiones de los diferentes gases de efecto invernadero (CO₂, metano, etc.) ponderadas por su potencial de efecto invernadero.

Gráficamente, la propuesta de actualización del NDC de Chile incondicional en mitigación sin considerar UTCUTS se ve en la Figura 1, que además tiene las trayectorias de emisiones que son compatibles con los 1.5oC, que se definieron a nivel mundial, y que se colocan en el contexto de Chile con una regla de 3. Si bien es verdad que estos compromisos caen en el conjunto de medidas que son compatibles con los Acuerdos de París, también es verdad que se encuentran en el límite, y siguen aquellas trayectorias de emisiones con "overshooting", donde se acepta un máximo calentamiento global de 2oC o más. Estas trayectorias con "overshooting" también consideran implementar medidas de captura de carbono tal que se logra reducir la temperatura global para estabilizarse cerca de los 1,5oC para fines de siglo. En el caso de Chile, la captura de CO₂ estaría en principio garantizada por el sector UTCUTS de Chile que es un sumidero de CO₂ (en ausencia de grandes incendios o el colapso acelerado de ecosistemas), por lo que toda reducción de las emisiones brutas posterior al 2050 se reflejaría en un aumento en la captura neta de emisiones.

¹ <http://consultasciudadanas.mma.gob.cl>

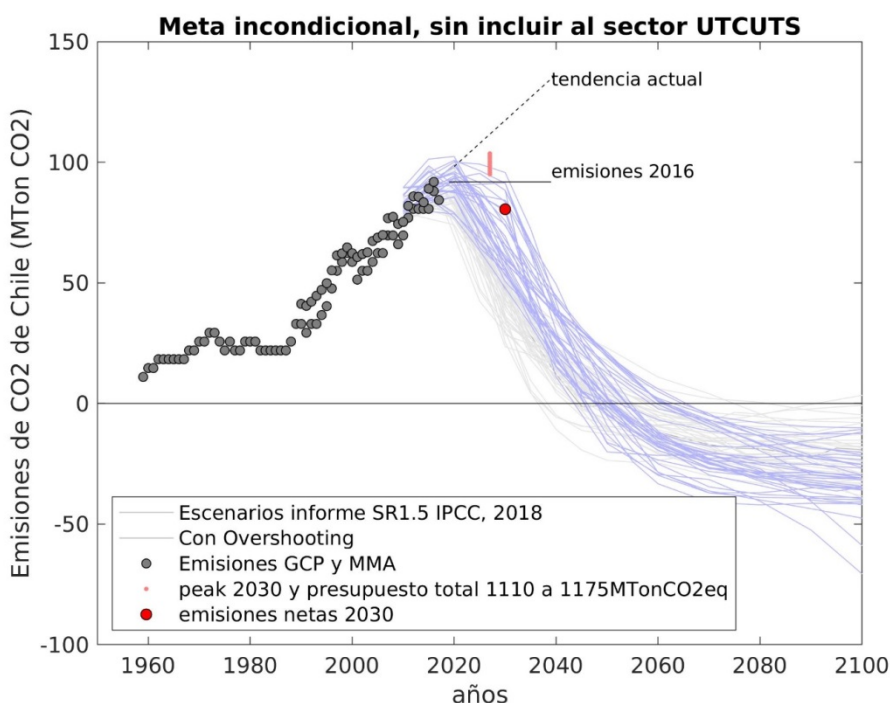


Figura 1: Serie de tiempo de emisiones de CO₂ de Chile (puntos grises). Trayectoria de emisiones de CO₂ compatibles con un calentamiento máximo de 1.5oC para fines de siglo definidas para el informe del IPCC para los 1.5oC (IPCC (2018)) con overshooting (líneas azules) y sin overshooting (líneas grises). Línea naranja define rango de valores del peak de emisiones para el 2027 definido de presupuesto total. Punto Rojo indica valor de emisiones netas equivalente a 97 MMTon CO₂eq comprometido para 2030.

Demandas sociales, opinion personal

El jueves 17 de octubre de 2019, dos días después que comenzara el período de consulta ciudadana del proyecto de actualización de los NDC de Chile, estalla en Chile un amplio movimiento social que cambió todo el panorama. Entre otras repercusiones de este movimiento social es que se decide cancelar la realización de la COP25 en Santiago, la que se trasladó a Madrid, España; junto con la postergación indefinida del XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica que se realizaría en la Universidad Diego Portales entre los días 11 y 15 de noviembre de 2019. De igual forma, se espera que para financiar las demandas sociales sea necesaria una importante reforma tributaria que desviaría recursos públicos y privados que estaban destinados a implementar los NDC, lo que queda en evidencia en el correo electrónico que fue enviado por el comité científico de la COP25, que indica que “El Chile de hoy es muy distinto al país con el que se hizo la Propuesta de NDC actualmente en consulta”. Es por esto que, a juicio del autor de este documento, el movimiento ratifica un hecho que, si bien no se comparte, pareciera ser real: solucionar los problemas ambientales es un capricho que sólo se pueden dar los países del primer mundo que ya solucionaron problemas de salud, inequidades, alimentación, educación, etc.

Una de las preguntas sin responder es cómo será posible abordar la emergencia climática en este nuevo escenario en que la mitigación y adaptación al cambio climático vuelven a quedar sin financiamiento ni tribuna política. Una respuesta podría ser tratar de posicionar los 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable (Organización de las Naciones Unidas, 2015) como pilares canalizar la discusión. En este sentido, pareciera importante recordar el preámbulo de la carta de las Naciones Unidas (Organización de las Naciones Unidas, 1945) :

NOSOTROS LOS PUEBLOS DE LAS NACIONES UNIDAS RESUELTOS

- *a preservar a las generaciones venideras del flagelo de la guerra que dos veces durante nuestra vida ha infligido a la Humanidad sufrimientos indecibles,*
- *a reafirmar la fe en los derechos fundamentales del hombre, en la dignidad y el valor de la persona humana, en la igualdad de derechos de hombres y mujeres y de las naciones grandes y pequeñas,*
- *a crear condiciones bajo las cuales puedan mantenerse la justicia y el respeto a las obligaciones emanadas de los tratados y de otras fuentes del derecho internacional,*
- *a promover el progreso social y a elevar el nivel de vida dentro de un concepto más amplio de la libertad,*

Y CON TALES FINALIDADES

- *a practicar la tolerancia y a convivir en paz como buenos vecinos,*
- *a unir nuestras fuerzas para el mantenimiento de la paz y la seguridad internacionales,*
- *a asegurar, mediante la aceptación de principios y la adopción de métodos, que no se usará; la fuerza armada sino en servicio del interés común, y*
- *a emplear un mecanismo internacional para promover el progreso económico y social de todos los pueblos,*

HEMOS DECIDIDO UNIR NUESTROS ESFUERZOS PARA REALIZAR ESTOS DESIGNIOS

Por lo tanto, nuestros respectivos Gobiernos, por medio de representantes reunidos en la ciudad de San Francisco que han exhibido sus plenos poderes, encontrados en buena y debida forma, han convenido en la presente Carta de las Naciones Unidas, y por este acto establecen una organización internacional que se denominará las Naciones Unidas.

Referencias

- CAT. (2019). Climate Action Tracker. Retrieved November 5, 2019, from <https://climateactiontracker.org/>
- IPCC. (2018). IPCC Special Report 1.5 - Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, et al. (Eds.), *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*, (p. 32). World Meteorological Organization. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Naciones Unidas. (2015). *Aprobación del Acuerdo de París. 21er período de sesiones*.
- Organización de las Naciones Unidas. Carta De Las Naciones Unidas, Carta de San Francisco § (1945).
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Asamblea General*. <https://doi.org/10.1093/cdj/bsq047>

INTRODUCCIÓN DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES EN ASIA (CHINA, COREA, JAPÓN) DURANTE LOS SIGLOS XVII Y XVIII *

Albert Koenig

kalbert@hku.hk

Profesor Adjunto

Department of Civil Engineering

The University of Hong Kong

Hong Kong, China

Resumen

En el transcurso de su trabajo misionario, los jesuitas jugaron un importante rol en la transmisión de la ciencia y tecnología occidental a China durante los siglos XVII y XVIII. Sin embargo, su impacto en aspectos relacionados con la transmisión de la tecnología del agua ha recibido escasa atención. Como un ejemplo, Sabatino de Ursis, S.J. (1575-1620), en colaboración con el funcionario chino Xu Guangqi (1562-1633), publicaron en 1612 *Taixi shuifa* (*Métodos hidráulicos del lejano occidente*), el primer libro en China que trató de equipos de occidente para elevar agua, el que contenía una detallada descripción del tornillo de Arquímedes. Este artículo presenta su acogida en China así como la transmisión de este conocimiento a Corea y Japón. Mientras que el impacto del tornillo de Arquímedes en China y Corea se mantuvo bastante limitada, la bomba de tornillo fue ampliamente utilizada desde 1635 para drenar el agua de las minas de oro en la isla japonesa de Sado. Este hecho se conoció en Occidente solo a fines del siglo XIX, cuando estuvieron disponible los rollos pintados a mano sobre el proceso de extracción de oro japonés. Estos rollos muestran varias aplicaciones del tornillo de Arquímedes, los que aparentemente fueron hechos de acuerdo con las instrucciones de fabricación en *Taixi shuifa*.

INTRODUCCIÓN

En el verano de 1689 Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) se reunió en Roma con el jesuita italiano Claudio Filippo Grimaldi, S.J. (1638-1710), quien había vivido en China desde 1669. Leibniz estaba muy interesado en todos los asuntos de China y había preparado un cuestionario de 30 preguntas, algunas de las cuales se referían a la tecnología y ciencia china, que, por provenir de una civilización más antigua, Leibniz pensaba podrían ser superiores a las de occidente. Entre otras cosas, Leibniz preguntaba respecto a molinos de viento de eje vertical y si los chinos conocían las bombas y el tornillo de Arquímedes, pero no logró registrar una respuesta durante el breve tiempo de la conversación (Leibniz, 2006). Leibniz probablemente

* El presente artículo fue presentado en inglés en el 5th IWA International Symposium on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations, desarrollado en Mar Muerto, Jordania, entre el 11 y 13 de septiembre de 2019.

fue el más curioso acerca de estas tecnologías debido a su propio proyecto de gestión del agua de 1680-1685/6 para las minas alemanas de Harz, en el que había propuesto un molino de viento horizontal chino que impulsaba un tornillo de Arquímedes, y que había fallado (Gottschalk, 2007). Aparentemente, Leibniz no sabía que las bombas de tornillo de Arquímedes ya se habían dado a conocer en China por el sacerdote jesuita Sabatino de Ursis S.J.(1575-1620) quien, en colaboración con el funcionario del gobierno chino Xu Guangqi (1562-1633), había publicado en 1612 *Taixi shuifa* (*Métodos hidráulicos del lejano occidente*), el primer libro en China que trató de equipos para elevar agua de occidente. El libro contenía una descripción del tornillo de Arquímedes junto a un detallado plano de construcción. Este artículo presenta el papel crucial de *Taixi shuifa* en la transmisión del tornillo de Arquímedes en el Lejano Oriente, con su aplicación más exitosa y sorprendente en Japón.

TORNILLO DE ARQUÍMEDES EN CHINA

Después de que los primeros misioneros jesuitas entraron a China en 1582, pronto descubrieron, en particular a Matteo Ricci, S.J. (1552-1610), que el acceso a la clase dirigente literata tenía más éxito mediante la introducción de la ciencia y la tecnología europeas. Para este propósito, Ricci había iniciado el establecimiento de una completa biblioteca de libros occidentales en Pekín, muchos de los cuales correspondían a la emergente área de la hidrotecnia (Koenig, 2014). De este modo, los libros occidentales servirían a los esfuerzos misionarios como una importante fuente de materiales para la transmisión del conocimiento occidental a través de traducciones y publicaciones. El mismo Ricci es reconocido como quien introdujo la geometría de Euclides en China en 1607 con la publicación de *Jihe yuanben* (*Elementos de Geometría*), junto con el erudito funcionario chino y prominente converso Xu Guangqi (1562-1633). Ricci escribió en el prefacio “También hay una subdivisión [es decir de geometría] que da orientación a los oficios y artesanías que trabajan con agua, tierra, piedra o madera; ... cava canales y deja que fluyan los manantiales ... También hay una subdivisión que produce métodos ingeniosos ... para mejorar el drenaje de los campos inundados y permitir el riego de tierras áridas.” (Engelfriet 1998a). Este fue el comienzo del interés de los jesuitas en las aplicaciones hidráulicas en China. Otras actividades relacionadas con el agua de los jesuitas en China han sido sólo recientemente discutidas (Koenig 2018). Entre estas, la más interesante es el caso de cómo introdujeron el tornillo de Arquímedes en China y cómo este conocimiento se extendió aún más a Corea y Japón. Una cuidadosa investigación reveló tres libros con descripciones del tornillo de Arquímedes, que fueron publicados por los jesuitas en China en colaboración con literatos chinos. Estos libros jugaron un papel importante en la transferencia de esta particular tecnología occidental a China.

Taixi shuifa [Métodos hidráulicos de Occidente] (1612)

Taixi shuifa es el primer libro sobre hidrotecnia occidental en China e introduce tres nuevos dispositivos de elevación de agua, bomba reciprocante de doble tubo de Ctesibius (bomba de fuerza), la bomba reciprocante de un solo tubo (bomba de succión) y la bomba de tornillo de Arquímedes, todos hasta el momento desconocidos en China. Fue escrito por el jesuita italiano

Sabatino de Ursis, S.J. (1575-1620), desde 1609 en China, junto con el antes mencionado Xu Guangqi, con el objetivo de presentar nuevas máquinas de elevación de agua occidentales para su uso en la agricultura. Bartoli (1663) indica que de Ursis había construido anteriormente máquinas hidráulicas para elevar el agua, muy probablemente los descritos en su libro, que por su novedad y diseño ingenioso incitaron el interés de muchos mandarines y eunucos de alto rango de la Corte Imperial. También dio modelos de las máquinas a los funcionarios y envió máquinas hidráulicas a varias ciudades en beneficio de la gente. En base a este gran éxito, Ricci y Xu Guangqi, quien tenía un gran interés personal en mejorar la agricultura, sugirieron a de Ursis que publicara un tratado sobre máquinas hidráulicas.

Con respecto al tornillo de Arquímedes, de Ursis proporcionó una descripción completa, que puede remontarse a las ediciones en latín e italiano de Vitruvio por Barbaro (1567 y 1584). Ambos se encontraban en la biblioteca Jesuita en Pekin (Verhaeren 1949). La Figura 1 muestra de manera convincente que la ilustración del tornillo de Arquímedes construido en madera y presentado en *Taixi shuifa* coincide con el de las ediciones de Barbaro (Cigola y Fang, 2016). Además, de Ursis realizó planos de construcción detallados, con medidas basadas en la descripción de Vitruvio, que no se pueden encontrar en ningún libro occidental contemporáneo (Figura 2). Incluso incluyó un pequeño dibujo del triángulo rectángulo pitagórico 5: 4: 3 que, según Vitruvio, correspondía a la inclinación ideal del tornillo de Arquímedes. Con la ayuda de Xu Guangqi, se eligió un nombre chino clásico para la bomba de tornillo, a saber, *longweiche*, es decir, máquina de cola de dragón. Este nombre imitaba de alguna manera el nombre de un dispositivo de elevación de agua chino ampliamente utilizado, la bomba de paleta cuadrada llamada *longguche*, es decir, la máquina de hueso de dragón. Curiosamente, de Ursis no menciona el nombre de Arquímedes, aunque Barbaro lo había citado.

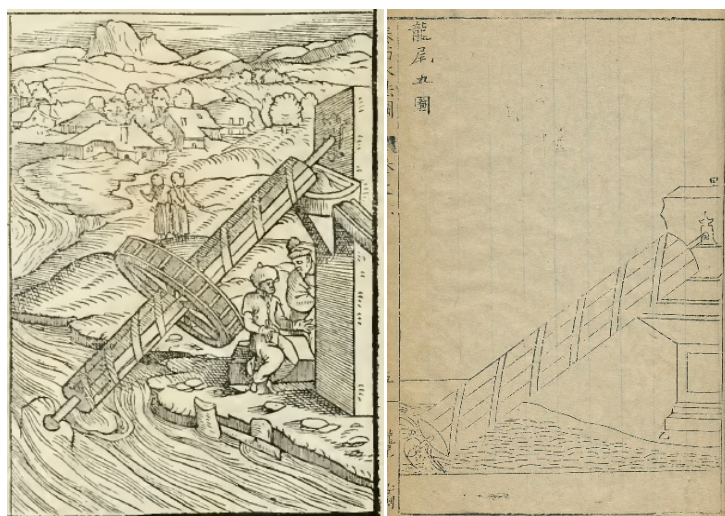


Figura 1.- Tornillo de Arquímedes (= *longweiche* = bomba cola de dragón)
Izquierda: Daniele Barbaro (1567) *De architectura libri decem*
Derecha: Sabatino de Ursis (1612) *Taixi shuifa* (*Métodos hidráulicos de Occidente*)

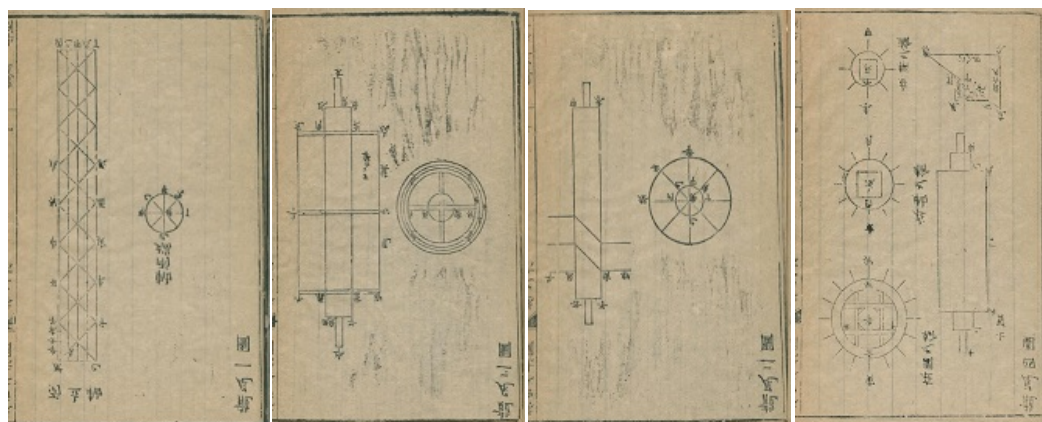


Figura 2.- Planos detallados para la construcción del tornillo de Arquímedes
Sabatino de Ursis (1612) *Taixi shuifa* (*Métodos hidráulicos de Occidente*)

Zhifang Waiji [Crónica de tierras extranjeras] (1623)

Zhifang Waiji (Crónica de tierras extranjeras, 1623) es la primera descripción detallada sobre geografía mundial en chino. Fue publicado por el jesuita italiano Giulio Aleni, S.J. (1582-1649), desde 1613 en China, junto con Yang Tingyun (1557-1627), un funcionario chino y también prominente converso temprano. Aleni completó el libro basado en un borrador de sus ya fallecidos predecesores Diego de Pantoja, S.J. (1571-1618) y Sabatino de Ursis, y agregó nueva información que había traído de Occidente. Es interesante que en este libro Aleni introdujo y describió brevemente varios trabajos famosos occidentales de ingeniería hidrotécnica, a saber (i) la máquina elevadora de agua de Toledo (a menudo llamada Artificio de Juanelo, por su creador), (ii) el acueducto de Segovia, (iii) las fuentes y los juegos de agua de un jardín renacentista (Palazzo Quirinale en Roma o Villa d'Este en Tivoli), (iv) los acueductos de Roma, y (v) el tornillo de Arquímedes. Los ejemplos elegidos estaban destinados a demostrar la inventiva e ingenio occidentales para la aplicación práctica, basados en sólidos principios matemáticos y científicos (Koenig 2015).

Con respecto al tornillo de Arquímedes, el pasaje en la sección sobre Egipto, África, dice lo siguiente: *Hubo una vez un rey que buscó un método para combatir las sequías y los anegamientos. Encontró a un hombre sabio e ingenioso, llamado Yaerjimode [Arquímedes] para hacer un dispositivo hidráulico, que al mismo tiempo podría suministrar y eliminar agua, proporcionando a las personas beneficios incomparables [para el riego]. Ahora se llama longweiche (máquina de cola de dragón = tornillo de Arquímedes).* Aleni fue, por lo tanto, el primero en introducir el nombre de Arquímedes en China utilizando la transcripción china de Yaerjimode. En lugar de proporcionar detalles técnicos o una ilustración de la bomba de tornillo, contó la breve historia de su invención por Arquímedes en el momento de su visita a Egipto, sin referirse a *Taixi shuifa* en absoluto. Sin embargo, no existen pruebas documentadas de que Arquímedes haya visitado Egipto o inventado la bomba de tornillo, pero ha sido una

tradición común desde la época romana. En consecuencia, Aleni puso la descripción del tornillo de Arquímedes en la sección sobre Egipto, África, y no en la sección sobre Italia, Europa. En 1674, el pasaje de Aleni sobre el tornillo de Arquímedes fue casi literalmente repetido por P. Ferdinand Verbiest, S.J. (1623-1688) en *Kunyu tushuo* (*Explicación ilustrada del mundo entero*).

Yuanxi qiqi tushuo lu zui (a menudo resumido como Qiqi tushuo) [Diagramas y explicaciones de las maravillosas máquinas del lejano Occidente] (1627)

Qiqi tushuo fue el primer libro chino que introdujo sistemáticamente la mecánica y máquinas europeas en China y lo siguió siendo hasta mediados del siglo XIX. Fue publicado en 1627 por el funcionario académico de bajo rango, ingeniero y destacado converso Wang Zheng (1571-1644), junto con el jesuita alemán Johann Schreck S.J. (1576-1630), desde 1621 en China. Wang había leído sobre el Artificio de Juanelo y Arquímedes en *Zhifang waiji* de Aleni y se interesó en las máquinas occidentales, en particular en el Artificio, que era un ingenioso sistema capaz de transportar agua desde el río Tajo a la ciudad de Toledo, superando una diferencia de más de 100 m de altitud. Wang fue a visitar la residencia jesuita en Pekín, donde Schreck le mostró varios libros ilustrados sobre máquinas. "Luego convenció a Schreck para que tradujera un trabajo totalmente dedicado a este tema. Como resultado, un libro sobre mecánica e instrumentos en tres volúmenes, llamado *Yuanxi qiqi tushuo lu zui* (*Diagramas y explicaciones de las maravillosas máquinas del Lejano Occidente*, a menudo resumido como *Qiqi tushuo*) se publicó en 1627" (Engelfriet, 1998b). Aunque el énfasis estaba en la ingeniería mecánica, este trabajo incluyó también muchas ilustraciones de maquinaria hidráulica (incluso cuando no funcionan). Las bombas de tornillo de Arquímedes se mostraron en tres arreglos diferentes, todos obviamente copiados de la obra de Agostino Ramelli *Le Diverse Et Artificiose Machine ...* (1588) como se ve por ejemplo en la Figura 3. Notablemente, *Qiqi tushuo* no hace referencia a *Taixi shuifa*.

El libro de Ramelli fue llevado por Schreck a China y depositado en la biblioteca jesuita de Pekín (Verhaeren, 1949). Recientemente, *Qiqi tushuo* ha atraído mucho la atención de académicos en China y en Occidente que estudian el papel de los jesuitas en el desarrollo del conocimiento mecánico chino (Walravens 2016). Se pueden encontrar detalles sobre Wang Zheng en la interesante biografía de Zhang y Tian (2009).

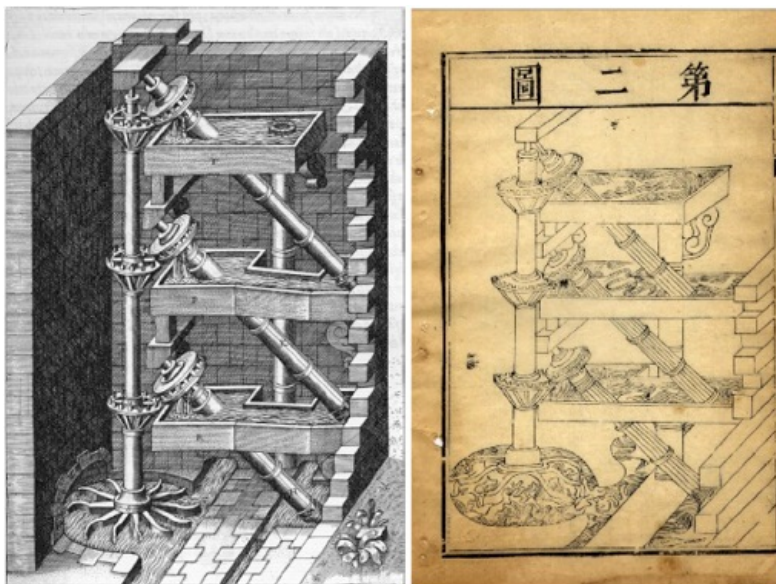


Figura 3.- Triple tornillo de Arquímedes

Izquierda: Ramelli (1588) *Le diverse et artificiose machine del capitano Agostino Ramelli*
Derecha: Schreck y Wang (1627) *Yuanxi qiqi tushuo lu zui (Diagramas y explicaciones de las maravillosas máquinas del Lejano Occidente)*

Impacto y Aplicaciones en China

Pese al hecho que una completa información sobre el tornillo de Arquímedes estaba disponible en China, ella ejerció solo una limitada influencia. La literatura informa relativamente pocas referencias sobre la bomba de tornillo, e incluso menos casos de su construcción. Se sabe que de Ursis y Wang Zheng construyeron los primeros prototipos de la bomba de tornillo. Zhang (2001) enumera algunos casos más y proporciona referencias, basadas en investigaciones exhaustivas realizadas por el "Grupo de Historia de la Ciencia y Tecnología de la Universidad de Tsinghua". Todos estos constructores usaron los dibujos de construcción de *Taixi shuifa*. La primera bomba de tornillo fue construida solo 1809 por Xu Chaojun (1752-1823), quien fue astrónomo y fabricante de relojes en Shanghai, y descendiente en quinta generación de Xu Guangqi. Otras bombas de tornillo fueron construidas en 1832 por Qi Yanhuai (1774-1841), astrónomo y magistrado de Suzhou, en 1836 por Zheng Guangzu (1775- antes de 1844), un literato del condado de Changshu, y en 1838 por Shen Xia'ou. Incluso después de la apertura forzada de China en 1842, el erudito funcionario y magistrado Liu Chengzhong (1818-1884) construyó en 1876 ocho tornillos de Arquímedes siguiendo explícitamente *Taixi shuifa* (Kwong 2001). Fue el padre de Liu E (1857-1909), un famoso escritor chino con un fuerte interés en la conservación del agua. Se especula que en la década de 1750 el jesuita francés Michel Benoist S.J. (1715–1774) podría haber instalado una serie de bombas de tornillo para los juegos de agua en las mansiones europeas del antiguo Palacio de Verano cerca de Pekín (Xie, 2006); sin embargo, nunca se ha presentado una prueba documental. Además, varios académicos y

funcionarios elogiaron los beneficios del tornillo de Arquímedes y abogaron por su aplicación en la agricultura o trabajos de conservación de agua, entre ellos en la década de 1670 Nalan Xingde (1655-1685), en 1742 Dai Zhen (1724-1777), en 1832 Lin Zexu (1785-1850), en 1824 Wu Bangqing (1766-1848) y otros.

Además, el texto y las ilustraciones de *Taixi shuifa* se reimprimieron parcial o totalmente en los siguientes trabajos:

- 1621 en *Wubei Zhi* (Tratado sobre tecnología de armamento), vol. 58, por Mao Yuanyi (1594-1640?)
- 1626 en *Tianxue Chuhan* (Escritos sobre estudios celestiales) (1626), vol. 3, ed. Li Zhizao (1565-1630).
- 1639 en *Nongzheng Quanshu* (Tratado completo sobre la administración agrícola) por Xu Guangqi
- 1664 en *Lixue huitong zhiyong* (Una integración de estudios calendáricos. Parte sobre Aplicaciones) por Xue Fengzuo (1600-1680); incluyó una sección sobre hidráulica con ilustraciones de tornillos de Arquímedes copiados de *Taixi shuifa* y *Qiqi tushuo*)
- 1742 en *Shoushi Tongkao* (Compendio de obras y días), compilado bajo el emperador Qianlong
- 1781-2 en *Siku Quanshu* (Colección completa en Cuatro Tesoros), la gran enciclopedia compilada bajo el emperador Qianlong
- 1830 reimpresión completa
- 1844 en *Shoushangge Congshu* (La Colección del pabellón de observación de montañas)

Al igual que *Taixi shuifa*, *Zhifang waiji* también fue reimpresso en *Tianxue Chuhan*, *Siku quanshu* y *Shoushang Congshu*; Además, en 1808+ se incluyó en *Mohai Jinhu* (Vaso de oro en un mar de tinta). *Qiqi tushuo* se incluyó en *Gujin Tushu Jicheng* (Colección completa de las ilustraciones y la escritura desde los primeros tiempos a los actuales) (1724-6); la gran enciclopedia compilada bajo el emperador Kangxi, y nuevamente *Siku Quanshu* y *Shoushangge Congshu*. Además, en 1830 se publicó una nueva reimpresión. Las citas frecuentes, reimpressiones y la inclusión en enciclopedias imperiales muestran la importancia que le conceden a *Taixi shuifa*, *Zhifang waiji* y *Qiqi tushuo* diversos académicos y gobernantes. Sin embargo, debido a que estos libros se referían principalmente a conocimiento de las máquinas y de los países fuera de China, nunca adquirieron un alto estatus a los ojos de los funcionarios gubernamentales, que preferían los libros de moral tradicional y la filosofía.

TORNILLO DE ARQUÍMEDES EN COREA

Dado que Corea era un reino tributario del Imperio chino; su gobierno frecuentemente enviaba delegaciones tributarias a Peking. Las delegaciones eran frecuentemente encabezadas por altos funcionarios con un excelente conocimiento del idioma chino escrito, que también funcionaba como el idioma oficial del gobierno y de los eruditos en Corea. Durante el largo viaje a Pekín, ellos observaban de cerca las prácticas chinas en los pueblos y ciudades que pasaban. Una vez en Pekín, miembros de la delegación aprovechaban la oportunidad de obtener libros e información sobre los últimos avances en China, que ellos reportaban en largos informes

después de su regreso a Corea. A veces, los miembros más aventureros visitaban la residencia de los jesuitas; en especial para aprender sobre los últimos métodos para preparar el calendario y otras novedades occidentales. Por lo tanto las misiones tributarias podían servir como un vehículo ideal para transferir este nuevo conocimiento chino y occidental a Corea. Dado que Corea, al igual que China, era una sociedad agrícola, algunos informes oficiales o diarios privados por miembros de la delegación informaban sobre tecnologías agrícolas útiles, tales como nuevos dispositivos de elevación de agua para el riego. En este contexto, el tornillo de Arquímedes fue mencionado varias veces por los funcionarios escolares coreanos. Los ejemplos son:

- 1760 Yi Ik (1681-1763), erudito; escribió en *Sŏngho Sasŏl* acerca de los beneficios del equipo de elevación de agua occidental "cola de dragón" (= tornillo de Arquímedes) para el riego;
- 1783 Seo Hosu (1736-1799), erudito y diplomático; sugirió al rey Jeongjo adoptar el Yongma-cha (tornillo de Arquímedes) (Korean Minjok Leadership Academy, 2013);
- 1790s Pak Jiwon (1737-1805), filósofo, escritor, burócrata; acompañó en 1780 al enviado real para felicitar al emperador Qianlong en su 70 cumpleaños; escribió en el Diario Jehol (= *Yorh ilgi*) sobre la bomba de tornillo de Arquímedes, y mencionó *Qiqi tushuo*, *Nongzheng Quanshu*, así como otros libros sobre tecnología.

Otro erudito coreano, Ch'oe Hangi (1803-1877) publicó bajo nombres ligeramente diferentes versiones abreviadas de *Taixi shuifa* y *Qiqi tushuo* en 1834 y 1842, respectivamente. De este modo, tomó más de 200 años que estos dos libros de máquinas estuvieran disponibles en versiones impresas en Corea. Durante estos 200 años, la tecnología en Corea y China parece haberse mantenido prácticamente sin cambios. Las Figuras 4 y 5 muestran muy claramente que la versión coreana copió las ilustraciones del original chino, sin ninguna modificación. Baste decir que los textos chinos fueron también ampliamente copiados por Ch'oe.

Cabe señalar que sólo una pequeña minoría de los funcionarios eruditos podía leer tales libros. Al igual que en China, a menudo ellos despreciaban el trabajo manual y no debe ser ninguna sorpresa que no se haya encontrado algún registro de la construcción de un tornillo de Arquímedes en Corea.

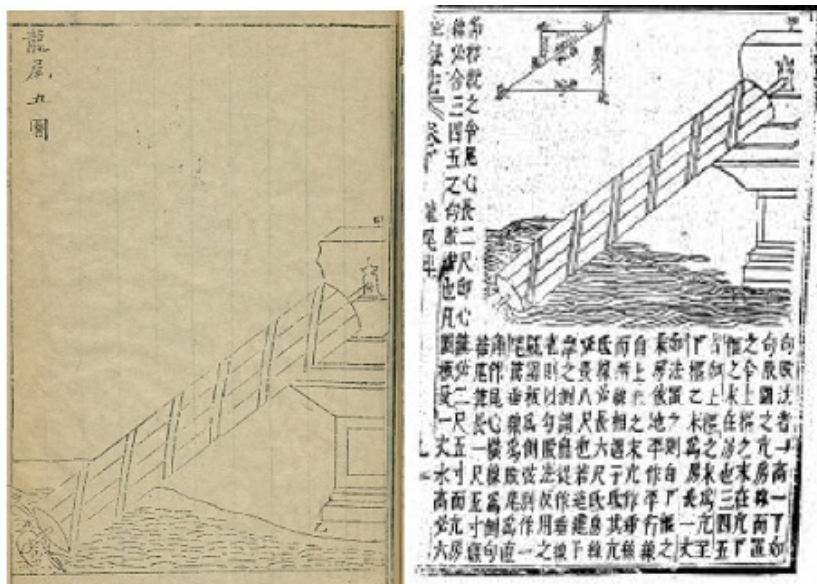


Figura 4.- Tornillo de Arquímedes

Izquierda: Sabatino de Ursis y Xu (1612) *Taixi Shuifa* (*Métodos hidráulicos de Occidente*)

Derecha: Ch'oe Han-gi (1834) *Yukhaeböp* (*Técnicas de Hidráulicas*)

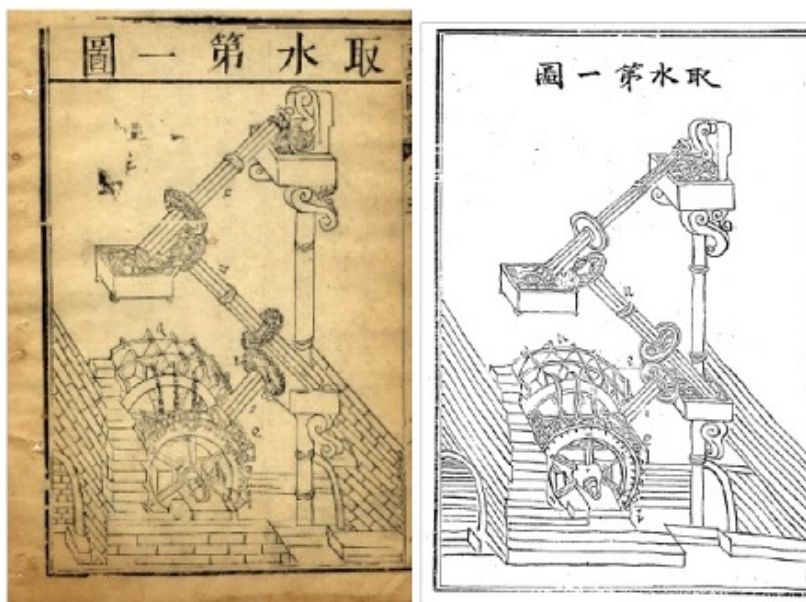


Figura 5.- Tornillo de Arquímedes

Izquierda: Schreck y Wang (1628) *Qiqi tusho* (*Diagramas y explicaciones de las maravillosas máquinas de Occidente*)

Derecha: Ch'oe Han-gi (1834) *Simgi tosöl* (*Ilustraciones y explicaciones de máquinas importantes*)

TORNILLO DE ARQUÍMEDES EN JAPÓN

A partir de alrededor de 1635 hasta 1853 Japón siguió una política aislacionista de confinamiento nacional. Además, desde 1630 hasta 1720 se prohibió específicamente la importación de libros chinos de 32 autores cristianos, entre ellos *Taixi shuifa*, *Zhifang waiji* y *Qiqi tushuo*. Fue sólo después que el shogun Yoshimune relajó las reglas en 1720 que la afluencia de libros extranjeros y sus traducciones entraron en Japón. *Zhifang waiji* se importó oficialmente en 1721, *Qiqi tushuo* en 1736 (Oba1996); una edición completa de la *Qiqi tushuo* japonesa fue impresa en 1830, pero no existen registros sobre *Taixi shuifa*.

Por lo tanto, fue una gran sorpresa cuando Treptow (1918) publicó fotos de un rollo con una imagen de una mina de oro japonesa en la isla de Sado en la que se muestran tornillos de Arquímedes (Figura 6). Tales rollos eran desconocidos en Occidente hasta finales del siglo XIX, cuando los ingenieros de minas extranjeros contratados por el gobierno japonés u otros visitantes tempranos los sacaron a luz. Los rollos mostraron ilustraciones detalladas de los diversos procesos de extracción de oro; desde la entrada de la mina a la obra, drenaje, ventilación y procesamiento de mineral subterráneo hasta el producto final y su venta, todo ello acompañado de subtítulos con breves explicaciones. Los rollos eran de hasta 20 metros de largo, de unos 25 cm de ancho, coloreados a mano y de gran interés especialmente para historiadores de la minería. Los rollos generalmente no están fechados, pero se originaron entre la década de 1730 y 1850; los artistas por lo general son anónimos. Mathias (2013) da una buena visión sobre la historia y el significado de los rollos de minería. Ella informa que hasta octubre de 2009 investigadores japoneses han reunido más de un centenar de rollos de Sado en todo Japón. Fuera de Japón, he identificado hasta el momento 32 rollos Sado en museos, publicaciones o sitios web, incluyendo dos por un vendedor de libros. De estos, nueve muestran tornillos de Arquímedes usados para drenaje, 11 no muestran ilustraciones, y el resto se mantiene desconocido. Cinco de las nueve ilustraciones muestra tornillos individuales (todos en depósitos aluviales), uno un tornillo doble en serie, y tres muestran un tornillo de triple en serie. En Japón, Sugimoto y Swain (1978) reportan incluso el caso de un tornillo séptuple (ver las Figuras 6 y 7). Las ilustraciones se ven muy similares, lo que implica un "rollo maestro" general, con variaciones individuales dependiendo del artista, año, objetivo, lector objetivo, etc. Una distinción entre originales y copias es difícil.

Entonces, ¿cómo llegó el tornillo de Arquímedes a Japón? Nagase-Reimer (2013) escribe: "En 1637 un tornillo de Arquímedes de madera llamado *suishorin* se utilizó por primera vez en las minas de Sado. Suigako Soho, un investigador ciego que había estudiado esta técnica en Nagasaki, había sido invitado a venir a Sado de Osaka para construir el dispositivo en el sitio". En un momento, de 200 a 300 tornillos de Arquímedes accionados manualmente eran empleadas en las minas Sado. Nagase-Reimer (2013) escribe más adelante: "Es probable que la técnica del tornillo de Arquímedes fuera traído desde China a Japón. *Taixi shuifa* contiene una descripción del tornillo de Arquímedes... parecería que Suigaku obtuvo y estudió el libro antes de 1630, o que copias circularon clandestinamente incluso durante el período de la prohibición.". Restos y planos de tornillos aún se conservan en el Museo del Pueblo de Aikawa en la isla de Sado. Hay una sorprendente semejanza entre los tornillos japoneses y los de *Taixi shuifa* en términos de forma, longitud, diámetro e inclinación, sugiriendo fuertemente el diseño

basado en *Taixi shuifa* y, en el fondo, en Vitruvio (ver también Cigola y Fang, 2016). En otro lugar, Todd (1998) da 1618 como el año de la primera aplicación del tornillo de Arquímedes, el Museo del Pueblo de Aikawa indica el año 1653. A pesar de la fecha incierta y la historia improbable del ciego Suigaku, resultó ser Japón en lugar de China el verdadero beneficiario de esta particular transferencia de conocimiento entre Occidente y Oriente.

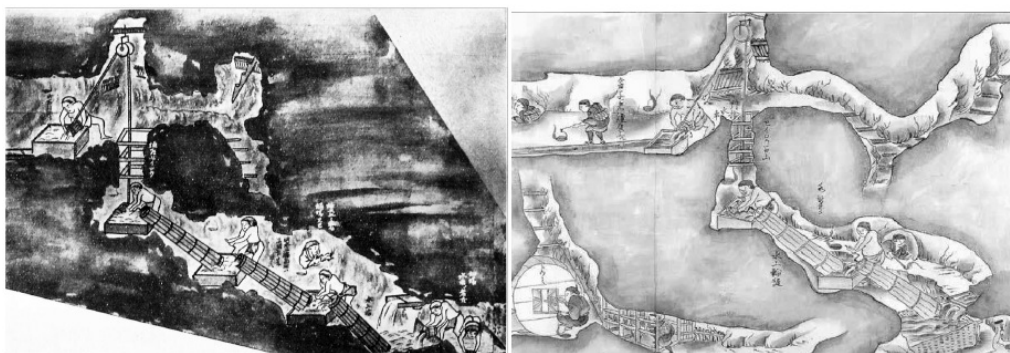


Figura 6.- Dibujos obtenidos de Rollos de Minería de Oro en la Isla Sado en Japón
Izquierda: Tornillo de Arquímedes triple (Treptow, 1918)
Derecha: Tornillo de Arquímedes doble (Lentzch, 2008)



Figura 7.- Dibujos obtenidos de Rollos de Minería de Oro en la Isla Sado en Japón
Izquierda: Tornillo de Arquímedes único (Winkelmann, 1964)
Derecha: Tornillo de Arquímedes séptuple (National Archives of Japan Digital Archive)

CONCLUSION

Se demostró que el tornillo de Arquímedes se introdujo en China a través de tres libros co-escritos por misioneros jesuitas y sus colaboradores chinos, a saber *Taixi shuifa* (1612), *Zhifang waiji* (1623) y *Qiqi tushuo* (1627). *Taixi shuifa* fue el más influyente debido a su descripción detallada y dibujos para la construcción de los tornillos, los que se basaban en *De architectura* de Vitruvio. Aunque altamente elogiado por muchos eruditos chinos y a pesar de

las muchas reimpresiones de *Taixi shuifa*, el tornillo de Arquímedes rara vez se aplicó en irrigación como se pretendía originalmente. El conocimiento del tornillo fue transferido a Corea por miembros de delegaciones tributarias que visitaban la Corte Imperial en Pekín; sin embargo, sin ningún impacto significativo. Sorprendentemente, *Taixi shuifa* llegó a Japón a pesar de los rígidos controles de importación de los libros jesuitas. Los tornillos de Arquímedes fueron contruidos por cientos para ser utilizados con éxito en el drenaje de minas de oro en la isla de Sado. Esto fue ampliamente documentado en dibujos contemporáneos en rollos de las minas, lo que llamó la atención de ingenieros de minas occidentales solo a finales del siglo XIX. Por lo tanto, contrario a la intención original de *Taixi shuifa*, el tornillo de Arquímedes demostró ser más adecuado para el drenaje que para el riego.

REFERENCIAS

- Aleni, Giulio, S.J. and Yang, Tingyun 楊廷筠 (1623) *Zhifang Waiji* 職方外紀, [Chronicle of foreign lands]. Hangzhou.
- Barbaro, Daniele (1567) *De architectura libri decem, cum Commentariis Danielis Barbari*...Apud Franciscum, Franciscum Senensem & Ioan Crugher Germanum, Venetiis.
- Barbaro, Daniele (1584) *I dieci libri dell' architettura di M. Vitruvio, tradotti et commentati da Monsig. Daniel Barbaro* In Venetia, Appresso Francesco de Franceschi Senese.
- Bartoli, Daniello, S.J. (1663) *Dell' historia della Compagnia di Giesu. La Cina: Terza parte dell' Asia*. Roma, Stamperia delVarese, pp. 545-548.
- Ch'oe Han-gi (1981) *Nongsō. 13. Nongsō: Nongjōng hoeyo 3, Yukhaebōp, Simgidosōl* (農書. 13. 農書: 農政會要 3, □ 海法, 心器圖□) Han'gukhak-Munhōn-Yōn'guso, ed. Asea Munhwasa, Seoul. [1834, 1842]
- Cigola, Michela and Fang, Yibing (2016) Traces and echoes of *De Architectura* by Marcus Vitruvius Pollio in the work of Xu Guangqi in 17th century. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 11(1), 3-13.
- Engelfriet, Peter M. (1998a) *Euclid in China: the genesis of the first Chinese translation of Euclid's Elements, books IVI (Jihe yuanben, Beijing, 1607) and its reception up to 1723*. Brill, Leiden, 455.
- Engelfriet, Peter M. (1998b) *Euclid in China: the genesis of the first Chinese translation of Euclid's Elements, books IVI (Jihe yuanben, Beijing, 1607) and its reception up to 1723*. Brill, Leiden, 338-341
- .Gottschalk, J. (2007) Technische Verbesserungsvorschläge im Oberharzer Bergbau. In: E. Stein und P. Wriggers (Hrsg.) *Gottfried Wilhelm Leibniz. Das Wirken des grossen Universalgelehrten als Philosoph, Mathematiker, Physiker, Techniker*, 2. Aufl. Leibniz Universität Hannover, Hannover, S. 109-132.
- Koenig, A. (2014) Western books on hydraulics in the historic Beitang Library of the Jesuits in Beijing, China (1583-1773)". *eProceedings, IWA Regional Symposium on Water, Wastewater and Environment: Traditions and Culture*, 22-24 March 2014, Patras, Greece, 251-264.
- Koenig, A. (2015) Giulio Aleni S.J. (1582-1649) and the introduction of Western water supply methods to 17th century China. *e-proceedings 4th IWA International Symposium on*

- Water and Wastewater in Ancient Civilizations (WWAC2016)*, September 19-21, 2016, Coimbra, Portugal, paper ID_24.
- Koenig, A. (2018) Hydrotechnical activities of Ferdinand Verbiest S.J. and other Jesuits in China. In: *Catholicism's encounters with China. 17th to 20th century*, Alexander Chen Tsung-Ming (ed.). Leuven Chinese Studies 39, Ferdinand Verbiest Institute, KU Leuven, Belgium, 31-63.
- Korean Minjok Leadership Academy (2013) *History of Water-Power in Korea, in Comparison with China and Europe*. <https://www.zum.de/whkmla/sp/1314/lsi/lsilog.html#26>
- Kwong, Luke S. (2001) Self and society in modern China: Liu E (1857-1909) and “Laocan youji”. *T'oung Pao*, second series, vol. 87, Fasc. 4/5, pp. 360-392.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (2006) *Der Briefwechsel mit den Jesuiten in China (1689-1714)*. Herausgegeben und mit einer Einleitung versehen von Rita Widmaier; Textherstellung und Übersetzung von Malte-Rudolf Babin. Französisch/lateinisch – deutsch. Felix Meiner Verlag, Hamburg, 10-25.
- Lentzsch, Susann (2018) Die japanische Bildrolle mit Bergbaudarstellungen des Stadt- und Bergbaumuseums Freiberg. In: *Mitteilungen des Freiburger Altertumsvereins* 111/112, S. 129-163.
- Mathias, Regine (2013) Picture scrolls as historical source in Japanese mining. In: Nanny Kim and Keiko Nagase-Reimer, eds. *Mining, moneys, and culture in early modern societies: East Asian and global perspectives*. Brill, Leiden-Boston, p. 291-310.
- Nagase-Reimer, Keiko (2013) Water drainage in the mines of Tokugawa Japan: Technological improvements and economic limitations. In: *Mining, monies, and culture in modern societies: East Asian and global perspectives*, eds. Nanny Kim, Keiko Nagase-Reimer. Brill, Leiden, p. 25-42.
- Oba, Osamu (1996) Sino-Japanese relations in the Edo period. Part Three. The discovery of banned books. Transl. Joshua A. Fogel. *Sino-Japanese Studies*, vol. 9(1), October 1996, p. 56-74.
- Pak, Chi-wŏn (2010) *The Jehol diary: Yŏrha ilgi of Pak Chiwŏn (1737-1805); translation with notes and introduction by Yang Hi Choe-Wall*. Global Oriental, Folkestone (UK). [Translation of chapters 1-3 out of 26 chapters of original work printed in 1792], pp. 159-60.
- Ramelli A. (1588) *Le Diverse Et Artificiose Machine Del Capitano Agostino...; Composte in lingua Italiana et Francese*. A Parigi in casa dell'autore [Paris].
- Schreck, Johann, S.J. and Wang Zheng 王徵 (1627) *Yuanxi qiqi tushuo luzui 遠西奇器圖□□* (often abridged as *Qiqi tushuo*) [*Diagrams and explanations of the wonderful machines of the Far West*]. Yangzhou.
- Sugimoto, Masayoshi and Swain, David L. (1978) *Science and culture in traditional Japan. A.D. 600-1854*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England, p. 187.
- Todd, Hamish (1998) The British Library's Sado Mining Scrolls. *British Library Journal*, 24(1), 130-143.
- Treptow, Emil (1918) Der älteste Bergbau und seine Hilfsmittel. In: Matschoss, Conrad, ed., *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie: Jahrbuch des Vereines Deutscher Ingenieure-8*, VDI-Verlag, Berlin, p. 155-191.

- Ursis, Sabatino de, S.J. and Xu Guangqi 徐光啟 (1612) *Taixi shuifa* 泰西水法 [*Hydraulic machinery of the West*]. Peking, China.
- Verhaeren, Hubert (1949) *Catalogue de la Bibliotheque du Pe-t'ang*. Imprimerie des Lazaristes, Pekin.
- Walravens, Hartmut (2016) Das Buch von den wunderbaren Maschinen. In: *Johannes Schreck-Terrentius SJ: Wissenschaftler und China-Missionar (1576–1630)*, Hrsg. Claudia von Collani und Erich Zettl. Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 159-181.
- Winkelmann, Heinrich (1964) Altjapanischer Goldbergbau und Hüttenbetrieb auf Sado. Handkolorierte Reproduktionen nach einem Bildwerk in der Bibliothek des Deutschen Museums in München. Eisenhütte Westfalia, Wechthin/Lünen. [Pre-modern Japanese gold mining and smelting in Sado. Hand-coloured reproductions of a picture scroll in the library of the German Museum in Munich. Westfalia Ironworks, Wechthin/Lünen.]
- Xie, Xiuqing 解秀清 (2006) *Yuanmingyuan youlan shouce* 圆明园游览手册. 北京 Beijing: 紫禁城出版社 Zijincheng Chubanshe, p. 45.
- Yi, Ik (1976) *Sŏnggho sasŏl* 星湖口占. Kyŏngmunsa, Sŏul T'ŭkpyŏlsi.
- Zhang, Baichun (2001) Archimedean mechanical knowledge in 17th century China. *21st International Congress of History of Science*, Mexico City, July 8-14, 2001.
- Zhang, Baichun and Tian, Miao (2010) Wang Zheng (1571-1644). In: Marco Ceccarelli, ed. *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science: their contributions and legacies Part II*. Springer, Dordrecht, 247-259.

ACERCA DEL AUTOR

El Profesor Albert Koenig ha dedicado más de 30 años a la academia, industria y entidades gubernamentales en varios países. En 1992 se incorporó al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Hong Kong, donde jubiló en 2009 y continúa en calidad de Profesor Adjunto. El Prof. Koenig es miembro de varias asociaciones profesionales, y del Specialist Group on Water and Wastewater in Ancient Civilizations de la International Water Association (IWA). En el ámbito de la historia de la hidráulica, ha realizado una interesante investigación en el rol que jugaron los jesuitas en la diseminación del conocimiento hidráulico en Asia, particularmente China, durante sus trabajos misioneros en los siglos 17 y 18. El trabajo que ahora se presenta en la Revista de la SOCHID fue expuesto en una sesión de trabajo del 5th IWA International Symposium on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations, llevado a cabo en Jordania en Septiembre de 2019. El Prof. Koenig amablemente accedió a que su trabajo fuese traducido al castellano y publicado en la Revista de la SOCHID.

EXPULSIONES DE SEDIMENTO FINO EN LECHOS DE GRAVAS ASOCIADO AL FLUJO SUBSUPERFICIAL

NATALIA BUSTAMANTE¹
YARKO NIÑO²

RESUMEN

Se presentan avances del trabajo experimental de la contaminación por sedimentos finos en lechos de gravas, considerando el efecto del flujo subsuperficial. Se presenta una serie de experimentos donde volúmenes de sedimento fino, cohesivo, infiltran el lecho de grava. Dependiendo de la densidad del sedimento fino, se genera un cambio en la permeabilidad del lecho de gravas y, por lo tanto, la interacción entre el flujo subsuperficial y superficial genera expulsiones de sedimentos finos de baja densidad, desde el lecho hacia la columna de agua. El objetivo es caracterizar las expulsiones de sedimentos finos desde el lecho de gravas y la dinámica del flujo asociado a estas expulsiones de sedimento. Se presenta una forma de fondo asociada a las expulsiones de sedimentos, además de los campos de magnitud de velocidad, intensidades turbulentas y vorticidad, para una expulsión de sedimentos. Los datos fueron obtenidos con la implementación de la técnica Particle Image Velocimetry (PIV), encontrando que las expulsiones están asociadas a bajas velocidades en la dirección del flujo, u , en la cercanía al lecho, y velocidades verticales, w , hacia arriba, dominantes. Adicionalmente, las interacciones turbulentas ‘outwards interactions’ resultan ser importantes en esta investigación y no solo las interacciones turbulentas ‘ejections’ y ‘sweeps’, como es la turbulencia en canales rígidos.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de lechos de grava con sedimento fino tiene un alto impacto ambiental, ya que la porosidad del sustrato se convierte en una zona potencial de almacenamiento de sedimento fino, quedando expuestos a esta contaminación los peces, invertebrados, microorganismos y plantas (Diplas & Parker, 1985; Thoms, 1987). La contaminación se da porque el sedimento fino llena los espacios intersticiales del sustrato generando cambios en la zona hiporreica tales como permeabilidad y la conductividad hidráulica del sustrato (Dermisis & Papanicolaou, 2014). Adicionalmente, investigadores como Beschta & Jackson (1979), Diplas & Parker (1985), Gibson, et al. (2009) y Huston & Fox (2014), han reportado que los

¹ Estudiante de Doctorado en Fluidodinámica, Universidad de Chile – nataliabustamante@ug.uchile.cl

² Profesor titular, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente Departamento de Ingeniería Civil, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile - ynino@ing.uchile.cl

sedimentos finos en un lecho de gravas pueden formar capas puente o capas sellos. Estas estructuras de sedimento pueden impedir el intercambio de nutrientes y de oxígeno disuelto entre el flujo superficial y subsuperficial. Además, al ser una zona de potencial almacenamiento de material contaminante (metales, arsénico, residuos mineros, etc.) el impacto ambiental resulta ser mucho mayor (Ford & Fox, 2014; Wood & Armitage, 1997). Investigadores como Iseya & Ikeda (1987) y Niño et al. (2018) reportaron una reducción de la rugosidad y del esfuerzo del corte asociados a la presencia de sedimento fino en lechos de gravas. Es importante considerar, que el impacto ambiental es mayor en el caso de derrames mineros dada su toxicidad y los altos tiempos de residencia de los metales pesados en los suelos y la posible remoción de contaminantes ante eventuales crecidas (Byrne et al., 2015).

En las regiones centro y norte de Chile la geomorfología fluvial de los cauces tiende a ser de alta pendiente, con granulometrías extendidas (Niño, 2002). Estas características morfológicas están asociadas al control litológico de la cordillera de Los Andes. En ríos de alta pendiente con granulometrías extendidas domina el transporte de fondo sobre el transporte en suspensión. Sin embargo, la presencia de sedimentos finos en los ríos chilenos puede asociarse a accidentes mineros, actividad volcánica o deslizamientos de tierra. Estos pueden aportar de forma puntual sedimentos finos cohesivos, como pumicita, relave o concentrado de cobre, los cuales pueden ser transportados en suspensión e infiltrar en el lecho de grava.

Los sedimentos finos pueden transportarse en suspensión si los remolinos turbulentos tienen una velocidad vertical dominante (Bagnold, 1966). Einstein & Li en 1956 fueron los primeros en estudiar las estructuras coherentes cerca de la pared, incluyendo las eyecciones del fluido cerca del lecho (Robinson, 1991). Los incrementos en el tamaño de la rugosidad inducen incrementos en la intensidad vertical de la turbulencia. Además, las eyecciones fuertes proporcionan la suficiente anisotropía para resuspender el sedimento y promover así la reincorporación del sedimento al transporte en suspensión (Jackson, 1976; Niño & García, 1996; Niño et al., 2003). Las eyecciones en lechos rugosos tienden a disminuir cerca del lecho, como lo dice Nakagawa et al. (1991), sugiriendo, además, que corrientes secundarias pueden modificar los patrones de eyección.

El vertimiento de concentrado de cobre ha sido estudiado por Bustamante et al. (2017) y Bustamante & Niño (2018), quienes han investigado la dinámica del vertimiento puntual de una mezcla hiperconcentrada de agua y concentrado de cobre en un canal abierto, identificando mecanismos como: suspensión, depositación e infiltración del concentrado de cobre en el lecho.

Este artículo tiene por objetivo evaluar el vertimiento puntual y, eventualmente, las eyecciones desde el lecho de dos sedimentos finos cohesivos con densidades diferentes, como son: pumiscita ($\rho = 1.7 \text{ gr/cm}^3$) y concentrado de cobre ($\rho = 4.2 \text{ gr/cm}^3$), en canales abiertos con lechos de gravas.

2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

El montaje experimental utilizado en esta investigación consta de un estanque de 0.58 m de longitud, 0.03 m de ancho y 0.63 m de altura. La estructura experimental permite cuantificar de forma independiente el flujo superficial y subsuperficial (Figura 1). Además, fue utilizado por Bustamante & Niño (2018) para estudiar percolaciones estáticas de material fino en el sustrato. Admite percolaciones hasta de 0.48 m. Los caudales superficiales utilizados en esta investigación están entre 0.01 l/s y 0.1 l/s.



Figura 1. Montaje experimental y configuración del lecho utilizado para la medición de percolaciones en el subsuelo hasta 0.48 m, flujo subsuperficial y flujo superficial.

La instrumentación del estanque consta con una válvula de entrada y dos válvulas de salida, una para el flujo superficial y otra para el subsuperficial. Además, se cuenta con una cámara Nikon D3200, de 1280 x 720 píxeles, para el análisis de transporte del material fino, y una cámara Fastcam Mini UX50, con frecuencia de muestreo hasta de 2500 fps, para el análisis de velocimetría y las eyecciones del lecho. Los caudales son aforados volumétricamente para cada experimento. Mediante el procesamiento de imágenes y, considerando la cinta métrica gris (ver Figura 1), se midió la lámina de agua. El análisis granulométrico del material fino, concentrado de cobre y pumicita, se realizó en el Laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile con el equipo Malvern Mastersizer 2000.

Configuración del sedimento

Se configuró un lecho con dos capas de sedimentos con el objetivo de evaluar la percolación estática y eyecciones de sedimento fino desde el lecho. La capa superficial con gravas medias y la capa subsuperficial con arenas o gravas finas. La capa superficial tiene una profundidad aproximada de 20 mm y un diámetro medio de $D_g=10$ mm. El material de la capa subsuperficial tiene una profundidad aproximada de 390 mm, el diámetro medio varía entre 0.7 y 5.7 mm en diferentes experimentos, es decir, desde arena fina hasta grava fina (Figura 2).

La pumicita y concentrado de cobre como materiales finos, cohesivos, han sido utilizados como materiales contaminantes en esta investigación. La pumicita tiene un diámetro medio de 0.11 mm y una densidad de 1.7 gr/cm³, y el concentrado de cobre tiene un diámetro de 40 µm y una densidad de 4.2 gr/cm³. Ambos materiales se vierten como una mezcla hiperconcentrada de material fino y agua; la pumicita con una concentración en peso del 57% y el concentrado de cobre con una concentración del 70% en peso. El vertimiento se realiza mediante un embudo con un diámetro de salida de 10 mm durante 6 s, aproximadamente.

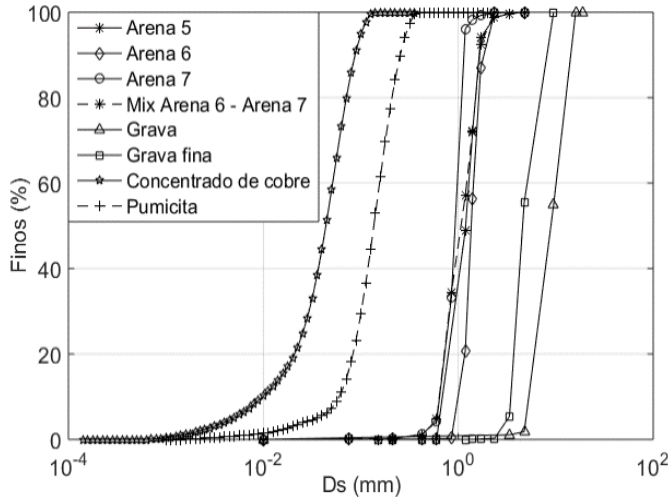


Figura 2. Curvas granulométricas de la capa superficial, la capa subsuperficial y materiales finos contaminantes (Bustamante & Niño, 2018).

Campo de Velocidades

Se implementó la técnica Particle Image Velocimetry (PIV) para la medición del campo de velocidades. Para la implementación de la técnica se utilizaron partículas finas, diámetro medio de 150 µm, con propiedades de fluorescencia ante la luz del láser, longitud de onda de 532 nm. Estas partículas fueron adaptadas por Fuentes (2017) a las reportadas por Pedocchi et al. (2008).

La adquisición de imágenes se realizó con una cámara Fastcam Mini UX50. La frecuencia de muestreo fue de 125 fps, durante 1.5 minutos, en el centro del canal y en la cercanía con las paredes. Se realizó la medición de velocidades después del vertimiento del material fino, esto con el objetivo de caracterizar las eyecciones del flujo y el sedimento fino.

El escurrimiento es sobre un canal angosto, $h/B < 3$, por lo tanto, existen corrientes secundarias en el canal y el perfil logarítmico resulta no ser válido en todo el flujo. Se implementó la metodología del doble promedio, propuesta por Nikora et al. (2004), para el procesamiento de los datos experimentales de capas límites muy rugosas. Es decir, el esfuerzo de corte total es considerado como: $\tau_{tot} = \tau_v + \tau_t + \tau_f$, donde la componente viscosa es ($\tau_v = \mu \frac{d\bar{u}}{dz}$), la componente turbulenta es ($\tau_t = -\rho \overline{u'w'}$) y la componente asociada a la forma de los granos gruesos del fondo es ($\tau_f = -\rho \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$), donde μ es la viscosidad dinámica, $\bar{u}$ es la

velocidad media, u' y w' son las fluctuaciones de velocidad en la dirección longitudinal y vertical del canal, respectivamente. $\tilde{u}$ y $\tilde{w}$ son el efecto de la rugosidad en la dirección longitudinal y vertical del canal, respectivamente.

3. Resultados

Infiltraciones y expulsiones de sedimento fino

La dinámica del sedimento fino en un canal, vertido de forma puntual como una mezcla hiperconcentrada, considera suspensión, depositación e infiltración. Posterior a la depositación e infiltración de sedimento fino se genera un cambio en la permeabilidad del lecho de gravas, por lo tanto, la interacción entre el flujo subsuperficial y superficial puede generar expulsiones de sedimentos finos de baja densidad, desde el lecho hacia la columna de agua. Los sedimentos finos con altas densidades, como el concentrado de cobre, presenta una reincorporación de finos al flujo decreciente en el tiempo. Por el contrario, sedimentos finos con bajas densidades, como la pumicita, permitieron identificar expulsiones de sedimento desde el lecho tipo chorros verticales, las cuales fueron constantes en el tiempo. Estos chorros eyectan de forma puntual el sedimento fino depositado en los intersticios del lecho de gravas y las longitudes de los chorros o expulsiones de sedimento han sido de aproximadamente 0.01 m, desde el lecho hacia el flujo superficial. (Figura 3).

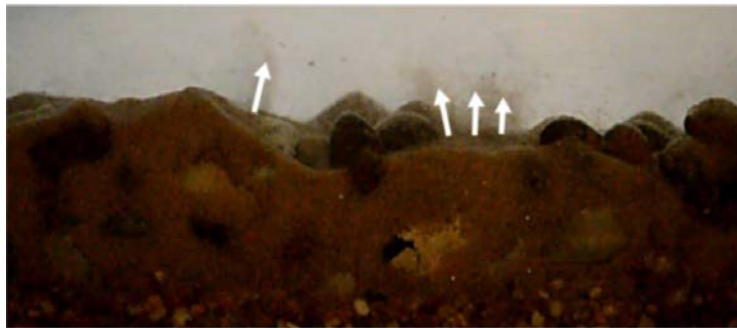


Figura 3. Eyecciones de flujo y pumicita. Para $Q_{sup} = 0.15$ l/s y $Q_{subs} = 0.038$ l/s.

La Figura 4a y b presenta dos lechos contaminados con sedimento fino, pumicita y concentrado de cobre, respectivamente. La línea roja representa el nivel máximo de la capa de gravas. Es importante resaltar la diferencia entre ambos depósitos de materiales finos. Primero, el peso del material vertido del concentrado de cobre y la pumicita tienen el mismo orden de magnitud, sin embargo, dado que las densidades son diferentes entonces el volumen vertido y depositado entre el lecho de gravas también son diferentes. Segundo, en el caso de la pumicita, el sedimento fino depositado en el lecho de gravas está por sobre el nivel de las gravas, es decir $e/D_g > 0$, y en el caso del concentrado de cobre el nivel de sedimento fino está por debajo del nivel máximo de la capa de gravas, es decir, $e/D_g < 0$, donde $e = h_s - h_g$, con h_s la altura del sedimento fino y h_g la altura de la grava. Es decir, el derrame de pumicita en el lecho de un río de gravas puede generar cambios en la rugosidad del lecho y por ende en los parámetros hidráulicos del flujo, de acuerdo a lo reportado por Niño et al. (2018). Bustamante-Penagos & Niño (2019) investigaron el derrame de concentrado de cobre en lechos de grava, encontrando una máxima reducción de la velocidad friccional, u_* , del 7 %.

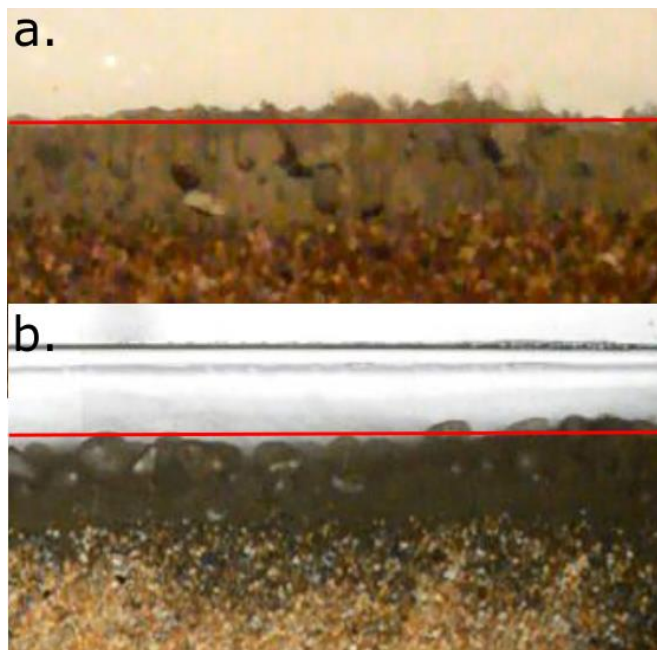


Figura 4. Depositación e infiltración de sedimento fino, **a.** pumicita, para $Q_{sup} = 0.12$ l/s y $Q_{subs} = 0.036$ l/s. **b.** concentrado de cobre para $Q_{sup} = 0.053$ l/s y $Q_{subs} = 0.0059$ l/s.

Estas expulsiones de sedimento fino o chorros de la pumacita no generan una reincorporación al transporte en suspensión o al transporte de fondo, al menos en estos experimentos. Es decir, el sedimento eyectado es depositado en la vecindad del punto de expulsión, formándose cráteres como formas de fondo. Para las condiciones del flujo utilizadas en la configuración experimental no se evidencia un avance longitudinal del sedimento de fondo en el tiempo. Sin embargo, mayores velocidades friccionales, o lo que es lo mismo, caudales, podrían modificar la dinámica de las expulsiones de sedimento fino. La Figura 5 muestra una vista en planta del lecho donde se observan las expulsiones de sedimentos finos y las formas de fondo asociadas a este tipo de estructuras.

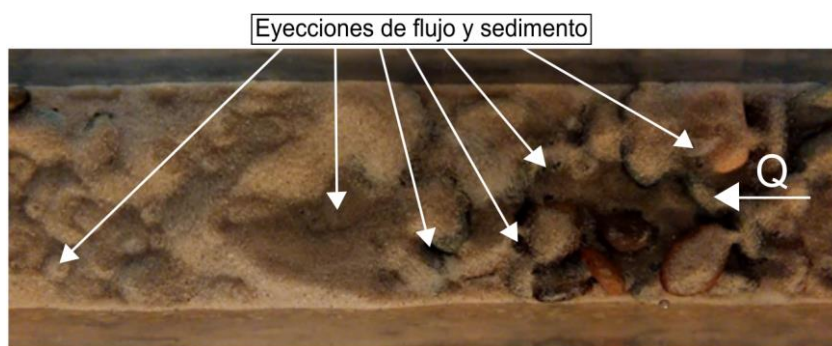


Figura 5. Vista en planta de las eyecciones de flujo y formas de fondo para $Q_{sup} = 0.12$ l/s y $Q_{subs} = 0.036$ l/s.

Campo de velocidades

Los perfiles adimensionales de velocidad media y el esfuerzo de corte doble promedio son presentados en la Figura 6. El perfil de velocidad media fue adimensionalizado con la velocidad friccional, u_* , con $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$, donde τ_0 fue estimado proyectando el perfil de esfuerzo de corte no adimensional en línea recta hasta $z/H=0.012$ (punto **a** en la Figura 6), donde H es la altura total de la lámina de agua medida desde la superficie libre hasta el nivel mínimo de la capa de gravas. Para este experimento $H=0.066$ m. La línea azul representa el nivel mínimo de la capa de gravas, (ver **a** en Figura 7) y la línea roja el nivel máximo de la capa de gravas (ver **b** en Figura 6). El perfil de velocidad media en la cercanía del lecho es negativo y estaría asociado a la presencia de expulsiones verticales de sedimento fino encontradas en esta configuración experimental. Es importante resaltar que la dinámica del flujo superficial no corresponde solamente a un flujo turbulento en canales, sino que está también la interacción entre el flujo superficial y subsuperficial como otro factor relevante de investigación. Sin embargo, el perfil medio del esfuerzo de corte es positivo, es decir, $\overline{u'w'} < 0$.

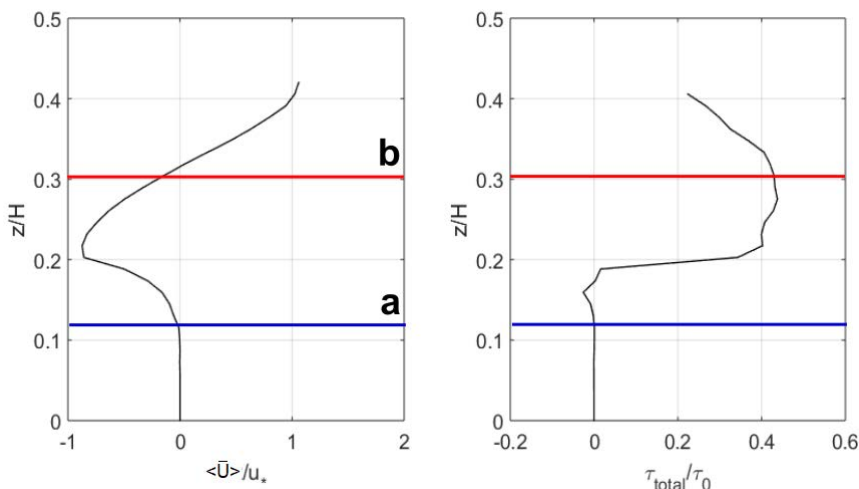


Figura 6. Perfil de velocidad media y esfuerzo de corte, obtenidos con la metodología del doble promedio para $Q_{sup} = 0.15$ l/s y $Q_{subs} = 0.036$ l/s.

La componente de velocidad media longitudinal (U) y vectores de velocidad 2D obtenidos mediante el procesamiento de PIV son presentados en la Figura 7, para tres instantes de tiempo. Las condiciones experimentales fueron: $Q_{sup} = 0.15$ l/s y $Q_{subs} = 0.036$ l/s. El movimiento vertical hacia arriba, desde el lecho hacia la columna de agua, está asociado a interacciones tipo eyecciones. Es importante resaltar que las eyecciones encontradas están relacionadas a expulsiones de sedimentos, se deben a la interacción del flujo subsuperficial con el superficial, y son diferentes a las interacciones tipo eyecciones estudiadas en lechos rígidos. Niño & García (1996), Hofland (2005), Adrian (2007), Wren et al. (2011), entre otros, han analizado interacciones turbulentas, en la cercanía de la pared y han identificado dos tipos de interacciones principales, ‘ejections’ y ‘sweeps’. Este análisis considera un plano cartesiano donde la abscisa corresponde a u' y la ordenada a w' . Las ‘ejections’ están asociadas al cuadrante 2 (Q2) y los ‘sweeps’ están asociados al cuadrante 4 (Q4), respectivamente (Figura 8a), mientras que las interacciones tipo ‘outward interactions’ e ‘inward interactions’,

asociadas al cuadrante 1 (Q1) y al cuadrante 3 (Q3), respectivamente, son menos frecuentes. Con base en este análisis de interacciones turbulentas podemos afirmar que el promedio temporal del esfuerzo de corte medido experimentalmente $\overline{u'w'} < 0$, está en el cuadrante 2 (Q2) ó en el cuadrante 4 (Q4) del plano cartesiano.

Se presenta la dispersión de las fluctuaciones turbulentas u' y w' medidas experimentalmente, en este artículo, en la Figura 8b, para los instantes de tiempo 43.6 s, 43.8 s y 44 s. Además, se presenta una elipse verde cuya dirección principal está entre Q2 y Q4 y dirección secundaria entre Q1 y Q3, mostrando así que, para esta configuración experimental, interacciones turbulentas tipo ‘outward interactions’, asociadas al cuadrante 1 (Q1), tienen mayor relevancia que en el caso de las interacciones turbulentas en pared rígida.

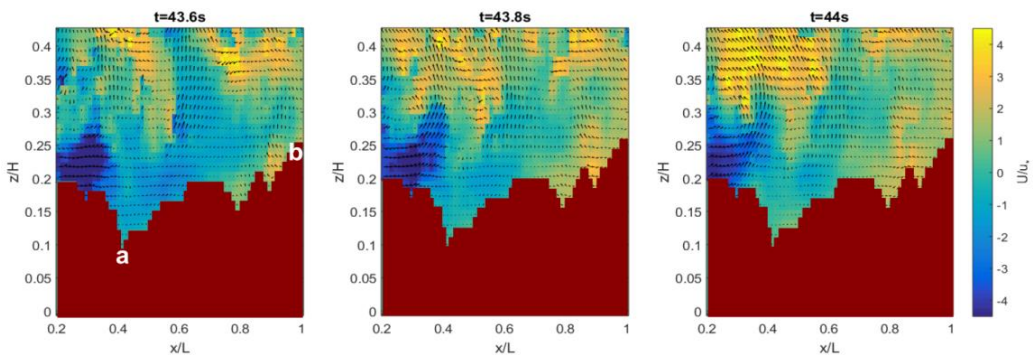


Figura 7. Campo de velocidad de la componente longitudinal (U) y vectores de velocidad en x y z , medido experimentalmente para $Q_{sup} = 0.15$ l/s y $Q_{subs} = 0.036$ l/s. El campo de medición correspondiente es $L=7.3$ cm y $H=6.6$ cm. La dirección del flujo principal es de derecha a izquierda.

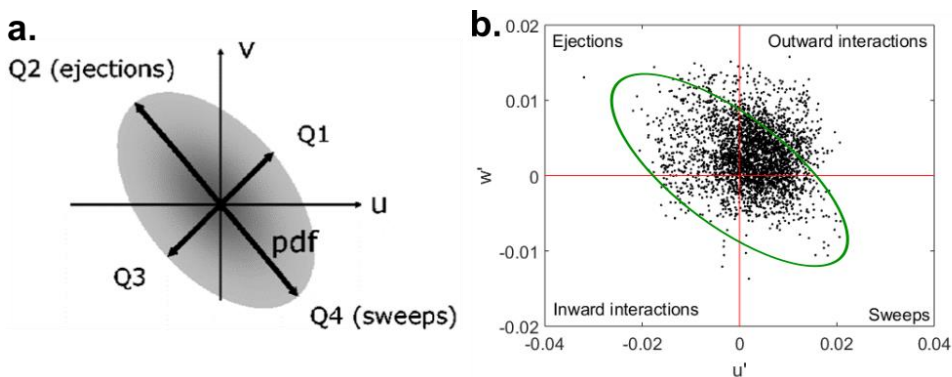


Figura 8. **a.** Dispersión para las fluctuaciones turbulentas para pared lisa (Adrian, 2007). **b.** Gráfico de dispersión para las fluctuaciones de velocidad de u' y w' , datos medidos para las siguientes condiciones experimentales $Q_{sup} = 0.15$ l/s y $Q_{subs} = 0.036$ l/s.

Los campos de la magnitud de velocidad media, vorticidad e intensidades turbulentas u' y w' en la cercanía del lecho para tres instantes de tiempo, son presentados en la Figura 9. En café se representa el lecho rugoso y las magnitudes de la velocidad media, intensidades turbulentas y vorticidad están asociadas a las barras de colores. Adicionalmente se resalta en

rojo una expulsión desde el lecho en cada instante de tiempo. Es decir, se observa la evolución temporal de esta expulsión de sedimentos finos.

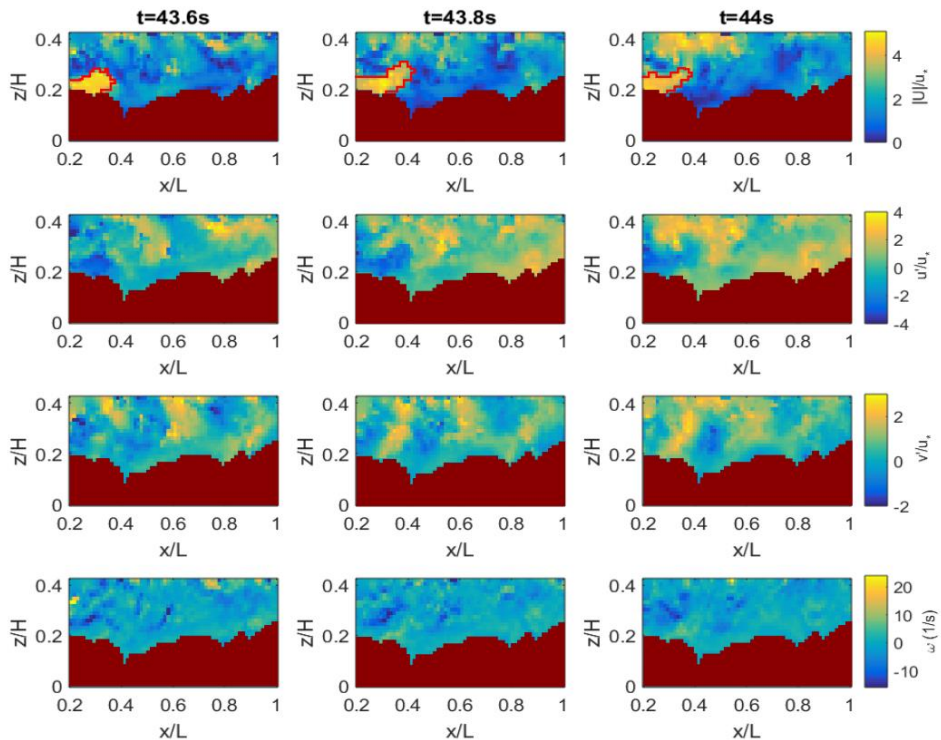


Figura 9. Campo de velocidad media, intensidades turbulentas de velocidad según x y z , y vorticidad en la cercanía del lecho para las condiciones experimentales: $Q_{sup} = 0.15$ l/s y $Q_{subs} = 0.036$ l/s. La dirección del flujo principal es de derecha a izquierda.

4. Conclusiones

El sedimento fino, pumicita y concentrado de cobre, entre los poros de las gravas, disminuye la permeabilidad y la porosidad inicial del lecho, modificando la rugosidad y los parámetros hidráulicos del flujo subsuperficial. La pumicita tiene menor densidad que el concentrado de cobre, generándose un cambio en la interacción entre el flujo subsuperficial y superficial, produciéndose expulsiones de pumicita desde el lecho hacia la columna de agua. Estas expulsiones estarían asociadas a bajas velocidades en la dirección del flujo, u , en la cercanía al lecho, y velocidades verticales, w , hacia arriba, dominantes.

La presencia de las expulsiones de sedimentos finos varía con la granulometría de la capa subsuperficial y la densidad del material fino. Es decir, granulometrías finas y baja densidad en la capa subsuperficial promueve la presencia de expulsiones de sedimento fino desde el lecho. Por el contrario, sedimentos con altas densidades, por ejemplo, el concentrado de cobre, tiene una tasa de resuspensión que disminuye en el tiempo. Al depositarse el concentrado de cobre entre los intersticios de las gravas se genera inicialmente una reincorporación de concentrado de cobre al transporte en suspensión. Posteriormente, se tiende a formar una capa sello de concentrado de cobre y, debido a su alta densidad, las intensidades turbulentas en el lecho son mucho menores a la velocidad de caída de las partículas, por lo tanto, se disminuye la

interacción entre el flujo superficial y subsuperficial y a su vez las expulsiones de sedimento.

Por otra parte, se continúan haciendo mediciones e implementando la técnica Particle Image Velocimetry con el objetivo de caracterizar por completo las estructuras de interacción turbulenta para esta configuración experimental y adicionalmente se está estudiando si las expulsiones de sedimento fino de baja densidad pudieran llegar a ser recirculantes, es decir, el sedimento fino expulsado pudiera ser depositado y nuevamente expulsado por el mismo chorro. Por otra parte, se determinará si el concentrado de cobre depositado entre las gravas forma una capa impermeable, es decir, la interacción entre el flujo superficial y subsuperficial es nula.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, al Proyecto Fondecyt 1140767, al Advanced Mining Technology Center, Proyecto CONICYT AFB180004, Conicyt beca doctorado nacional N°21181620 y a Felipe Galaz por su ayuda en el trabajo experimental.

REFERENCIAS

- Adrian, R. J. (2007). Hairpin vortex organization in wall turbulence. *Physics of Fluids*, 19(4). <https://doi.org/10.1063/1.2717527>
- Bagnold, R. A. (1966). An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics. *USGS Professional Paper*, 42. <https://doi.org/10.1017/S0016756800049074>
- Beschta, R., & Jackson, W. (1979). The Intrusion of Fine Sediments into a Stable Gravel Bed. *J. Fish. Res. Board Canada*, 36, 204–210.
- Bustamante-penagos, N., & Niño, Y. (2019). Spill of copper concentrate in gravel bed rivers : an experimental approach. *Environ. Earth Sci. (En Revisión)*.
- Bustamante, N., & Niño, Y. (2018). Percolation of the copper concentrate in a porous medium. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. In Spanish. Buenos Aires, Argentina.
- Bustamante, N., Tapia, C., & Niño, Y. (2017). Experimental Study of Copper Concentrate Spill in Gravel Beds. *XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, 14.
- Byrne, P., Hudson-edwards, K., Macklin, M., Brewer, P., & Bird, G. (2015). The long-term environmental impacts of the Mount Polley mine tailings spill, British Columbia, Canada. *Geophysical Research Abstracts*, 17(1), 6241.
- Dermisis, D., & Papanicolaou, A. N. T. (2014). The effects of protruding rock boulders in regulating sediment intrusion within the hyporheic zone of mountain streams. *Journal of Mountain Science*, 11(6), 1466–1477. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3054-9>
- Diplas, P., & Parker, G. (1985). *Pollution of Gravel Spawning Grounds due to Fine Sediment*. <https://doi.org/EPA/R-808683-01-1>
- Ford, W. I., & Fox, J. F. (2014). Model of particulate organic carbon transport in an agriculturally impacted stream. *Hydrological Processes*, 28(3), 662–675. <https://doi.org/10.1002/hyp.9569>
- Fuentes, J. (2017). Estudio Experimental del Transporte de Sedimento Mediante Tomógrafo en el Marco de la Evaluación de la Contaminación de Ríos por Sedimento Fino (p. 108). p. 108. Undergraduate thesis, Department of Civil Engineering, Universidad de Chile.
- Gibson, S., Abraham, D., Heath, R., & Schoellhamer, D. (2009). Vertical gradational

- variability of fines deposited in a gravel framework. *Sedimentology*, 56(3), 661–676. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00991.x>
- Hofland, B. (2005). *Rock & Roll: Turbulence-induced damage to granular bed protections*. Ph.D Thesis. Delft University of Technology.
- Huston, D. L., & Fox, J. F. (2014). Clogging of Fine Sediment within Gravel Substrates : Dimensional Analysis and Macroanalysis of Experiments in Hydraulic Flumes. *J. Hydraul. Eng.*, 141(8), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001015](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001015).
- Iseya, F., & Ikeda, H. (1987). Pulsations in bedload transport rates induced by a longitudinal sediment sorting: A flume study using sand and gravel mixtures. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 69(1), 15–27. <https://doi.org/10.2307/521363>
- Jackson, R. G. (1976). Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 77(3), 531–560. <https://doi.org/10.1017/S0022112076002243>
- Nakagawa, H., Tsujimoto, T., & Shimizu, Y. (1991). Turbulent flow with small relative submergence. *Lecture Notes in Earth Sciences Fluvial Hydraulics of Mountain Regions*, 33–44.
- Nikora, V., Koll, K., McEwan, I., McLean, S., & Ditttrich, A. (2004). Velocity Distribution in the Roughness Layer of Rough-Bed Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), 1036–1042. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:10\(1036\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:10(1036))
- Niño, Y., & Garcia, M. H. (1996). Experiments on particle—turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: implications for sediment transport. *Journal of Fluid Mechanics*, 326, 285–319. <https://doi.org/10.1017/S0022112096008324>
- Niño, Yarko. (2002). Simple Model for Downstream Variation of Median Sediment Size in Chilean Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(October), 934–941. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:10\(934\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:10(934))
- Niño, Yarko, Licanqueo, W., Janampa, C., & Tamburrino, A. (2018). Front of unimpeded infiltrated sand moving as sediment transport through immobile coarse gravel. *Journal of Hydraulic Research*, 1686(0022–1686), 18. <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1402828>
- Niño, Yarko, Lopez, F., & Garcia, M. (2003). Threshold for particle entrainment into suspension. *Sedimentology*, 50(2), 247–263. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00551.x>
- Pedocchi, F., Martin, J. E., & García, M. H. (2008). Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 45(1), 183. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0516-2>
- Robinson, S. (1991). Coherent Motions In The Turbulent Boundary Layer. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 23(1), 601–639. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.23.1.601>
- Thoms, M. C. (1987). Channel sedimentation within the urbanized river Tame, U.K. *Regul. Rivers Res. Manag.*, 1(3), 229–246. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450010304>
- Wood, P., & Armitage, P. (1997). Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment. *Environ. Manage.*, 21(2), 203–217. <https://doi.org/10.1007/s002679900019>
- Wren, D. G., Langendoen, E. J., & Kuhnle, R. A. (2011). Effects of sand addition on turbulent flow over an immobile gravel bed. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(1), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2010JF001859>

HIDRO-GRAFÍA



El sujeto de la figura:

- a) Está buscando una napa de agua subterránea
- b) Vio una serpiente y está quieto para que no lo ataque
- c) Está buscando dónde instalar una compuerta u obra de toma

Respuesta en el próximo número

...
 ...
 ...
 ...

...
 ...
 ...
 ...



...
 ...
 ...



...
 ...
 ...
 ...
 ...



...
 ...
 ...

...
 ...
 ...
 ...



...
 ...