

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE RESILIENCIA SOBRE DISEÑOS HIDRÁULICOS
TRADICIONALES**

MATIAS PINTO M.¹
GERALDINE ALVAREZ M.²

RESUMEN

Chile, en estos últimos años se ha visto afectado por el cambio climático y eventos extremos de la naturaleza. La normativa de diseño se actualiza de acuerdo con los eventos catastróficos que se van generando a lo largo de la historia del país, como terremotos, eventos de crecida, deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas, entre otras, enfocándose en minimizar los daños de la infraestructura. Sin embargo, no se incluyen variables como antigüedad o hechos fortuitos humanos que generan daños no considerados. Es por esto, que es primordial realizar diseños de obras adaptables, que permitan una rápida recuperación y puesta en servicio luego de detenciones por reparaciones y un constante monitoreo y mantención para su correcto funcionamiento, capacitando a la comunidad y/o sistema organizacional para su puesta en marcha en caso de falla.

En este sentido, el diseño de infraestructura resiliente crea una gran oportunidad para poder satisfacer las necesidades de comunidades, instituciones, comercio y sistemas que conviven dentro de una ciudad a sobrevivir crisis o desafíos (inundaciones, terremotos, grandes incendios, pandemias, etc), sin detener su funcionamiento o disminuir las interrupciones por reparaciones.

Si bien en Chile la Dirección de Obras Hidráulicas incorpora la resiliencia dentro de sus diseños, el sector privado también debe y puede hacerlo, donde se pueden nombrar ejemplos alrededor del mundo que demuestran que la resiliencia es una oportunidad de negocio e inversión, esto mediante nuevas metodologías y herramientas que permitan disminuir la brecha entre quienes necesitan financiamiento para el desarrollo de proyectos resilientes y quienes están dispuestos a invertir en ellos.

Finalmente, la Ingeniería Resiliente será la metodología que permitirá evolucionar a la ingeniería tradicional hacia una visión integrada del mundo que habitamos.

¹ Ingeniero de Proyecto, Arcadis – email: matias.pinto@arcadis.com

² Ingeniero de Proyecto, Arcadis – email: geraldine.alvarez@arcadis.com

1. INTRODUCCIÓN

Las infraestructuras hidráulicas son fundamentales para la gestión hídrica. Durante siglos se han desarrollado estructuras que influyen en el curso de agua y su comportamiento para abastecer las necesidades básicas de la sociedad, contribuyendo a su desarrollo como lo son el uso de agua potable y riego (Ligget, 2002). Registros históricos muestran como ellas han ido evolucionando en el tiempo, adaptándose a diversas situaciones (Mays, 2008; Viollet 2007). Sin embargo, los manuales de diseño están basados en literatura (histórica) proponiendo herramientas de diseño obtenidas a través de la experiencia y conocimiento empírico (Tanchev, 2014), cultivando la simplicidad de las obras hidráulicas, excluyendo variables interdisciplinarias y realidad socioeconómica en su desarrollo (Erpicum *et al.*, 2020).

Actualmente, el mundo está sobreviviendo a uno de los cambios sociales más rápidos de la historia (Davis, 2016), priorizando una mejora en la calidad de vida y servicios otorgados. Por ende, el diseño de la infraestructura debe tener la capacidad de adaptarse y recuperarse rápida y eficazmente frente a múltiples amenazas, mitigando daños en la infraestructura de servicios primarios de la población, manteniendo su continuidad durante eventos extraordinarios.

La resiliencia en infraestructura o diseño se define como la capacidad de un sistema a adaptarse a condiciones cambiantes, ya sean esperadas o no, con el fin de mantener las operaciones requeridas. La ingeniería resiliente requiere un cambio de paradigma, modificando el enfoque clásico de evaluación de seguridad a enfoques multidisciplinarios que aborden dinámicas de sistemas sociotécnicos del área de estudio (Herrera *et al.*, 2015), construyendo sistemas robustos que integren el medioambiente y la participación ciudadana (Programa: Santiago Humano y Resiliente, 2021).

Chile es el quinto país con mayor exposición a riesgos naturales de Latinoamérica (INFORM-LAC, 2018) y en estos últimos años se ha visto afectado por el cambio climático y eventos extremos de la naturaleza (Revista EMB Construcción, 2019). La normativa de diseño se actualiza de acuerdo con los eventos catastróficos que se van generando a lo largo de la historia del país, como terremotos, eventos de crecida, deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas, entre otras. Se enfoca principalmente en minimizar los daños de la infraestructura. Sin embargo, no se incluyen variables como antigüedad o hechos fortuitos humanos que generan daños no considerados. Es por esto, que es primordial realizar diseños de obras flexibles, adaptables, con rápida recuperación y constante monitoreo y mantención para su correcto funcionamiento, capacitando a la comunidad y/o sistema organizacional para su puesta en marcha en caso de falla.

2. ANTECEDENTES: INGENIERÍA HIDRÁULICA TRADICIONAL

La ingeniería tradicional busca solucionar los problemas de origen y asume que en las etapas posteriores de los proyectos, operación y mantención, se realizan las tareas recomendadas para maximizar la vida útil de la infraestructura. Tradicionalmente, los diseños de obras hidráulicas son de carácter monofuncional sin considerar debidamente al sistema circundante. Sin embargo, las tendencias actuales de la sociedad y medioambiente imponen exigencias cada vez mayores a la ingeniería hidráulica, requiriendo sostenibilidad, multifuncionalidad y participación de las partes interesadas, requiriendo un trabajo colaborativo entre diferentes disciplinas (Vried *et al.*, 2014).

La falta de interdisciplinariedad limita la capacidad de predecir la respuesta del entorno ambiental a la perturbación humana y el cambio climático, como es el caso de los cauces fluviales. Por ende, es necesario de un trabajo en conjunto con diferentes disciplinas para desarrollar una ciencia eficaz para la gestión. (Serlet *et al.*, 2000)

Por ejemplo, el “Manual de Carreteras” que, si bien no es una normativa de diseño, se ha convertido en una guía adoptada y aprobada por el medio ingenieril nacional. Este manual entrega lineamientos de diseño de infraestructura vial y su respectivo saneamiento hidráulico, con el fin de establecer criterios mínimos y uniformar procedimientos e instrucciones en las distintas áreas. Se considera como una buena guía de estándares mínimos de diseño que contempla parámetros técnicos de diseño para diversas infraestructuras con el objetivo de facilitar la definición de soluciones. No obstante, no considera variables de contorno sociales, medioambientales y culturales, las cuales deberían ser incorporadas en la génesis de los proyectos.

Con respecto a los procedimientos de cálculos de hidrologías propuestas en el Manual de Carretera, el manual contiene metodologías conservadoras para la estimación de precipitaciones y/o caudales de diseño, sin incorporar aspectos de cambio climático, ni modelos predictivos. Si bien es cierto que el Manual de Carreteras está enfocado en obras menores, como saneamiento de caminos, en caminos mineros por ejemplo, es usual que al costado de ellos existan tuberías de transporte de fluidos provenientes de la producción minera, como concentrados de cobre, relaves, etc., las cuáles se podrían ver afectadas por un saneamiento diseñado con metodologías tradicionales, donde en sectores de alta montaña se ha visto afectada la línea de nieve por efectos del cambio climático y además se han evidenciado precipitaciones en temporadas de verano o estiaje, y por ende en caminos donde antes la problemática o el desafío de superar en el diseño era la nieve, ahora son las precipitaciones o el saneamiento hidráulico, el cual puede con el uso de estas metodologías puede quedar subvalorado o incluso inexistente. Lo que puede llevar a roturas de dichas tuberías con efectos ambientales y sociales mayores.

Otro ejemplo son las guías metodológicas para modificaciones de cauces y/o bocatomas, en las cuales, dentro de sus métodos hidrológicos no incorporan análisis de cambio climático donde por ejemplo, se podría incorporar el uso del “Nuevo Balance Hídrico Nacional”.

Un caso similar es lo que ocurre con el “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica” de la Dirección General de Aguas (DGA), el cual

si bien ha sido de gran utilidad desde publicación (en el años 1995) como una guía para la estimación de caudales en cuencas sin medición fluviométrica, al igual que el Manual de Carreteras, es un manual que requiere de actualización y adaptación la contingencia actual y tal vez incluir aspectos de análisis de cambio climático.

Ambos manuales antes mencionados entregan una mirada de solución técnica para facilitar el diseño de infraestructura y la normativa vigente permite determinar los parámetros mínimos a considerar en los diseños de los proyectos y se va actualizando a medida que ocurren eventos extremos a nivel nacional. La ingeniería resiliente es una metodología de trabajo innovadora que permite incorporar aristas sociales, culturales y medioambientales que la ingeniería tradicional a nivel nacional no ha tomado en cuenta a menos que la normativa lo exija.

Finalmente, la Ingeniería Resiliente será la filosofía de diseño que permitirá evolucionar a la ingeniería tradicional hacia una visión integrada del mundo que habitamos.

3. NUEVO PARADIGMA DE DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS INCORPORANDO RESILIENCIA

La ingeniería resiliente ofrece métodos a través de los cuales un sistema puede ser medido o evaluado y como este puede ser mejorado, teniendo su énfasis en cómo alcanzar el éxito, más que como evitar el fracaso. Se asocia con la habilidad de una organización para mantener, o recobrar rápidamente un estado estable, permitiendo continuar sus operaciones durante y después de un acontecimiento desafortunado importante o en presencia de un estrés significativo y continuo (Herrera *et al.*, 2015).

3.1. Principios y características de la ingeniería resiliente en la literatura

Montero, R. (2011) expone algunos principios para desarrollar una ingeniería resiliente, como compromisos de la alta dirección, basados en la asignación de recursos; flexibilidad en el diseño de los sistemas de trabajo, es decir, desarrollar obras que asimilen errores antropogénicos e impactos extraordinarios de la naturaleza, permitiendo su continuidad y facilitando la toma de decisiones para su ejecución; aprendizaje en la cotidianidad, permitiendo un ambiente organizacional que soporte los incidentes y su estrategia de adaptación, contribuyendo a consecuencias leves y garantizando su diseminación; consciencia de estado del sistema, enfocado en el constante monitoreo de las obras; y capacidad de anticipar problemas, necesidades o cambios que guíe las acciones que cambian los límites de los ambientes, teniendo como objetivo asegurar su constante funcionamiento, realizando pruebas de mantención y constantes análisis predictivos de todo tipo, a través de diversas herramientas, como modelaciones y/o evaluaciones de la situación actual en la que está emplazada la infraestructura.

3.2. Resiliencia como oportunidad de negocio

Uno de los desafíos del diseño hidráulico es la planificación de desarrollos urbanos resilientes y una óptima gestión de recursos hídricos. Generalmente se desconoce cuáles son los costos y beneficios del desarrollo de este tipo de infraestructuras resilientes. Para esto, hay una serie de marcos y herramientas digitales que se utilizan para contribuir con la comprensión de la gama completa de beneficios económicos y sociales e invertir en un sistema resiliente de corto, mediano y largo plazo. Estas herramientas están en constantes actualizaciones para incluir nuevos factores a las que la sociedad está sometida (ejemplo: pandemias, cambios climáticos, inundaciones extremas, deshielos, etc.).

Arcadis ha desarrollado proyectos resilientes a nivel mundial con el objetivo de implementar un modelo que permita determinar las distintas variables para una planificación resiliente (Piet Dircke, Global Leader, Resilience & Water Management, Arcadis, 2019). El paradigma se encarga de responder las siguientes interrogantes: ¿Dónde y cuándo se debiera invertir en resiliencia?, ¿Dónde la inversión resiliente maximiza el valor agregado?, ¿Cómo se podrían obtener los beneficios de corto y largo plazo?, ¿Cómo incorporar matrices de riesgos a un proyecto ejecutable? ¿Cómo evaluar la incorporación de seguros asociados en el análisis de riesgo en estructuras resiliente?

A nivel nacional, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) del Gobierno de Chile, cumple un rol esencial en el desarrollo de obras hidráulicas resilientes, teniendo dentro de su misión, incluir la participación de la ciudadanía en las distintas etapas de los proyectos, también tiene como objetivo proveer de servicios de infraestructura hidráulica que, considerando los efectos del cambio climático, respondan a las necesidades de las personas. Ejemplos de diseños resilientes de la DOH son muchos, dentro de los cuales, y más recientes se pueden destacar:

- “Construcción Obras Aluvionales Quebrada Paipote”, el cual se enmarca dentro del plan “Plan de Reconstrucción de Atacama”.
- Muros de control aluvional en las quebradas Esmeralda y Zofri en el sector norte de la ciudad de Iquique
- “Plan Nacional de Invierno 2021 del MOP”. La iniciativa contempla una inversión de más de 141 mil millones de pesos, lo que representa un aumento del 78% en relación con el año anterior, insertas en el plan de recuperación económica y generación de empleo para enfrentar la pandemia

Sin embargo, el desarrollo de proyectos resilientes no puede ser solo responsabilidad del gobierno, y una de las desventajas del desarrollo de estos proyectos en el sector privados, es que los inversionistas no logran valorizar el beneficio intangible de los proyectos. Como diseñadores y/o consultores de ingeniería (“The business case for resilience, Arcadis 2019”) el rol principal es conectar o disminuir la brecha entre quienes requieren de financiamiento para su proyecto y quienes están dispuestos a invertir. En dicha línea, es el sector privado el que debe buscar e invertir en el desarrollo de metodologías y herramientas que permitan combinar el diseño de un proyecto, tanto la ingeniería técnica como la ingeniería financiera. Tal es el caso de Arcadis, donde estas metodologías incluyen sesiones con un enfoque

completo en desarrollos rentables. Para respaldar estas sesiones, Arcadis realiza estudios de costo-beneficio y análisis multi-criterios para apoyar a las ciudades y a los inversores a evaluar sus opciones de resiliencia al planificar un proyecto de desarrollo urbano.

También existen otras iniciativas, como es el caso del “Resilience Analysis and Planning Tool” (o RAPT), desarrollado por el “Federal Emergency Management Agency” (o FEMA) de los Estados Unidos (USA), ya que, si bien es una herramienta desarrollada por un organismo gubernamental, es una herramienta de libre acceso, que podría ser usada por privados para análisis multi-criterios. Esta herramienta corresponde a un mapa web GIS gratuito que permite a los administradores de emergencias en a examinar la interacción de los datos de censos, ubicaciones de infraestructura y los peligros, incluidos los pronósticos meteorológicos en tiempo real, los desastres históricos y las estimaciones. frecuencia anualizada del riesgo de peligro en USA (RAPT, FEMA).

3.3. Ejemplos de sistemas hidráulicos resilientes en el mundo

- New Orleans (USA)

En respuesta a la gran cantidad de fallecidos por el Huracán Katrina en el año 2005, el U.S Army Corps of Engineers (USACE) construyó un Sistema de Reducción de Riesgo y Daños por Tormentas y Huracanes, evaluado en 14,5 billones de dólares, el cual mostró su eficacia en Agosto del 2012, cuando el huracán Isaac golpeó al Delta del Mississippi. Dicha ocasión New Orleans se mantuvo a salvo, resultando en un 100% de retorno de la inversión dentro de un año, el cual puede ser el ejemplo más existo de un proyecto resiliente. Dentro de los servicios desarrollados se pueden mencionar:

- Diseño de la estación de bombeo de aguas lluvias más grande del mundo, ubicada en el Gulf Intracoastal Waterway West Closure Cmplx.
- Planificación, desarrollo del proyecto y gestión del programa del Inner Harbor Navigation Canal (IHNC) Lake Borgne Barrier, una de las barreras de control de mareas más grandes del mundo.
- Diseño del complejo navegable Seabrook Flood Gate, el cual provee protección y una vía navegable entre el lago Pontchartrain y el IHNC.



Figura 3-1. West Closure Complex, New Orleans, USA (US Army Corps of Engineers, 2021)

- Wuhan (China):

El programa Ciudad Esponja (Sponge City) en la ciudad de Wuhan, China, se creó en respuesta al número creciente de ciudades afectadas por inundaciones, número que se ha incrementado a más del doble desde el 2008. Wuhan, ciudad de 12 millones de habitantes, se ve afectada frecuentemente por intensas precipitaciones que saturan el sistema de drenaje urbano. El programa propuso crear espacios públicos con el objetivo de absorber aguas lluvias y manejarlas en un 60%.

- Rotterdam (Holanda)

Gran parte de la ciudad de Rotterdam se ubica bajo el nivel medio del mar, es por ello que la ciudad requiere un buen manejo de las inundaciones. La iniciativa de crear plazas de agua comenzó hace una década atrás, como una medida para poder traer la inversión de control de inundaciones hacia la superficie, de manera que las personas pudieran ver su efectividad, al contrario de los tanques subterráneos para manejo de aguas lluvias, los cuales manejan de manera eficiente las aguas lluvias, pero de manera invisible para las personas en general. Esta iniciativa y la ciudad de Rotterdam ganó reconocimiento mundial con la finalización de la plaza de agua Benthemplein (2013-2014). Esta plaza se ubica en un área de riesgo de inundación, La idea fue crear un área comunitaria sumergible mediante tres piscinas deprimidas capaces de captar las aguas lluvias de la zona cercana y drenarla de manera paulatina. Cuando la plaza no está inundada, funciona como cancha de basketball, skate park e incluso un pequeño anfiteatro.



Figura 3-2. Vista área plaza Bentheplein (Resilient cities network, 2021)



Figura 3-3. Plaza Bentheplein sumergida (Resilient cities network, 2021)

- Surat (India)

La historia de la ciudad de Surat está muy ligada con el río Tapi, el cual ha sido la fuente de agua potable y riego, es la mayor vía de comercio a través de su puerto, contribuido con energía hidroeléctrica para la ciudad y mucho más. En el 2015 el suministro de agua fue de 980 millones de litros/día, incluyendo la demanda doméstica, industrial y comercial. Descargas de alcantarillado y actividades industriales no reguladas, al mismo tiempo que la invasión del agua de mar e inundaciones, que aumentan la salinidad, han empeorado la calidad del agua. La

ciudad experimentó cinco grandes inundaciones entre 1979 y 2015, y pierde un promedio de \$30 millones de dólares al año debido a las inundaciones. Las inundaciones más grandes dejan hasta el 90% de la población de Surat con agua en sus hogares, a veces con una duración de varios días, lo que significa que 6,4 millones de personas en Surat están expuestas a riesgos de inundaciones, un número que aumentará drásticamente con los impactos del cambio climático y la tasa crecimiento de la población (más de 4,5% al año).

Surat ha puesto a prueba dos proyectos basados al trabajo y las experiencias de Rotterdam, adaptándolas al contexto y las necesidades de Surat. El primero fomenta la instalación de sistemas de recolección de agua de lluvia en los techos de edificios gubernamentales e institucionales existentes, y exige su inclusión en cualquier edificio nuevo de gran altura. Hasta la fecha, se han instalado más de 1.350 sistemas de recolección de agua de lluvia y el agua recolectada repone el agua subterránea, proporciona una fuente alternativa de agua potable y fomenta la conciencia sobre la conservación del agua.

En segundo lugar, Surat está en proceso de crear su propia plaza de agua. El diseño de la plaza pública multifuncional incluye un espacio abierto diseñado para uso recreativo comunitario y actividades ceremoniales durante el festival de Ganesha. Surat se encuentra actualmente en la fase de diseño de la plaza de agua, y el diseño final de la plaza de agua con una capacidad de 2,95 millones de litros, con lo cual podrá albergar 200 millones de litros de agua de inundación y lluvia anualmente.

- Doha – India

El rápido crecimiento de la ciudad de Doha (capital de Qatar), se enfrenta con las limitadas fuentes de agua, proporcionando un gran desafío para su creciente número de habitantes y turistas. El sistema actual de suministro de agua potable solo puede almacenar agua para dos días y cualquier sequía tiene el potencial de crear una crisis de suministro muy seria en la ciudad. Para mejorar la resiliencia de la ciudad de Doha y a la seguridad del suministro de agua potable, Arcadis está apoyando a desarrollar un mega proyecto de reserva de agua. Este proyecto tendrá la capacidad de almacenar 15 millones de metros cúbicos, incrementando la seguridad del suministro de agua potable de dos a siete días, y de paso convirtiéndose en el más grande de su tipo en el mundo.

- Sao Paulo (Brasil)

En la ciudad de Sao Paulo, los asentamientos urbanos no regulados y un inadecuado programa de vivienda ha llevado a que aguas de alcantarillado sin tratamiento drenen directamente hacia el río, así como grandes niveles de contaminación, debido a lo cual la gran ciudad de Sao Paulo es vulnerable a los fenómenos meteorológicos extremos en general, así como a las inundaciones y sequías. En esta línea, Arcadis trabajó en la recuperación de las llanuras aluviales remanentes del río Tietê y transformarlas en un parque y área recreativa para la población urbana. El parque también redujo el riesgo de inundaciones en la zona oriental de São Paulo.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Actualmente las condiciones políticas, sociales y ambientales exigen que Chile enfrente y resuelva de una manera conjunta los efectos que generan los proyectos de infraestructura en las demás aristas de interés público y privado.

Las metodologías de Arcadis permiten entregar modelos de negocios en torno a una solución de desarrollo o adaptación, todo lo cual conduce a un Informe de Oportunidades de Inversión, apoyado por herramientas de análisis de costo beneficio

Estas herramientas de estudio costo-beneficio y análisis multi-criterio son utilizadas para analizar oportunidades de inversión y demostrar, a través de modelos financieros, que existe un caso de negocio para realizar una inversión en resiliencia ya sea en la transformación de una ciudad u otro sistema multidisciplinario. Además, se asignan costos y beneficios a las partes interesadas para iniciar la conversación sobre posibles mecanismos financieros que puedan destinar fondos para la resiliencia. El objetivo es mostrar el valor adicional de las medidas de resiliencia, destacar las oportunidades para capturar el valor de los desarrollos relacionados y describir los posibles acuerdos financieros para brindar resiliencia.

Dentro del sector privado de inversión, destaca el desarrollo de la minería, la cual debe tener la capacidad de adaptarse y enfrentar crisis que pudiesen ser gatillados por efectos del cambio climático, tales como la variación de la línea de nieve y sus efectos en infraestructura de alta montaña, sequía y desarrollo de plantas desalinizadoras para afrontarla, incorporación de obras hidráulicas de seguridad por aumento de volúmenes de crecidas, entre otros, que entregan un gran abanico de nuevas oportunidades que mejoren no solo el desarrollo del sector minero, sino el desarrollo de todo un país.

Un ejemplo de lo anterior, se puede encontrar en el sector de la minería en Chile, donde esta actividad representa entre un 10% y un 15% del PIB nacional y representa alrededor del 50% de las exportaciones del país (Consejo Minero, Mayo 2020), generando un alto impacto en el desarrollo del país. Por lo tanto, la incorporación de resiliencia en su infraestructura es relevante, lo cual permitiría mantener la continuidad de sus procesos productivos ante alguna crisis, disminuyendo tiempo en detenciones y reparaciones.

Si bien la Ingeniería tradicional, basadas en parámetros técnicos buscan reducir el riesgo de falla, ha mostrado su eficacia durante los años, la actualidad exige desafíos cada vez mayores cuyas demandas deben ser incluidas en etapas tempranas de cualquier obra de infraestructura.

La resiliencia debe tomarse como una metodología innovadora para el mundo y para el desarrollo de nuevas tecnologías y nuevos enfoques de ingeniería. Al adoptar un enfoque resiliente, las administraciones nacionales, regionales y municipales pueden mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, mientras que los líderes empresariales, los accionistas y las partes interesadas pueden mejorar no solo sus resultados, sino también las vidas de quienes viven en las comunidades que los rodean.

La DOH, como organismo del Gobierno de Chile, tiene entre sus objetivos, el proveer de infraestructura hidráulica con el fin de contribuir al incremento de la calidad de vida,

contrarrestar los efectos de los procesos naturales (en especiales los aluvionales), en beneficio de la ciudadanía y considerando los efectos del cambio climático, de manera que dichas infraestructuras respondan a las necesidades de manera oportuna, confiable y con costos competitivos.

No obstante, el desarrollo de infraestructuras o enfoque de obras hidráulicas resilientes no solo debe recaer en obras a desarrollar por organismos gubernamentales, ya que el sector privado también puede contribuir en ellos, y viendo el desarrollo de proyectos resilientes como una oportunidad de inversión.

Solo en el caso de la ciudad de Santiago de Chile, las oportunidades para el sector privado de incorporar la resiliencia en el diseño y desarrollo de la ciudad son inmensas, ya que cerca del 35% a 40% de la población del país vive en Santiago, por lo que su capacidad de enfrentar crisis y manteniendo la continuidad de procesos productivos, disminuyendo el tiempo de detenciones por reparaciones (inundaciones, servicios de agua potable y alcantarillado, etc) debe ser una cualidad esencial, tanto para la ciudad como para el país.

Algo similar ocurre en la minería, actividad que presenta un alto porcentaje del desarrollo del país, por lo que la resiliencia en la actividad minera va en directa relación con desarrollo del país.

Se deben incorporar nuevas metodologías y herramienta que permitan realizar evaluaciones de costo-beneficio mediante análisis multi-criterio, que incorporen a los diferentes actores, ya sean inversionistas, desarrolladores, comunidades, aspectos sociales, entre otros, de manera de disminuir la brecha entre quienes requieren o buscan alguna mejora, y por ende, requieren de financiamiento para su proyecto y quienes están dispuestos a invertir en ellos.

Con las metodologías y herramientas adecuadas de análisis, se han desarrollado proyectos resilientes alrededor del mundo, que dan muestra que la inversión resiliente si maximiza el valor agregado en el diseño, que es posible demostrar cómo se pueden obtener beneficios (ya sea a corto o largo plazo) y que a través de la resiliencia se pueden construir casos de negocio.

En resumen, la sociedad profesional si se encuentra preparada técnicamente para el desarrollo de proyectos resilientes mediante el uso de metodologías y herramientas, sin embargo, aún se debe modificar el paradigma de ingeniería tradicional e incorporar la Ingeniería resiliente dentro de sus bases.

5. REFERENCIAS

ARCADIS (2019). The business case for resilience.

ARCADIS (2020). Rethinking urban resilience cities post-pandemic

ARCADIS (2020). Resilience to recovery: Five Drivers Shaping Our New World

Davis, N. (2016). What is the fourth industrial revolution? World Economic Forum. Disponible <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/what-is-the-fourth-industrial-revolution>

Erpicum, S., Crookston, B.M., Bombardelli, F., Bung, D.B., Felder, S., Mulligan, S., Oertel, M. y Palermo, M. (2020). Hydraulic structures engineering: An evolving science in changing world. WIREs Water, e1505. <https://doi.org/10.1002/wat2.1505>.

Herrera, I., Smoker, A., Pinska-Chauvin, E., Feuerberg, B., Schwarz, M., Tom, Laursen, & Josefsson, B. (2015). Resilience engineering (re) in design: initial application of a new re assessment method to he multiple remote tower concept.

Índice de Gestión de Riesgos para América Latina y El Caribe, INFORM-LAC 2018

Liggett, J. A. (2002). What is hydraulic engineering? Journal of Hydraulic Engineering, 128(1), 10–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:1\(10](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(10)

Mays, L. W. (2008). A very brief history of hydraulic technology during antiquity. Environmental Fluid Mechanics, 8, 471–484. <https://doi.org/10.1007/s10652-008-9095-2>

Ministerio de Obras Públicas, MOP (2017). Instrucciones y criterios de diseño. Manual de Carreteras Volumen 3. Chile

Montero, R. (2011). Ingeniería de la resiliencia: nueva tendencia en la gestión de la seguridad laboral. Seguridad y Salud en el Trabajo, 63: 13-19.

Núñez-González, F. y Gutierrez, R.R. (2021). El compromiso ambiental y social, los nuevos retos y las perspectivas, de los ingenieros en Latinoamérica.

Programa “Santiago Humano y Resiliente” (2021). Santiago Humano y Resiliente. Disponible de <https://santiagoresiliente.cl/>

Resilience Analysis and Planning Tool (RAPT), Federal Emergency Management Agency, USA. Disponible en: <https://www.fema.gov/emergency-managers/practitioners/resilience-analysis-and-planning-tool>

Resilient Water Management – How Resilient Cities Share Strategies for Adapting to a Changing Climate. Disponible en:

https://resiliencitiesnetwork.org/urban_resiliences/resilient-water-management/

Serlet, A.J., López Moreira, G.A., Zolezzi, G., Wharton, G., Holker, F., Gurnell, A.M., Tockner, k., Bertoldi, W., Bruno, M.C., Jahnig, S.C., Lewandowski, J., Monaghan, M.T., Rilling, M.C., Rogato, M., Tofflon, M., Veresoglou, S.D. y Zarfl, C. (2020). SMART Research: Toward Interdisciplinary River Science in Europe. *Frontiers in Environmental Science*. Volumen 8, Artículo 63. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00063>

Tanchev, L. (2014). *Dams and appurtenant hydraulic structures* (2nd ed.). England: CRC Press.

Viollet, P. L. (2007). *Water engineering in ancient civilizations: 5000 years of history*. IAHR

Vriend, H.J., Van Koningsveld, M., Aarninkhof, S.G.J., de Vries M.B. y Baptist M.J (2014). Sustainable hydraulic engineering through building with nature. *Journal of Hydro-environment Research* xx (2014) 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2014.06.004>

West Closure Complex, U.S. Army Corps of Engineers, June 2013. Disponible en: <https://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PAO/FactSheets/WCC.pdf>

