

Revista Chilena de

INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 / N° 508 / Agosto 2026



Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 138, N° 2 / ISSN 0716 - 2340

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

José Orlandini Robert

Primer Vicepresidente

Juan Carlos Barros Monge

Segundo Vicepresidente

Jorge Yutronic Fernández

Secretaria

Alejandra Acuña Villalobos

Prosecretario

Mauro Grossi Pasche

Tesorero

Ricardo Nicolau del Roure G.

Protesorero

Cristian Hermansen Rebolledo

DIRECTORIO 2026

Alejandra Acuña Villalobos

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Alex Chechilnitzky Zwicky

Pablo Daud Miranda

Rodrigo Fernández Aguilera

Álvaro Fischer Abeliuk

Javier García Monge

Jorge Gironás León

Mauro Grossi Pasche

Gloria Henríquez Díaz

Cristian Hermansen Rebolledo

Viviana Meruane Naranjo

Germán Millán Valdés

Claudio Muñoz Zúñiga

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Christian Nicolai Orellana

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Perla Valdés Calquín

Scarlett Vásquez Paulus

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADÉMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA DE SISMOLOGÍA
E INGENIERÍA ANTISÍSMICA, ACHISINA.

Presidente: Mario Lafontaine T.

ASOCIACIÓN INTERAMERICANA
DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL –
CAPÍTULO CHILENO, AIDIS.

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA, SOCHID.

Presidente: Jorge Gironás L.

SOCIEDAD CHILENA
DE GEOTECNIA, SOCHIGE.

Presidente: Rafael Iglesias A.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
DE TRANSPORTE, SOCHITRAN.

Presidenta: Paola García T.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN
EN INGENIERÍA, SOCHEDI.

Presidente: Rodrigo Herrera V.

COMISIONES DEL INSTITUTO

Resiliencia del Sector Eléctrico Chileno.

Presidente: Cristian Hermansen R.

**Antecedentes y Reflexión sobre el Mercado
Laboral Chileno en Ingeniería.**

Presidente: Mauro Grossi P.

Hacia la Sociedad del Conocimiento.

Presidente: Alejandro Steiner T.

**Situación y Desarrollo de la Ingeniería
en las Instituciones del Estado.**

Presidente: Humberto Peña T.

**Racionalización de Permisos
para Materializar Proyectos de Inversión
e Infraestructura (Ad-hoc).**

Presidente: Pablo Daud M.

**De Mantenimiento y Conservación
de Puentes (Ad-hoc).**

Presidente: Ricardo Nicolau del Roure G.

Ingenieros en la Historia Presente.

Presidente: Miguel Ropert D.

CONSEJO CONSULTIVO

Renato Agurto Colima

Raquel Alfaro Fernandois

Iván Álvarez Valdés

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Francisco Brieva Rodríguez

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti- Cometti

Raúl Demangel Castro

Álvaro Fischer Abeliuk

Eduardo Frei Ruiz-Tagle

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Sergio Lavanchy Merino

Nicolás Majluf Sapag

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Rodrigo Muñoz Pereira

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Andrés Navarro Haeussler

Ricardo Nicolau del Roure G.

Guillermo Noguera Larraín

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

José Rodríguez Pérez

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



Nuestra portada

La integración y el desarrollo de tecnologías nucleares en el país es fundamental. Su aplicación en diversos sectores no solo fortalece de manera significativa la soberanía científica y tecnológica nacional, sino que genera un impacto positivo y directo en el bienestar de la población.

REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 508, agosto de 2026

Dirección: San Martín N° 352, Santiago
Teléfonos: (+56) 22696 8647 – (+56) 93736 0656
e-mail: secretaria@institutodeingenierosdechile.cl
www.iing.cl

DIRECTOR

Javier García M.

CONSEJO EDITORIAL

Álvaro Fischer A.
Roberto Fuenzalida G.
Tomás Guendelman B.
Jaime Illanes P.
Mauricio Sarrazin A.

REPRESENTANTE LEGAL

José Orlandini Robert

SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

EDITORIAL.

Pág. 2

PERSPECTIVAS ECONÓMICAS PARA CHILE.

Pág. 3

Conferencia del Sr. José de Gregorio R.
Decano de la Facultad de Economía y Negocios
de la Universidad de Chile.

ENERGÍA NUCLEAR EN CHILE.

Pág. 21

Áreas, Aplicaciones y Desafíos en investigación, formación de capital humano avanzado y provisión de productos y servicios.
Conferencia del Sr. Felipe Guevara, Jefe de División de Investigación y Aplicaciones Nucleares, Comisión Chilena de Energía Nuclear.

ENTREVISTA

A INGENIEROS DESTACADOS.

Pág. 44

- SR. EDUARDO FREI RUIZ-TAGLE.
- SR. FRANCISCO SUÁREZ POCH.

En lo sucesivo, antes de entregar una breve reseña del contenido de la Revista, plantearemos temas, ideas o problemas de la ingeniería, los ingenieros o el país, de manera de despertar inquietudes, abrir discusiones, promover reflexiones y tener respuestas o propuestas.

Como una primera observación cabe manifestar que la ingeniería y los ingenieros, en el ejercicio de sus funciones, están al servicio de la sociedad empleando su formación científica, el pensamiento analítico y sus conocimientos tecnológicos. Sin embargo, a pesar del significativo rol que actualmente desempeñan en la sociedad, la ingeniería y los ingenieros no parecen tener una representación y gravitación acorde a su relevancia, tanto en la administración y gestión del Estado, como en el parlamento.

¿Es esta una preocupación válida?

Para tener una visión amplia sobre el asunto, así como también respuestas, el Instituto ha designado una Comisión, “La Ingeniería en el Estado”, que ya se encuentra analizando el tema y que, en un breve plazo, debiese tener respuestas y también sugerir acciones.

La presente edición de la Revista contiene la última conferencia del año pasado y la primera de este año. La conferencia del mes de diciembre 2025, “**Perspectivas Económicas para Chile**”, fue presentada por el Sr. Decano de la Facultad de Economía y Negocios de la Universidad de Chile, don José de Gregorio. Conferencia que concitó genuino interés en la amplia audiencia (virtual), realizada en días previos a la segunda vuelta electoral para la elección presidencial, donde el tema económico fue ampliamente debatido.

La primera conferencia de este año, “**Energía Nuclear en Chile**”, fue presentada por el Jefe de la División de investigación y Aplicaciones Nucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, Sr. Felipe Guevara. Tema sobre el cual existe un bajo conocimiento con relación a lo que el país realiza en estos ámbitos y cuáles son sus capacidades, aspectos que fueron ampliamente cubiertos durante la exposición.

Adicionalmente, el presente número de la Revista contiene las semblanzas de dos destacados ingenieros. Estos son:

- El expresidente de la República don **Eduardo Frei Ruiz-Tagle**, quien relata aspectos de su vida familiar, como hijo de un Presidente, y los desafíos que debió enfrentar en su vida profesional y también las responsabilidades como Presidente de Chile.
- El ingeniero hidráulico don **Francisco Suárez Poch**, con una destacada participación en los estudios técnicos y científicos en la cuenca del río Silala, cuyos resultados permitieron sustentar sólidamente la posición de Chile ante la Corte Internacional de Justicia, en el diferendo con Bolivia.

PERSPECTIVAS ECONÓMICAS PARA CHILE

*Sr. José de Gregorio R. – Decano de la Facultad de Economía
y Negocios de la Universidad de Chile.*

El jueves 11 de diciembre de 2025 se culminó el año con la conferencia del Sr. José de Gregorio Rebecco, Decano de la Facultad de Economía y Negocios de la Universidad de Chile, quien expuso sobre el tema “Perspectivas Económicas para Chile”.

José de Gregorio es Magíster en Ingeniería e Ingeniero Civil Industrial de la Universidad de Chile, PhD en Economía del MIT. Es académico, investigador, consultor y político.

Ha sido presidente del Banco Central de Chile (en el período 2007-2011, donde simultáneamente actuó como consejero), triministro de Economía, Minería y Energía durante el primer año de la administración del presidente Ricardo Lagos. Fue Profesor y Director de Estudios de Postgrado en el Centro de Economía Aplicada de la Universidad de Chile. También Profesor de la Pontificia Universidad Católica de Chile; Profesor Visitante en Anderson School de University of California, Los Angeles (UCLA), y ha realizado clases en Massachusetts Institute of Technology (MIT).



Sr. José de Gregorio.

Ha sido Miembro del directorio ejecutivo del Programa Doctoral Latinoamericano de Economía, realizado en conjunto por el ITAM de México, la Universidad Torcuato di Tella de Argentina, y la Universidad de Chile. Miembro del Comité Ejecutivo de la Latin American and Caribbean Economic Association (LACEA) y fue Codirector del Comité Organizador del encuentro anual de LACEA. Coordinador de Políticas Económicas del Ministerio de Hacienda de Chile. Economista en el Departamento de Investigaciones del Fondo Monetario Internacional (FMI). Ha sido también consultor de organismos internacionales como FMI, Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Naciones Unidas y empresas extranjeras. Asimismo, fue Investigador Visitante en el FMI y Banco Mundial, también Investigador de CIEPLAN.

Ha publicado ampliamente en revistas académicas internacionales y libros en los temas de política monetaria, tipos de cambio, finanzas internacionales y crecimiento económico; y se ha desempeñado como árbitro y miembro de comité editoriales de revistas académicas.

A continuación, su conferencia.

Sr. Juan Carlos Barros.

—En nombre del Instituto de Ingenieros de Chile, extendiendo una cordial bienvenida a esta conferencia titulada “**Perspectivas Económicas para Chile**”. El Instituto de Ingenieros, corporación sin fines de lucro, se ha dedicado durante 137 años a contribuir a la excelencia de la ingeniería, su enseñanza y al desarrollo del país.

En este contexto, organizamos periódicamente foros, seminarios y charlas que abordan temas de relevancia nacional y que requieren ser presentados ante la comunidad. Hoy nos complace darle la bienvenida a nuestra última conferencia del año 2025, en la cual nuestro expositor, José de Gregorio, nos presentará las perspectivas económicas del país.

Él es ingeniero civil industrial de la Universidad de Chile, PhD en Economía del MIT y actual decano de la Facultad de Economía y Negocios de la Universidad de Chile. Su destacada trayectoria en el ámbito público y privado enriquece la presentación de hoy.

Al concluir, se les brindará la oportunidad de formular preguntas a nuestro expositor durante la sesión de Preguntas y Respuestas. Asimismo, solicitamos su colaboración para completar una breve encuesta diseñada para estos eventos. Finalmente, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a REUNA por hacer posible la realización de esta conferencia. Muchas gracias, y sean bienvenidos todos y todas.

Sr. José de Gregorio.

—Es un honor estar aquí con ustedes esta mañana. Permítanme disculparme porque la presentación se encuentra en inglés, pero a menudo me encuentro alternando entre ambos idiomas, lo que puede resultar en una presentación algo confusa.

La perspectiva que les compartiré hoy es, en esencia, positiva, tanto en relación con el mundo como con Chile. Debo aclarar que esta visión no es optimista; el optimismo se refiere a la tasa de cambio, mientras que lo positivo se refiere al nivel actual. Si bien no afirmo que estemos en una trayectoria positiva, considero que el nivel actual es bastante favorable, y me propongo justificar esta afirmación (Figura 1).

Chile Economic Outlook

José De Gregorio
December 2025

Figura 1

En primer lugar, me gustaría enfatizar un punto que considero crucial, y que ya está siendo abordado por diversos actores. Es importante recordar que el mundo, y en particular las economías emergentes, demuestran una notable resiliencia. Los economistas a menudo destacan los numerosos riesgos globales y los posibles eventos adversos. Sin embargo, a pesar de estas advertencias, el mundo ha demostrado una capacidad de resistencia excepcional en las últimas dos décadas y media. He elegido el período de 25 años porque coincide con el inicio de la década de los 2000, tras la crisis asiática de 1997, la cual representó la última vez que una crisis económica significativa, originada en Asia, haya tenido repercusiones globales (Figura 2).

- The world, and in particular, EMEs has been very resilient in the last 25 years.

Figura 2

Con el fin de ilustrar la resiliencia global, consideremos la Gran Recesión, desencadenada por la crisis financiera mundial en 2008, año que marcó un punto de inflexión significativo. Los datos presentados son trimestrales y se comparan con la Gran Depresión. Cabe destacar que,

durante el primer año, la trayectoria de los precios de las acciones en ambas crisis fue bastante similar. Sin embargo, posteriormente, se produjo una divergencia considerable. Tras la crisis financiera de 2007-2008, la economía experimentó una recuperación robusta, mientras que la Gran Depresión persistió durante una década, caracterizada por elevadas tasas de desempleo y dificultades económicas generalizadas a lo largo de la década de 1930. Este contraste también se refleja en la segunda Gran Recesión (Figura 3).

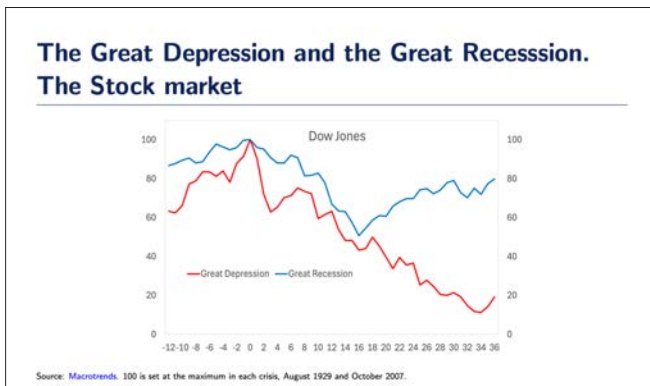


Figura 3

A continuación, se presenta un análisis del Producto Interno Bruto (PIB) durante la Gran Recesión o Crisis Financiera Global. Se incluyen dos series de datos: las líneas continuas representan el desempeño del mismo conjunto de países, mientras que la línea punteada corresponde a los datos más amplios del Fondo Monetario Internacional, que abarcan un mayor número de países.

Al observar las líneas continuas, se puede apreciar que el primer año de la Gran Recesión no presentó diferencias significativas en comparación con la Gran Depresión. Sin embargo, la recuperación fue rápida, y al año siguiente, la economía global se había recuperado.

Si consideramos la inclusión de datos globales completos, que no estaban disponibles en ese momento, se observa un crecimiento considerablemente mayor. La principal diferencia radica en la contribución de China, la cual fue un factor crucial en la recuperación de la crisis. Este análisis proporciona una comparación entre la Gran Depresión y la Gran Recesión.

Este gráfico ilustra que las líneas azul y roja representan datos equivalentes. Mi asistente, Chat GPT, me proporcionó una base de datos que me permitió generar los datos requeridos. Esta eficiencia me permitió replicar la línea azul para los mismos países que presentan la línea roja, sin necesidad de invertir un tiempo considerable, lo que ha facilitado mi trabajo (Figura 4).

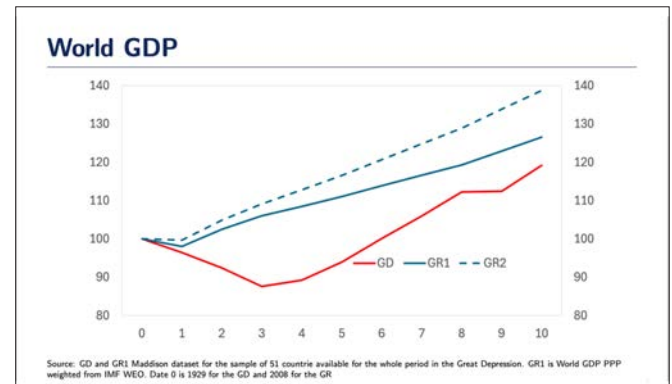


Figura 4

Sin embargo, al comparar la situación actual con la crisis del COVID-19, esta última se presenta como una crisis de primer orden de mayor magnitud. El impacto de la pandemia fue notable durante el periodo de confinamiento, que en Chile se extendió por seis meses. A pesar de mis esfuerzos por recopilar datos globales, no he encontrado información que indique el promedio de tiempo de confinamiento experimentado por el ciudadano promedio a nivel mundial. Existen ciertos indicadores, pero lo que se sabe es que a nivel mundial se implementaron numerosos cierres.

Recuerdo que, en octubre, en el Aeropuerto Internacional John F. Kennedy de Nueva York, había tres aviones con un costo de 100 millones de dólares, lo que evidenció la paralización global. Lo más notable durante la pandemia de COVID-19 es que, si bien en 2019 la producción mundial alcanzó los 100, en 2020 descendió a 97, representando una caída del 3%, como se observa en el gráfico. La barra roja, correspondiente a la Gripe Española, indica una caída del 7% en la producción mundial, aunque fue menos generalizada. Hubo aproximadamente 100 millones de muertes entre 50 y 100 millones, cifra que es objeto de debate, mientras que para COVID-19 se estima entre

5 y 20 millones. Para finales de año, ya contábamos con vacunas para COVID-19.

Las diferencias entre estos eventos son significativas. Se argumenta que durante la pandemia de COVID-19, a pesar de los prolongados cierres y el trabajo remoto, la producción mundial se mantuvo prácticamente estable, con una disminución de solo tres puntos porcentuales.

Esto presenta tanto aspectos positivos como negativos. El aspecto positivo es que logramos ser más productivos, adaptándonos al trabajo a través de plataformas como Zoom y organizando nuestros espacios de trabajo en casa. Por otro lado, se evidenció la existencia de un considerable empleo improductivo, tanto en el sector privado como público, que se volvió innecesario durante la pandemia. Esto plantea interrogantes sobre la organización del mercado laboral y el contrato social, ya que la sociedad demandaba empleo, pero no me extenderé en este tema.

En resumen, la crisis asiática, si bien fue significativa desde el punto de vista de una crisis, tuvo un impacto menor en el mundo emergente. En contraste, desde el año 2000, hemos experimentado una crisis económica comparable a la Gran Depresión y una pandemia comparable a la Gripe Española, cuyos efectos económicos fueron relativamente menores, más allá de las consecuencias humanas y sociales de la pandemia de COVID-19. Esto se debe, en mi opinión, a varios factores que abordaré con mayor detalle.

El sistema de mercado, la economía capitalista y la globalización demuestran una notable resiliencia, aspectos que abordaremos al analizar la situación actual. Si bien no se trata de una crisis, existen amenazas provenientes del gobierno de Estados Unidos y del aumento de la producción.

Sin embargo, estos sistemas perduran, incluso durante la pandemia de COVID-19. A pesar de los desafíos, el comercio continuó operando; los bienes importados podían ser adquiridos, aunque con demoras. El mundo funciona de manera relativamente independiente de muchos de estos fenómenos, ya que la empresa privada, junto con los avances tecnológicos y de ingeniería, permite que el mundo siga operando y funcionando a pesar de las disrupciones sanitarias o financieras, como las dos crisis mencionadas.

Además, se han implementado políticas económicas más efectivas y una institucionalidad más sólida, junto con una democracia más robusta. Durante la crisis financiera, se tomaron medidas que no se implementaron durante la Gran Depresión, como importantes expansiones fiscales y la actuación de los bancos centrales como prestamistas de última instancia, lo que resultó en expansiones fiscales saludables. Se aplicaron las estrategias recomendadas en clase para una economía normal, las cuales nunca se habían implementado, excepto en las economías emergentes.

En el pasado, durante una crisis, se elevaban las tasas de interés, se restringía el acceso al crédito para defender el tipo de cambio y se realizaban ajustes fiscales, lo que, en consecuencia, agravaba la situación. Los sistemas financieros eran frágiles y muchos países experimentaron crisis financieras. Nada de esto ocurrió durante la crisis financiera internacional. Esto representa un avance no solo en la fortaleza de la empresa global, sino también en la política económica.

Un fenómeno similar se observó durante la pandemia de COVID-19, donde las políticas económicas desempeñaron un papel crucial. Creo que hubo un quiebre de tendencia con la crisis financiera internacional, ya que fue la primera vez que, durante una crisis, se implementaron medidas efectivas. En particular, la economía emergente de América Latina no experimentó una crisis, lo que constituyó una demostración práctica de la eficiencia del sistema de políticas económicas implementado, permitiendo mitigar los costos asociados a una crisis (Figura 5).

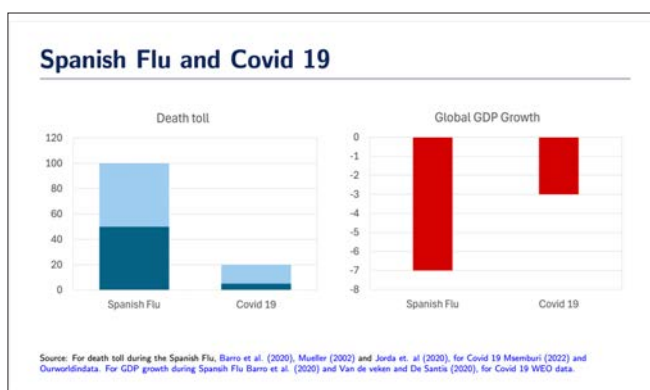


Figura 5

Posteriormente, abordaremos el tema de la inflación; sin embargo, considero que existe un segundo aspecto que respalda la visión positiva que mantengo.

El mundo no solo es más resiliente, sino que también es significativamente más rico y menos desigual en términos de consumo de lo que indican las cifras. Permítanme ilustrar este punto de manera sencilla.

En nuestras clases de economía, frecuentemente mencionamos que el Producto Interno Bruto (PIB) no captura todas las actividades económicas, especialmente aquellas con precios cero, como el trabajo doméstico. Cuando una persona realiza tareas domésticas, no recibe remuneración, por lo que estas actividades no se registran. Si, hipotéticamente, todos contratáramos a nuestros vecinos para realizar el trabajo doméstico en un círculo vicioso, el PIB aumentaría sin que hubiera un cambio neto real, debido a la inclusión de estas actividades con precios cero.

En la actualidad, las actividades con precios cero son mucho más comunes. Si bien los ingresos por factores de producción siguen siendo importantes, el consumo ha experimentado un crecimiento considerable. Permítanme presentar algunos ejemplos. En el pasado, muchos de nosotros, durante nuestra educación básica, teníamos que recurrir a nuestros vecinos para acceder a una enciclopedia y realizar trabajos escolares. Estas enciclopedias quedaban obsoletas en un plazo de cuatro o cinco años.

En la actualidad, todas las personas, independientemente de su nivel de ingresos, tienen acceso a la misma fuente de información: Wikipedia. Existen estudios que indican que Wikipedia posee un nivel de precisión y certeza comparable al de las enciclopedias tradicionales, con un margen de error similar. Estamos presenciando una transformación en la que un recurso de la misma calidad está disponible de forma gratuita para todos los ciudadanos, lo cual representa un avance positivo.

Las redes sociales y los servicios internacionales de telefonía han revolucionado la comunicación global. Hoy en día, es posible realizar llamadas telefónicas gratuitas desde cualquier parte del mundo, una posibilidad inimaginable hace una década o dos. La penetración de los teléfonos celulares ha alcanzado niveles sin precedentes, independientemente del nivel socioeconómico. Incluso familias inmigrantes

de bajos ingresos pueden mantenerse conectadas con sus seres queridos.

Como estudiante en Estados Unidos a finales de la década de 1980, las llamadas internacionales eran extremadamente costosas y poco frecuentes, limitadas a breves conversaciones. En contraste, hoy en día, las llamadas se cortan a menudo por simple aburrimiento, y se pueden realizar rápidamente para comunicarse con familiares durante los viajes. La experiencia de la comunicación ha cambiado radicalmente.

En cuanto al entretenimiento, hace 10 o 15 años, el acceso a contenido audiovisual se limitaba a las salas de cine. Actualmente, la inmensa mayoría de la población tiene acceso a plataformas como Netflix, lo que permite disfrutar de una amplia variedad de películas y series. Las conversaciones sobre contenido audiovisual se han vuelto comunes, incluso en situaciones cotidianas como un viaje en taxi. Estos cambios reflejan una transformación significativa en la forma en que consumimos entretenimiento.

Si bien el mundo sigue siendo desigual en términos de riqueza, con preocupaciones sobre la concentración de poder económico en manos de figuras como Donald Trump y los magnates de la tecnología, la distribución del ingreso es menos desigual que la de la riqueza. Sin embargo, persisten grados considerables de desigualdad.

En términos de consumo, la existencia de bienes con valor cero, como el acceso a internet, ha democratizado el consumo, permitiendo que todos accedan a los mismos recursos hasta el punto de la saciedad. Este fenómeno es crucial para comprender la dinámica del consumo moderno y ofrece una perspectiva positiva sobre el futuro, a pesar de los riesgos y desafíos que puedan surgir. La ciudadanía no solo busca garantizar la continuidad del funcionamiento del sistema, sino que también reconoce tanto sus virtudes como sus desafíos. Si bien el mundo actual presenta áreas de mejora, también ofrece aspectos positivos.

Chile, en particular, se destaca como un ejemplo de resiliencia política. Recordemos que en Chile se planteó la necesidad de una transformación radical, con un gobierno que prometió una refundación del país, desde Carabineros hasta su matriz productiva. Sin embargo, la realidad impuso un enfoque más moderado y centrista.

En la actual elección presidencial, caracterizada por la polarización, ambos candidatos coinciden en la necesidad de abordar la seguridad y promover el crecimiento económico. Sorprendentemente, temas como la reforma fiscal, la expropiación del litio o la modificación de concesiones, no forman parte del debate.

Esta convergencia, si bien positiva, también representa un riesgo para el populismo, ya que la falta de un debate más amplio facilita la propagación de soluciones simplistas, como la promesa de medicamentos baratos mediante la expropiación del litio (Figura 6).

- Economies are today richer and less unequal in terms of consumption.
- Chile has been also very resilient even in political terms

Figura 6

A nivel global, nos encontramos en el tercer gran periodo de estrés de los últimos 25 años. El primero fue la crisis financiera internacional, seguido por la pandemia de COVID-19, y actualmente enfrentamos una crisis desencadenada por las acciones del presidente del país más influyente del mundo (Figura 7).

- The world is going through significant turmoil, but the impact on the global Outlook has been moderate...until now.

Figura 7

En cuanto a las perspectivas de crecimiento mundial, las dos últimas columnas de la proyección son particularmente relevantes, ya que evidencian la diferencia entre las proyecciones actuales y las anteriores. ¿Cuál es la ventaja de la proyección del PIB para octubre de 2025 y enero de 2025 realizada por el Fondo Monetario Internacional? ¿Por qué es relevante esta información para mí? Dado que en enero aún no se habían anunciado todos los aranceles, estos no se incorporaron a las proyecciones del Fondo Monetario Internacional (FMI). Sin embargo, para octubre, las proyecciones del FMI ya los incluyen.

Realicé un análisis similar para el *World Economic Outlook*, actualizado en julio, donde la diferencia fue más significativa, indicando un impacto mayor. En primer lugar, a nivel mundial, el costo no es insignificante, pero tampoco constituye una catástrofe. Se estima una reducción acumulada del crecimiento de 0,3 puntos porcentuales en un período de dos años, atribuible a las fricciones comerciales y empresariales, así como a la incertidumbre global.

Entre los países más afectados se encuentra Estados Unidos, con una reducción estimada de 0,7 puntos porcentuales este año. Japón también experimenta un impacto relativamente significativo, dado su posicionamiento central en el conflicto comercial. Las economías emergentes se ven afectadas en menor medida, con una ligera inclinación hacia una caída en Europa. Es importante destacar que estas no son caídas reales, sino reducciones en las proyecciones de crecimiento. Por ejemplo, Argentina ha revisado su proyección de crecimiento de 5% a 4,5%. En resumen, las proyecciones iniciales eran más optimistas.

En segundo lugar, la caída no ha sido tan pronunciada y se distribuye de manera desigual a nivel mundial. Esto se puede atribuir a dos factores principales. En primer lugar, la resiliencia global que permite a los países y empresas adaptarse a las circunstancias cambiantes. Si un país no puede vender a Estados Unidos, buscará otros mercados y ajustará sus cadenas de suministro de bienes intermedios. En segundo lugar, la incertidumbre sobre las acciones futuras y las excepciones a las políticas anunciadas. En Estados Unidos, por ejemplo, existen numerosas excepciones a las políticas comerciales actuales.

En cuanto a la imposición de aranceles elevados, estos se han anunciado con una implementación diferida en varios meses, lo que genera incertidumbre sobre su fecha efectiva.

Además, se contemplan excepciones y cuotas de realismo. Hasta el momento, no se ha observado un movimiento significativo hacia una mayor inversión en Estados Unidos.

Posteriormente, abordaremos los acontecimientos recientes en el ámbito monetario y las acciones implementadas por la Reserva General. En general, considero que la economía global posee la resiliencia para adaptarse a estas circunstancias.

Sin embargo, existen temas de gran relevancia que trascienden lo económico en Estados Unidos, incluyendo decisiones cruciales de la Corte Suprema. Por ejemplo, se está evaluando si el Presidente de Estados Unidos tiene la autoridad para destituir a funcionarios que soliciten recursos gubernamentales. En los próximos meses, es probable que la Corte Suprema emita un fallo limitando la autoridad presidencial para establecer aranceles, lo que podría generar importantes disputas legales y demandas contra el Estado por el aumento de costos. A pesar de estos desafíos, hemos logrado avanzar (Figura 8).

Global growth (%)					
	2024	2025	2026	Diff 2025 Oct-Jan 2025	
				2025	2026
World	3.3	3.2	3.1	-0.1	-0.2
Adva. Ec.	1.8	1.6	1.6	-0.3	-0.2
US	2.8	2.0	2.1	-0.7	0.0
Euro Area	0.9	0.9	1.2	-0.1	-0.2
Japan	0.2	0.1	1.1	-1.0	0.3
EMDCs	4.3	4.2	4.0	-0.4	-0.5
China	5.0	4.8	4.2	0.2	-0.3
EMD Europe	3.4	1.8	2.2	-0.4	-0.2
Latam	2.4	2.4	2.3	-0.1	-0.4
Argentina	-1.3	4.5	4.0	-0.5	-1.0
Brazil	3.4	2.4	1.9	0.2	-0.3
Chile	2.6	2.5	2.0	n.d.	n.d.
Colombia	1.7	2.5	2.3	n.d.	n.d.
Mexico	1.4	1.0	1.5	-0.4	-0.5
Peru	3.3	2.9	2.7	n.d.	n.d.

Source: WEO Oct. 2025.

Figura 8

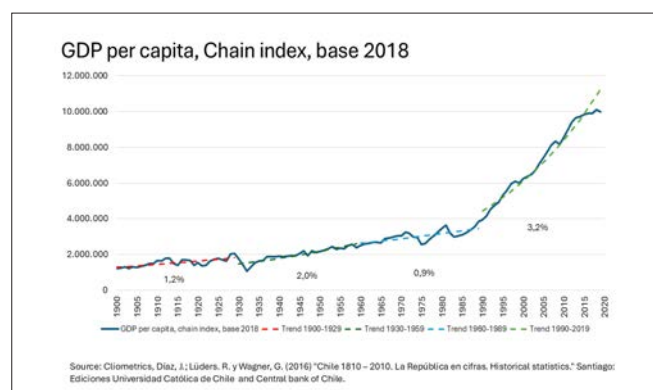
En relación con el caso de Chile, mi objetivo es proporcionar una perspectiva general antes de profundizar en los temas más relevantes (Figura 9).

Históricamente, Chile experimentó un crecimiento moderado con ciertas fluctuaciones hasta mediados de la década de 1980, con una tasa de crecimiento per cápita entre el 1% y el 2%. Este periodo, aunque más acelerado que el actual, fue menos dinámico en comparación con el periodo de la posguerra. Posteriormente, Chile alcanzó una tasa de crecimiento del 3,2% hasta principios de esta década, una

cifra muy elevada para estándares internacionales, posicionándolo entre los países con mayor crecimiento per cápita a nivel mundial durante un extenso periodo, con una tasa promedio de aproximadamente el 3%. Este periodo de crecimiento sostenido se extendió por aproximadamente 25 años, considerando tanto los picos de crecimiento como las fases de desaceleración (Figura 10).

- Chile, from miracle to slowdown and lack of productivity growth.

Figura 9



Source: Cliometrics, Díaz, J.; Lüders, R. y Wagner, G. (2016) "Chile 1810 - 2010. La República en cifras. Historical statistics." Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile and Central bank of Chile.

Figura 10

En Chile, durante el periodo de crecimiento más exitoso, que ascendió al 3,2%, se pueden identificar tres etapas distintas. La primera fase, conocida como el "milagro chileno", se caracterizó por un crecimiento del 7,4% hasta el año 1997. Posteriormente, se experimentó una etapa de crecimiento moderado, impulsado por el crecimiento de la economía mundial, representado por la línea punteada verde, que indica el crecimiento de Chile en relación con el crecimiento global. Durante esta fase, la economía chilena superó el crecimiento de la economía mundial. Sin embargo, posteriormente se entró en un periodo de

menor crecimiento, en el cual la economía chilena creció a un ritmo inferior al de la economía mundial. Se observa un crecimiento del 2,1%, pero este dato corresponde al crecimiento total, no al crecimiento per cápita.

En general, la economía chilena, representada por la línea punteada verde, ha crecido a un ritmo inferior al de la economía mundial, con la excepción de la recuperación posterior a la pandemia de COVID-19. En el caso de Chile, esta recuperación se vio impulsada por una expansión fiscal de 10 puntos porcentuales del PIB y tres retiros de fondos de pensiones.

La caída en el crecimiento económico se produce en diferentes momentos, dependiendo de la perspectiva política. Si bien 2014 marcó el inicio del segundo gobierno de la Presidenta Bachelet, el último año de crecimiento alto fue el penúltimo año del primer gobierno del Presidente Piñera. A partir del segundo gobierno del Presidente Piñera, el crecimiento se ubicó por debajo del 4%, y la desaceleración se intensificó a partir de 2013.

El análisis del crecimiento económico, tanto per cápita como total, de los últimos tres gobiernos en Chile, específicamente durante los periodos de Piñera II, Bachelet II y Boric, revela que las diferencias son mínimas. El gobierno de Piñera II registró el mayor crecimiento, seguido por el de Boric, con una diferencia aproximada de 2,5 puntos porcentuales respecto al crecimiento actual, y posteriormente el de Bachelet II. Sin embargo, al analizar el crecimiento per cápita, el orden se invierte.

El Gobierno de Boric se proyecta con un crecimiento per cápita superior al del gobierno de Piñera II. Esta diferencia se atribuye principalmente a que el crecimiento per cápita en Chile durante el gobierno de Piñera II descontaba un crecimiento poblacional del 1%. Durante el gobierno de Bachelet, el crecimiento poblacional se ubicó en aproximadamente 1,2%, lo que restó dos décimas porcentuales anuales al crecimiento per cápita del gobierno de Piñera II, debido a la inmigración, la cual posteriormente se moderó y actualmente se sitúa en torno al 0,7%. En consecuencia, el análisis per cápita ofrece una perspectiva más precisa.

Si bien existen diferencias en las tasas de crecimiento, resulta poco lógico comparar gobiernos de manera directa, ya que el ritmo de recuperación económica y la fase del

ciclo económico influyen significativamente en los resultados. En términos generales, no se observan diferencias sustanciales entre los gobiernos mencionados (Figura 11).

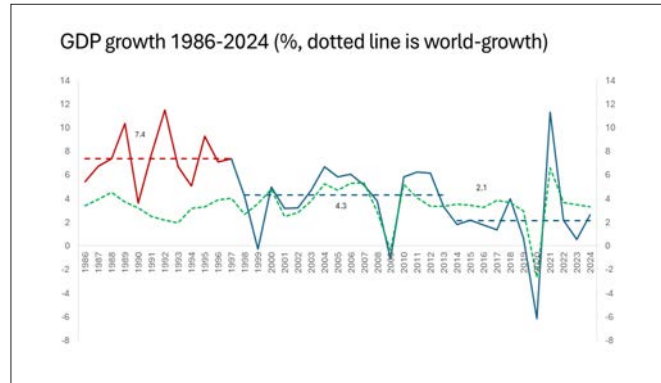


Figura 11

Esta perspectiva alternativa sugiere que la línea roja representa a Chile, la cual siempre he puesto en rojo debido a su distintiva camiseta. Sin embargo, es importante destacar que no existe una afiliación política específica con esta línea. Históricamente, Chile era considerado un país promedio dentro de América Latina durante la década de 1980. Con el retorno a la democracia en la década de 1990, Chile comenzó a recuperar sus niveles de Producto Interno Bruto (PIB) en comparación con Estados Unidos. Este gráfico ilustra el PIB per cápita de Chile en relación con el de Estados Unidos, mostrando que, en 1990, Chile representaba aproximadamente el 24% del PIB estadounidense. Posteriormente, Chile experimentó un período de crecimiento económico significativo, convirtiéndose en la economía más próspera de la región. Si bien Panamá se muestra con un PIB más alto en este gráfico, es importante considerar que Panamá pertenece a Centroamérica y al Caribe, y posee características económicas particulares.

Chile se ha consolidado como el país más rico de América Latina, compartiendo este estatus con Uruguay, ambos considerados países de alto ingreso en la región, incluyendo el Caribe. En contraste, Argentina era el país más rico en el pasado, con Uruguay siendo significativamente más próspero que Chile. Chile ha experimentado un crecimiento económico considerable, pero desde mediados de la década pasada, se observa un estancamiento (Figura 12).

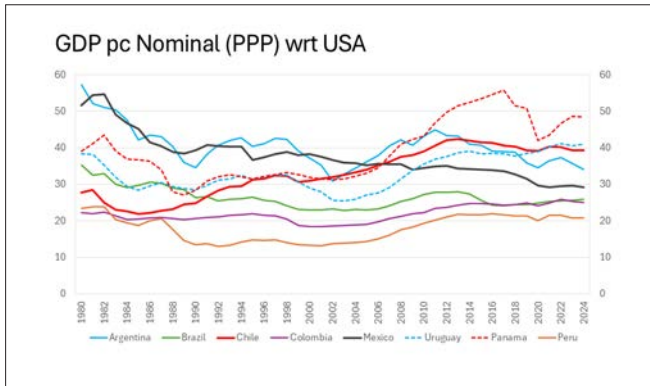


Figura 12

Para analizar la situación económica a corto plazo, podemos observar el Índice Mensual de Actividad Económica (IMACEC), que es la medición chilena del PIB. El IMACEC refleja una caída significativa seguida de una rápida recuperación en el PIB mensual.

Durante la pandemia de COVID-19, el Producto Interno Bruto (PIB) experimentó una contracción, seguido de un crecimiento limitado, a pesar de que en términos anuales se registró crecimiento en 2022. Este crecimiento era esperado, dado que el promedio del PIB en 2022 fue significativamente mayor que el de 2021, partiendo de un nivel considerablemente bajo. Posteriormente, la economía ha mostrado un crecimiento moderado, actualmente alineado con la tasa de crecimiento a largo plazo estimada por el Banco Central, que oscila entre 2% y 2,5%. Espero que esta tendencia se mantenga (Figura 13).

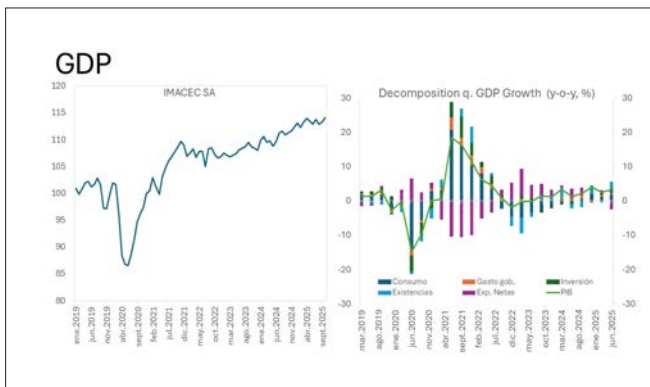


Figura 13

Cabe destacar que la inversión en Chile no ha experimentado un colapso. Lamentablemente, carecemos de datos recientes sobre la inversión minera, ya que, durante este período, particularmente debido al auge en el precio del cobre, se registró una inversión minera considerable. Este período se caracterizó por un auge significativo, con una inversión sustancial en infraestructura, incluyendo puertos y carreteras, superando la inversión habitual en la economía. La década de 1990 fue un período de auge que impulsó considerablemente el crecimiento. Si bien no hubo un colapso, es importante considerar que los promedios de inversión continúan.

La efectividad de esta inversión, así como la eficiencia y el costo de producción, son temas de considerable relevancia. Una parte significativa de esta inversión se destina a gastos necesarios para la materialización de proyectos, lo que implica una relación con la productividad y la contribución de la inversión al crecimiento económico. Es crucial distinguir entre el gasto en la obtención de la aprobación del proyecto y la realización de estudios previos, que representan una fracción menor de la inversión efectiva en comparación con los bienes de capital. Este aspecto es de suma importancia (Figura 14).

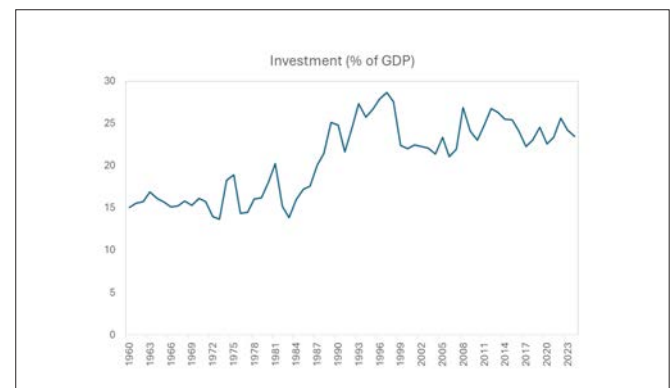


Figura 14

Los datos proporcionados por la Comisión Nacional de Productividad ilustran tres vías para el crecimiento económico: un aumento en la fuerza laboral, una mayor inversión en bienes de capital y una mejora en la productividad, que se logra mediante una combinación más eficiente del capital y el trabajo.

Durante su período de mayor crecimiento, hasta mediados de la década de 2000, Chile experimentó un fuerte impulso económico, principalmente impulsado por la productividad. Si bien hubo inversión y mejoras en la mano de obra, la productividad jugó un papel fundamental, aunque su influencia disminuyó hacia mediados de la década de 2000.

Desde entonces, el crecimiento y la productividad en Chile han sido considerablemente bajos. Esto plantea interrogantes sobre las implicaciones de esta tendencia. Es importante aclarar que un menor crecimiento y productividad no indican una disminución en la inteligencia o la eficiencia en la combinación del capital y el trabajo. No se ha observado una mayor ineficacia en las empresas.

Existen dos vías para incrementar la productividad: a través de una mayor eficiencia individual o mediante la reasignación de factores hacia sectores más productivos. Este fenómeno, denominado “creación destructiva” por Philippe Aghion y Peter Howitt, Premios Nobel de Economía 2025 e implica la desaparición de empresas o procesos ineficientes y la aparición de otros más productivos. En ausencia de creación destructiva, los recursos tienden a asignarse a actividades ineficientes.

En el caso de Chile, la evidencia disponible es limitada en comparación con Estados Unidos, lo que dificulta la estimación de estos procesos. Un estudio relevante, desde la perspectiva laboral, sugiere que Chile presenta una baja reasignación o una reasignación ineficiente, lo que representa un desafío para el crecimiento económico y la productividad.

Dos datos relevantes son los siguientes: un estudio publicado en una revista especializada indica que la probabilidad de que un trabajador, que cambia de empleo, pase a uno más productivo es del 50%. Esto sugiere una reasignación ineficiente, ya que, en una economía altamente eficiente, se esperaría que la destrucción de empleos se acompañara de una transición hacia puestos más productivos, no necesariamente mejores.

Este problema está estrechamente relacionado con la flexibilidad del mercado laboral, un factor crucial. Si bien Chile cuenta con una tasa de empleo relativamente alta, esto solo explica parcialmente la dinámica del mercado laboral. Implementar cambios para mejorar la flexibilidad laboral

no es una tarea sencilla ni inmediata, y los resultados no se manifestarían en un plazo de seis meses.

La implementación de cambios en el mercado laboral requiere tiempo y esfuerzo, dado que es un proceso gradual. Sin embargo, existe un problema significativo relacionado con el crecimiento y la capacidad del mercado laboral para adaptarse con fluidez.

Es fundamental proteger a los individuos, en lugar de a los empleos en sí. En Chile, el sistema de indemnizaciones vigente, caracterizado por su rigidez y potencial para generar conflictos, desincentiva la renuncia voluntaria, ya que los trabajadores esperan ser despedidos para poder acceder a las indemnizaciones correspondientes.

La lógica subyacente al sistema de indemnizaciones se centra en la protección del empleo en lugar de garantizar el ingreso de los individuos. Propongo la sustitución de una parte considerable del sistema actual de indemnizaciones por un sistema de subsidios, tanto para el desempleo como para el ingreso durante el empleo. Este enfoque resulta beneficioso, ya que, además de brindar apoyo, plantea una interesante discusión en el ámbito económico: si las personas se ven obligadas a buscar empleo de manera apresurada y sin un respaldo adecuado, los seguros de desempleo, más allá de su dimensión social, permiten que los individuos realicen una búsqueda más exhaustiva en el mercado laboral, evitando la aceptación de empleos que podrían resultar ineficientes. Sin embargo, estos son temas que se abordarán en una discusión posterior (Figura 15).

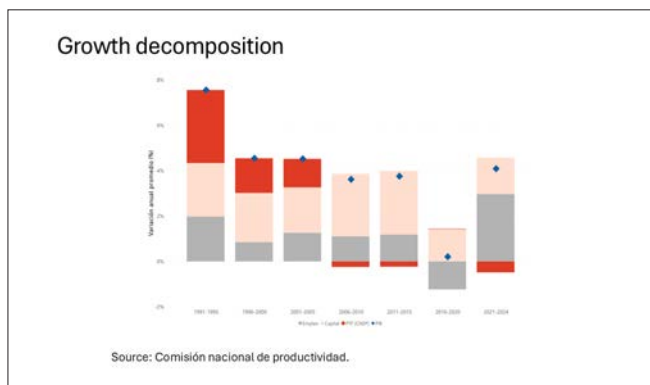


Figura 15

En cuanto al panorama laboral en Chile, se observa un crecimiento lento del empleo en el período reciente. La tasa de desempleo se encuentra en niveles ligeramente superiores, y es probable que se estabilice en lo que podríamos denominar una tasa de equilibrio, cercana al 8%, en comparación con el nivel de aproximadamente el 7% que prevalecía antes de la pandemia.

Cabe destacar un fenómeno particular: la metodología para calcular la tasa de desempleo fue objeto de cuestionamiento durante la pandemia. Si bien la tasa de desempleo aumentó del 7% al 13%, lo que representa un incremento de 6 puntos porcentuales sobre la fuerza laboral, equivalente a 600.000 personas, la realidad es que un número aún mayor de personas cesó sus actividades laborales. Estas personas dejaron de participar en la fuerza laboral, por lo que ya no se contabilizan como desempleadas. Este fenómeno se refleja en la tasa de empleo, que se define como el número de personas empleadas en relación con la población en edad de trabajar, es decir, aquellas personas de 15 años o más.

Durante la pandemia, el empleo experimentó una caída significativa, estimada en aproximadamente 15 puntos porcentuales, lo que equivale a una reducción de entre 2.000.000 y 2.500.000 personas en el número de empleos. Cabe destacar que muchos de los individuos que dejaron de trabajar se retiraron de la fuerza laboral, lo que resultó en un aumento relativamente menor de la tasa de desempleo. Si bien algunos han enfatizado la disminución de la tasa de desempleo, que pasó de 58 a aproximadamente 56 puntos porcentuales, es importante reconocer que esta reducción representa entre 250.000 y 300.000 personas (Figura 16).

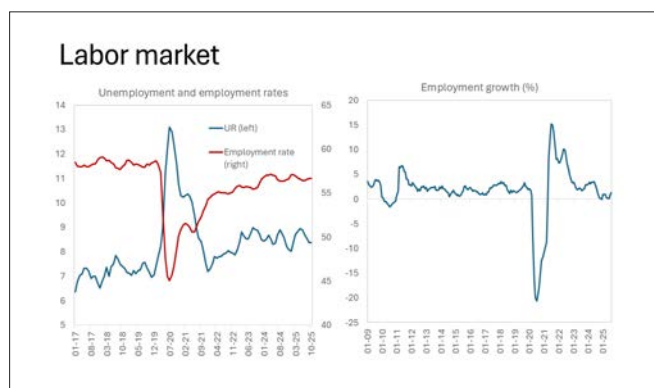


Figura 16

Si bien algunos argumentan que Chile aún enfrenta una crisis de empleo, un análisis más detallado revela que la disminución general en la tasa de empleo, representada por la línea azul en el gráfico, se atribuye principalmente a la población mayor de 65 años. Al considerar la tasa de empleo de la población entre 15 y 64 años, se observa una caída inicial seguida de una recuperación, indicada por la línea roja, que ha alcanzado niveles similares a los previos a la pandemia. Este fenómeno se puede atribuir a la implementación de la Pensión Garantizada Universal (PGU) y otras ayudas gubernamentales, que permitieron a muchos individuos en este grupo de edad dejar de trabajar.

Finalmente, es importante mencionar que los datos relacionados con el empleo en línea y la informalidad, que generan preocupación en algunos sectores, se basan en encuestas que pueden presentar distorsiones y otros problemas.

Existen individuos que, basándose en la comunidad, acceden de manera repentina a datos administrativos, como, por ejemplo, la cantidad de personas que se encuentran cotizando. El problema radica en que, al cesar la cotización por parte del empleador, el individuo es considerado informal. Si bien existe una tasa saludable, no resulta evidente cuáles son los datos más apropiados; existen algunos, pero no todos. La informalidad en Chile se sitúa aproximadamente por encima del 25%, cifra que se mantiene relativamente alta. Cabe destacar que, si bien la informalidad en Chile es considerablemente menor que en la mayoría de los países de América Latina, se encuentra por encima de los países desarrollados. Sin lugar a duda, la informalidad ha experimentado una disminución, lo cual resulta inesperado considerando su magnitud actual (Figura 17).

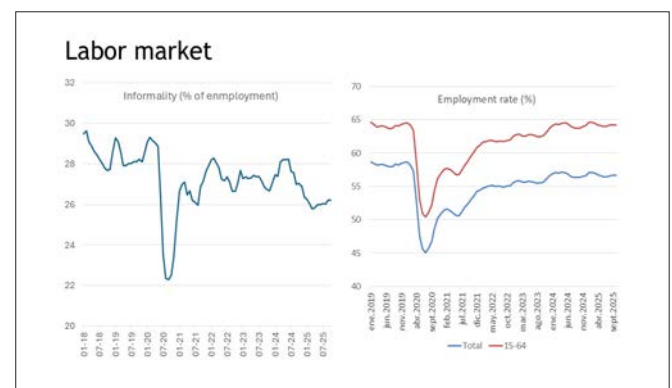


Figura 17

La economía chilena está profundizando los beneficios sociales, muchos de los cuales se asocian al trabajo formal. Las condiciones externas en Chile son sumamente favorables. Lo más notable es el comportamiento del precio del cobre, el cual ha experimentado un aumento significativo y se prevé que se mantenga en niveles elevados. Adicionalmente, el precio del petróleo ha disminuido, creando condiciones muy propicias para Chile.

Es evidente que la industria minera enfrenta desafíos significativos, los cuales son cruciales desde una perspectiva de producción. Cabe destacar que la productividad en el sector minero ha experimentado una disminución. Sin embargo, esta caída no se atribuye a una menor eficiencia por parte de los mineros, sino más bien a la disminución en la ley de los minerales extraídos.

Es importante destacar que otro sector que experimenta una disminución en la productividad es el de la construcción, el cual se encuentra entre los que registran la mayor caída a nivel mundial. Sin embargo, esta disminución no se atribuye a una mayor ineficiencia. No considero que hayamos sustituido tractores por palas o palas por cucharas. La causa principal radica en los considerables gastos necesarios para materializar los proyectos, los cuales representan una inversión y, por ende, gastos relativamente elevados. A pesar de esto, las condiciones de TENA seguirán siendo favorables desde la perspectiva del tipo de cambio (Figura 18).

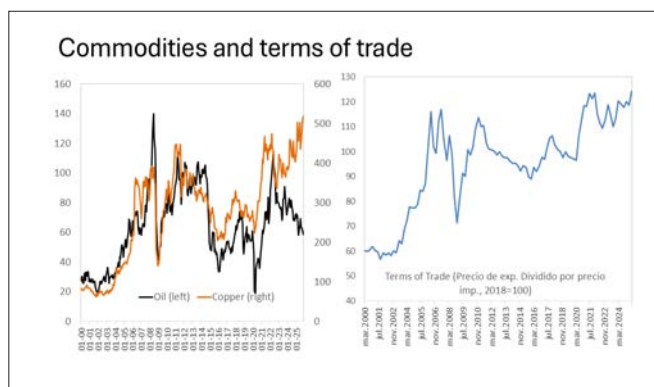


Figura 18

La única preocupación que observo en cuanto al tipo de cambio es la línea roja, que representa a Chile. Estos datos están normalizados a 2019, con enero igual a 100, para facilitar la comparación con el DXY, el índice del dólar de Bloomberg, que mide el valor del dólar estadounidense frente a una canasta de monedas. Cuando la línea negra asciende, indica que el dólar se ha fortalecido. Por ejemplo, durante el año 2022, en el periodo cercano al plebiscito, el dólar estadounidense se apreció a nivel mundial, lo que resultó en una depreciación del peso. La línea roja y la línea negra tienden a moverse de manera conjunta. Observamos que, en periodos de debilidad del dólar estadounidense, el peso se fortalece, lo que se refleja en la caída simultánea de ambas líneas.

Para aquellos interesados en la inversión o que buscan anticipar los movimientos del mercado, resulta relevante notar que, si analizamos los datos desde el año 2019, la brecha entre la línea roja y la línea negra es actualmente de aproximadamente 30 puntos. Esta brecha era significativamente menor en 2019, cuando incluso llegó a cero, lo que sugiere que habría una prima que indica que el peso se encuentra actualmente subvaluado. Es probable que, tras el domingo¹, el peso experimente una apreciación, especialmente considerando las condiciones externas favorables (Figura 19).

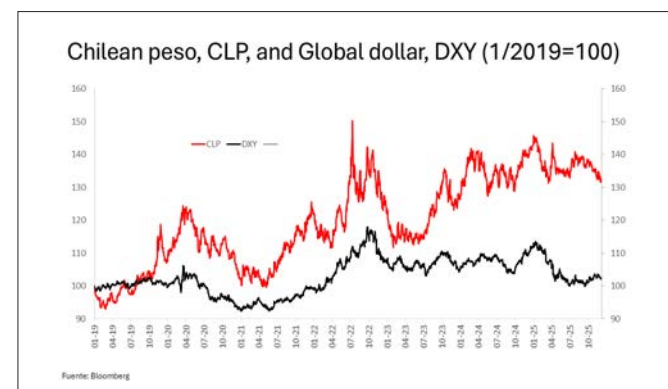


Figura 19

¹ Elecciones presidenciales (nota del editor).

En cuanto al tipo de cambio, la inflación, la política monetaria y la política fiscal, estos factores demuestran el éxito de la política económica implementada en los últimos años. Nadie habría anticipado estos resultados en América Latina, particularmente entre quienes tenemos una mayor trayectoria en la región, hemos experimentado un año particularmente desafiante. No fue sino hasta el año 2000 que la mayoría de los países latinoamericanos logró alcanzar tasas de inflación de un dígito. Chile, por ejemplo, alcanzó este hito en 1994, lo cual es relativamente reciente.

Hemos vivido un período de inflación considerablemente elevada, incluso superior al experimentado por Estados Unidos durante la crisis de la deuda de la década de 1980, la cual provocó un colapso económico significativo. En respuesta, los bancos centrales de América Latina implementaron aumentos en las tasas de interés, adelantándose a las acciones de la Reserva Federal de Estados Unidos. Países como México, Venezuela y Argentina fueron los más prominentes en este movimiento, aunque la mayoría de los bancos centrales de la región siguieron su ejemplo. Como era de esperar, la implementación de políticas monetarias sólidas resultó en una reducción de la inflación. Estos bancos centrales demostraron una notable eficacia, incluso anticipándose a la Reserva Federal. Si bien se podrían señalar algunas áreas de preocupación o debate, como el retraso en el logro de las metas de inflación por parte de algunos países, incluyendo Chile, es importante reconocer los esfuerzos realizados. La inflación en Chile comenzó a aumentar en mayo de 2021, y se proyecta que el país alcanzará su meta de inflación en mayo de 2026. Si bien es posible que aún no hayamos alcanzado este objetivo, es poco probable que experimentemos un retraso adicional.

El Banco Central de Chile aún tiene la capacidad de reducir la tasa de interés, al igual que lo hizo la Reserva Federal, utilizando un discurso similar que enfatiza la incertidumbre sobre el futuro y la necesidad de cautela en los ajustes de política. La decisión del Banco Central respecto a futuras reducciones de la tasa de interés estará influenciada por la evolución de los datos de inflación y actividad económica. Si bien es posible que se considere un margen de maniobra tras una reducción adicional, el hecho de que aún no se haya alcanzado la meta inflacionaria limita la capacidad del Banco Central para implementar medidas más agresivas y continuar con la reducción de la tasa.

En el caso de Estados Unidos, la Reserva Federal redujo la tasa de interés en 25 puntos base, situándola entre 3,50% y 3,75%. El corredor de tasas establecido refleja una serie de reducciones previas. El Presidente de la Reserva Federal, Jerome Powell, indicó que es probable que no se produzcan más reducciones en un futuro próximo. Cabe destacar que hubo tres votos en contra de la reducción de la tasa: uno de un economista menos conocido, pero con experiencia en activismo y política económica, quien abogaba por una reducción más significativa, y dos gobernadores de bancos centrales regionales que se opusieron a la medida. Por lo tanto, es posible que la continuidad de las reducciones de la tasa de interés enfrente desafíos. Considero que los bancos centrales son instituciones robustas, incluso más que los presidentes que los nombran cuando operan con eficacia. Es probable que se nombre a un economista cercano a la administración Trump, Kevin Hassett, como gobernador de la Reserva Federal. Sin embargo, una vez en el cargo, es poco probable que se involucre en disputas políticas significativas, especialmente en minoría, y es probable que no tenga la influencia para desviarse de la gestión prudente de la política monetaria (Figura 20).

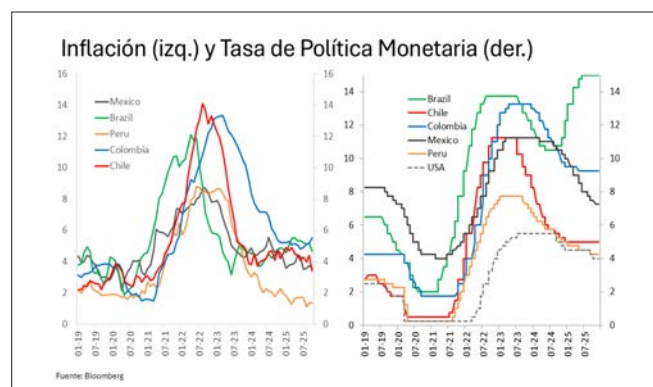


Figura 20

En cuanto a la política fiscal en Chile, es importante destacar que el país se caracteriza por su bajo nivel de endeudamiento a nivel mundial. Si bien las afirmaciones sobre un inminente colapso fiscal en Chile son exageradas, el país sí enfrenta un desafío significativo. Este desafío se deriva principalmente del hecho de que Chile se encuentra entre los países con mayor crecimiento en su deuda pública (Figura 21).

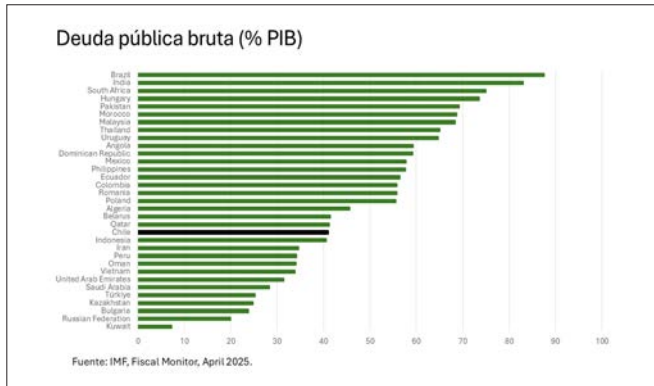


Figura 21

Al comparar la situación económica de Chile en los últimos diez años, representados en el lado izquierdo, con los últimos cinco años, representados en el lado derecho, se observa un crecimiento superior al 10% y al 20% en comparación con el año 2015. Este crecimiento está fuertemente vinculado a la caída del precio del cobre. Sin embargo, se anticipa un aumento en el precio del cobre, lo que brindará alivio a las finanzas públicas. Este repunte en el precio del cobre representa una noticia positiva para la economía chilena, ya que debería estimular la actividad económica, aunque no con la misma intensidad que en el pasado. El mecanismo principal a través del cual el cobre impacta la economía chilena no reside en el aumento de ingresos para el gobierno o las empresas mineras, sino en el incremento de la inversión. Esta inversión, a su vez, impulsa diversos sectores, incluyendo la ingeniería, la industria de servicios y la construcción. Por lo tanto, se espera que este fenómeno genere alivio y una mejora en la economía.

En cuanto a las cifras fiscales, el principal desafío radica en la necesidad de acotar la deuda, la cual continúa en aumento. Si el costo del endeudamiento se eleva, el margen de maniobra para implementar políticas fiscales se reduce y se incrementan las tasas de interés para el mercado (Figura 22).

Las predicciones más conservadoras indican un crecimiento económico de aproximadamente 2,5% hacia el futuro, con estimaciones que oscilan entre 2,2% y 2,5% para 2026, y entre 2% y 2,5% para 2027 (Figura 23).

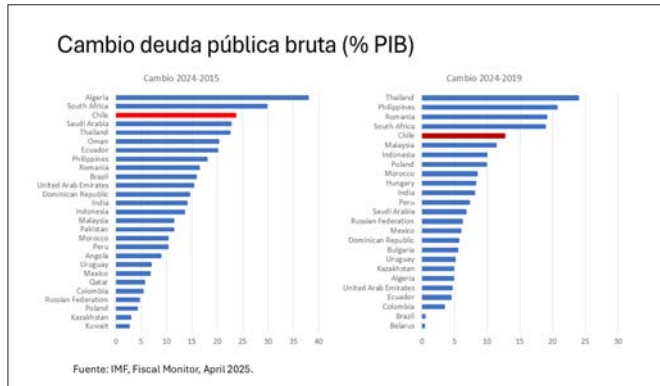


Figura 22

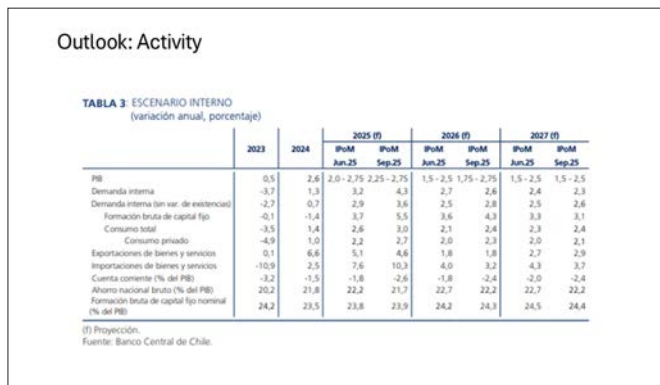


Figura 23

En relación con la inflación, se prevé que la convergencia se alcance el próximo año. Se espera que la inflación cierre este año en torno al 4%, y con el último dato disponible, podría estar más cerca del 3,8% o 3,7%. Sin embargo, estos pronósticos están sujetos a cambios y son consideraciones importantes (Figura 24).

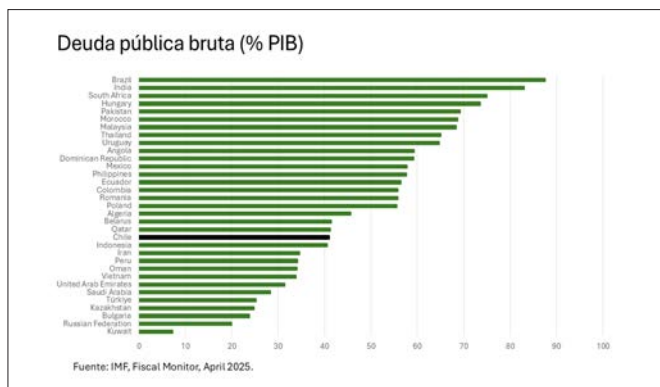


Figura 24

Con esto concluyo mi presentación.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Agradezco su intervención.

A continuación, el Sr. José de Gregorio, responde preguntas y comentarios de los asistentes.

Sr. Jorge Pedrals.

—¿Cómo analizan los programas económicos propuestos por los dos candidatos presidenciales en términos de su capacidad para reactivar el crecimiento económico y optimizar la productividad?

Sr. José de Gregorio.

—En primer lugar, es relevante destacar que los programas económicos presentan similitudes. Ninguno propone un nuevo impuesto; en cambio, todos racionalizan ligeramente sus propuestas. No he encontrado propuestas innovadoras en cuanto a crecimiento económico, y considero improbable que existan.

Sin embargo, es posible que un gobierno de Kast genere mayor entusiasmo y confianza, lo que podría contribuir a un incremento de algunas décimas en el crecimiento económico durante la fase inicial de su administración, un fenómeno común que se traduce en la apreciación de activos. No obstante, más allá de estos efectos puntuales, identifico dos áreas clave. En primer lugar, no percibo iniciativas significativas en materia de crecimiento, más allá de declaraciones genéricas.

Si bien es positivo que todos los partidos expresen su compromiso con el crecimiento, no resulta evidente la implementación de medidas concretas. Una posible rebaja de impuestos podría tener un impacto positivo a corto plazo, pero, dado el estado actual de las finanzas públicas, cualquier medida de este tipo sería insostenible sin un ajuste de los gastos.

Desde mi perspectiva, existen áreas de mayor importancia, donde podrían surgir diferencias entre los partidos. En particular, la gestión del sector público representa un desafío significativo. En algunos sectores, grupos de interés con objetivos divergentes a los de la autoridad gubernamental ejercen una influencia considerable.

En términos generales, se observa una falta de alineación entre las políticas públicas y la gestión efectiva de los servicios. Por lo tanto, considero fundamental implementar una estrategia sólida para mejorar la gestión pública y la rendición de cuentas de los funcionarios. Se ha observado en diversas instancias que existen oficinas y entornos en los que resulta sumamente complejo modificar decisiones, particularmente aquellas que implican decisiones negativas con respecto a lo que se ha implementado y a las actividades realizadas.

Sr. Juan Carlos Barros.

—¿El crecimiento del gasto público lo ves cómo preocupante?

Sr. José de Gregorio.

—Como mencioné anteriormente, la preocupación implica estar al borde de un problema; yo lo percibo más como un desafío. Es una medida necesaria si aspiramos a una economía más robusta y a una política fiscal más eficaz. Estoy a favor del aumento del gasto. Al abordar el tema del aumento del gasto público, nos encontramos con un desafío considerablemente más complejo que el simple concepto de gasto.

Este desafío se manifiesta principalmente en el ámbito del empleo público, particularmente en las municipalidades, donde, a mi parecer, la centralización resulta más conveniente. Sin embargo, es en estos mismos entes donde se ha observado un crecimiento desproporcionado del gasto y de la contratación de personal.

Por lo tanto, surge la interrogante sobre cómo implementar mecanismos de control más eficaces. En este sentido, propongo el fortalecimiento de las contralorías internas dentro de las municipalidades, dotándolas de mayor severidad en sus funciones de control. Asimismo, se debe buscar una mayor independencia de estas contralorías respecto a la

autoridad municipal. Existen diversas estrategias de gestión que podrían contribuir a la solución de este problema.

Otro aspecto relevante es la dificultad que se presenta en el ámbito estatal para la clausura de programas ineficaces. Si bien se puede determinar que un programa no ha cumplido con sus objetivos, la inamovilidad de los funcionarios públicos dificulta su desmantelamiento. Esta situación se replica en instituciones como las universidades que, al ser públicas, se rigen por las normativas aplicables al empleo público, lo cual resulta incongruente con su naturaleza académica.

Por ejemplo, en el caso de la contratación de personal para programas de postítulo, existe la posibilidad de que un vendedor del programa presente una demanda legal si se decide rescindir su contrato, incluso si el programa ha sido discontinuado.

Por lo tanto, la reducción del gasto público no es una tarea sencilla, ya que una parte significativa de este gasto se encuentra vinculada a salarios de personas con inamovilidad. Si bien abogo por un sector público eficiente que garantice la estabilidad laboral, considero que esta estabilidad no debe extenderse a todos los puestos, ya que no es sostenible que un 20% de la población chilena se encuentre en esta situación. La inamovilidad en el trabajo dentro del Estado requiere una restricción considerable, ya que limita significativamente la flexibilidad del mismo.

Sr. Dante Bacigalupo.

—Reitera la cuestión de la tasa de crecimiento y la deuda, temas a los que usted se ha referido.

Sr. José de Gregorio.

—Chile mantiene una deuda relativamente baja, representando el 40% del PIB. Existen países que están experimentando un crecimiento positivo, como Brasil, que planea iniciar inversiones con una deuda equivalente al 100% de su PIB. El desafío actual reside en la rápida expansión de esta deuda. Considero que un manejo fiscal prudente, junto con un precio del cobre más alto, contribuirá a estabilizar la situación.

Sin embargo, persisten desafíos en materia de gobernanza. Si bien Chile cuenta con una sólida política fiscal, existe un margen de mejora en la gobernanza, particularmente en la definición de la regla fiscal y las atribuciones del Consejo Asesor Fiscal en relación con las proyecciones. Históricamente, las proyecciones presupuestarias, no solo en este gobierno, sino también tradicionalmente, han presentado errores considerables. En el contexto actual de mayor endeudamiento, esta situación es, sin duda, más preocupante.

Sr. Cristian Nicolai.

—Interrogantes sobre el impacto del crecimiento económico y el envejecimiento poblacional en el mercado laboral y la tecnología.

Sr. José de Gregorio.

—Esta es una cuestión de gran relevancia. Existen dos factores a considerar: el envejecimiento poblacional y la menor natalidad, que se traduce en una población con una edad promedio más alta. Sin embargo, existe un problema de transición: una economía con una estructura etaria estática, pero con un menor crecimiento poblacional, según la teoría económica, tiende a ser más productiva y capaz de crecer. Un menor crecimiento poblacional, en combinación con la estructura etaria existente, genera la necesidad de un mayor capital para mantener la función capital per cápita, dado el rendimiento decreciente, lo que permite que la población siga produciendo.

No obstante, existen dos problemas significativos. En primer lugar, el envejecimiento poblacional genera demandas, presiones y complicaciones. Esta transición puede extenderse por un período de 30 a 50 años. Las transiciones demográficas de esta naturaleza son prolongadas y ejercen una considerable presión sobre el sistema de pensiones. Si bien no se trata de un sistema de pensiones de capitalización, si la población se jubila a los 65 años, ahorra y vive hasta los 120, se presenta un problema en el sistema de pensiones debido a la baja tasa de natalidad. Además, esto genera una compleja problemática en torno a las transferencias directas, como la Pensión para el Bienestar de las Personas Adultas Mayores (PGU).

En segundo lugar, existe un tema complejo relacionado con el gasto en salud. Una población mayor tiende a gastar más en salud. Por lo tanto, existen complicaciones significativas durante la transición que tienen implicaciones importantes. En cuanto a la propuesta de fomentar una mayor natalidad para financiar las pensiones, me surge la pregunta: ¿quién proveerá de vivienda a esta población adicional?

En la actualidad, el precio de la vivienda está fuertemente influenciado por factores como el espacio disponible y la demanda. Si bien me encuentro en una etapa inicial de reflexión sobre este tema, no estoy seguro de cómo podría abordarse desde una perspectiva más investigativa. Parte de la disminución de la natalidad puede atribuirse a la respuesta de las personas a los desafíos globales que enfrentamos. Estos desafíos incluyen la crianza de los hijos y la participación de la mujer en la fuerza laboral, lo que incrementa el costo de tener hijos. Además, los niños probablemente enfrentarán mayores dificultades para adquirir una vivienda en el futuro, lo que podría resultar en que permanezcan viviendo con sus padres debido a los elevados costos de la vivienda y su impacto en la salud.

Por lo tanto, los costos de la salud también juegan un papel importante. Considero que no debemos descartar la posibilidad de que estemos experimentando un proceso a largo plazo en el que la población mundial podría disminuir o estabilizarse, lo que podría aliviar algunas de las tensiones, incluso desde una perspectiva climática. Como alguien me mencionó recientemente sobre los límites planetarios, esto podría ser un factor relevante.

Otro factor adverso asociado con el envejecimiento de la población reside en que el crecimiento económico, así como la creación de valor, se derivan en gran medida de la interacción entre individuos en edad laboral, en lugar de la interacción entre jubilados. Esto plantea un desafío para la capacidad de crecimiento económico; sin embargo, no se trata de una cuestión resuelta ni de una crisis inminente.

Considero que representa un ajuste natural de la humanidad, que ha experimentado un crecimiento significativo y prosperidad, pero que, en consecuencia, enfrenta ciertas consecuencias, entre las que se incluyen tasas de crecimiento poblacional más bajas.

Sr. Humberto Peña.

—*¿Cuál es la importancia que atribuye a los nuevos sectores productivos para el futuro, tales como el hidrógeno verde, las energías renovables y el litio?*

Sr. José de Gregorio.

—Considero que estos sectores son de gran relevancia y presentan un amplio potencial de desarrollo. En cuanto al litio, persiste la incertidumbre sobre su reemplazo y su aplicación. No tengo una postura definida al respecto. En lo que concierne al hidrógeno verde, existen interrogantes sobre su transporte, su producción y su utilidad. En definitiva, considero que estos sectores son importantes y que el Estado debe facilitar la materialización de las inversiones. Sin embargo, es el sector privado quien asume el riesgo financiero.

Si bien no tengo el entusiasmo suficiente para realizar inversiones personales en estos sectores, reconozco que muchas de las actividades que he mencionado responden a las demandas de la humanidad frente al crecimiento poblacional y al cambio climático. Considero que existen numerosos pasos a seguir en este ámbito. Chile se destaca como uno de los países con mayor producción de energías renovables, como lo demuestra la presencia de parques eólicos en el norte del país, que en otras regiones representan un desafío. Cabe mencionar, además, la complejidad del proceso de permisología para la instalación de plantas eléctricas, que puede incluir requisitos como estudios sociales con enfoque de género en áreas deshabitadas.

Estos aspectos, que pueden parecer triviales, son relevantes y merecen ser comentados, incluso entre ingenieros. Existe la percepción de que se ha generado una especie de “captura” en el sector de consultorías de estudios de género, donde se incentiva la contratación de estos estudios, lo que puede generar conflictos de interés y dificultar la comprensión de ciertos procesos.

En conclusión, considero que los nuevos sectores productivos deben ser impulsados principalmente por el sector privado. Si bien existen desafíos, estos sectores representan una oportunidad para el desarrollo sostenible.

Nos encontramos ante un gobierno que concluye un periodo de cuatro años con la intención de transformar la matriz productiva. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta el momento han sido limitados, y las acciones implementadas no han sido significativas. La única propuesta concreta que he escuchado es la creación de un banco de fomento y desarrollo, pero no percibo una profundidad sustancial en las políticas económicas que se derivarían de esta iniciativa. A pesar de ello, es probable que se introduzcan nuevas medidas.

El mundo está experimentando cambios profundos, y la inteligencia artificial es un factor crucial en esta transformación. Si bien existe un debate considerable en el ámbito económico sobre el alcance de estos impactos, algunos sostienen que son limitados, mientras que otros, como yo, consideramos que son más significativos.

Como usuario, he experimentado una transformación considerable en mi vida y en mi forma de trabajar. La ingeniería, en particular, juega un papel fundamental en este proceso de cambio.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Agradezco la valiosa participación de José y la asistencia de todos los presentes.

Muchas gracias a todos, y les deseo una excelente jornada.

Fin de la conferencia.

ENERGÍA NUCLEAR EN CHILE

Áreas, Aplicaciones y Desafíos en investigación, formación de capital humano avanzado y provisión de productos y servicios

Sr. Felipe Guevara, Jefe de División de Investigación y Aplicaciones Nucleares, Comisión Chilena de Energía Nuclear.

El 21 de abril de 2026, se dio inicio al ciclo de conferencias del Instituto de Ingenieros de Chile. En esta ocasión, nuestro primer invitado fue el Sr. Felipe Guevara, Jefe de División e Investigación y Aplicaciones Nucleares, quien expuso sobre el tema “Energía Nuclear en Chile. Áreas, Aplicaciones y Desafíos en investigación, formación de capital humano avanzado y provisión de productos y servicios”.

Felipe Guevara es Doctor y Licenciado en Biotecnología; Máster en Gestión de la Ciencia y la Innovación (Universitat Politècnica de València - UPV). Ingeniero en Biotecnología Molecular. Doctor por la Universidad de Sevilla, e Ingeniero en Biotecnología Molecular por la Universidad de Chile. especializado en gestión de ciencia, innovación y transferencia tecnológica. Su perfil destaca por la gestión estratégica de I+D+i (Investigación, Desarrollo e Innovación) en instituciones de educación superior. Investigador en la Universidad de Santiago de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Actualmente, Jefe de la División de Investigación y Aplicaciones Nucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), seleccionado a través de Alta Dirección Pública (ADP). Representante de la CCHEN en alianzas de investigación aplicada y desarrollo tecnológico.

A continuación, su conferencia.



Sr. Felipe Guevara.

Sr. José Orlandini.

—Estimados asistentes, buenos días. Les damos una cordial bienvenida a esta conferencia titulada “Energía Nuclear en Chile: Áreas, Aplicaciones y Desafíos en Investigación, Formación de Capital Humano Avanzado y Provisión de Productos y Servicios”.

La conferencia será impartida por el señor Felipe Guevara, de la Comisión Chilena de Energía Nuclear. El señor Guevara ocupa el cargo de Jefe de la División de Investigación y Aplicaciones Nucleares de dicha Comisión, habiendo sido designado a través de un riguroso proceso de alta dirección pública. Posee una sólida formación académica, siendo ingeniero en biotecnología molecular por la Universidad de Chile, doctor por la Universidad de Sevilla y máster en función de la ciencia y la innovación por la Universidad Politécnica de Valencia. Su experiencia profesional se centra en la gestión de ciencia e innovación, la transferencia tecnológica, la formulación y evaluación de proyectos, así como en el diseño e implementación de políticas de innovación en instituciones de educación superior.

El perfil profesional del señor Guevara se caracteriza por su capacidad de gestión estratégica en investigación, desarrollo e innovación.

Le agradezco su participación en esta conferencia y le cedo la palabra. Bienvenido, señor Guevara.

Sr. Felipe Guevara.

—Expreso mi más sincero agradecimiento por la invitación y por el interés demostrado en los temas que la Comisión Chilena de Energía Nuclear se propone promover, explicar y exponer.

Considerando que el título de la exposición es “Energía Nuclear en Chile”, mi intención no se circunscribe únicamente a las actividades de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, sino que también abarca las capacidades del país en el ámbito de la energía nuclear (Figura 1).

Antes de proceder con la exposición, considero fundamental proporcionar un contexto histórico sobre el desarrollo global de la energía nuclear, cuya génesis se remonta al año 1905. En dicho año, un científico de renombre, reconocido



Figura 1

por su excepcional capacidad intelectual, estableció una relación fundamental entre energía, masa y velocidad, tras una exhaustiva investigación y profunda reflexión. Cabe destacar que este concepto surgió inicialmente como una idea científica neutral, desprovista de connotaciones ideológicas o políticas.

La cuestión primordial reside en determinar las aplicaciones prácticas de un concepto científico neutral. Desde el año 1953, la comunidad internacional optó por un enfoque pacífico para el uso de la energía nuclear, impulsado por el célebre discurso pronunciado por el Presidente Dwight D. Eisenhower, titulado “Átomos para la Paz”. Este discurso marcó el inicio de la creación del Organismo Internacional de Energía Atómica, del cual Chile es miembro activo. Chile, alineado con la visión de un uso pacífico de la energía nuclear, estableció una institucionalidad dedicada a la ciencia nuclear, bajo el lema de que “El conocimiento, utilizado con sabiduría, constituye la mayor fuerza para la paz” (Figura 2).



Figura 2

La interrogante fundamental que planteo en esta presentación no se centra en la conveniencia de la incorporación de Chile al ámbito nuclear, dado que la respuesta es afirmativa. Chile ya forma parte de la comunidad nuclear internacional y participa activamente en diversas áreas, las cuales espero que puedan conocer en detalle durante esta presentación, en caso de no estar familiarizados con ellas.

Si bien Chile actualmente no cuenta con energía nuclear de potencia, lo que implica la ausencia de reactores nucleares destinados a la generación de electricidad, el país posee una matriz tecnológica activa, de suma importancia para diversas áreas, incluyendo la salud, la industria y, particularmente, la investigación científica. Esta red no solo está compuesta por la Comisión Chilena de Energía Nuclear, sino también por diversos actores a lo largo del territorio nacional.

El mensaje principal de esta presentación es que Chile ya forma parte del ámbito nuclear, con una red operativa y una matriz tecnológica activa que utiliza el conocimiento nuclear para aplicaciones pacíficas en múltiples sectores, contribuyendo así al desarrollo del país (Figura 3).

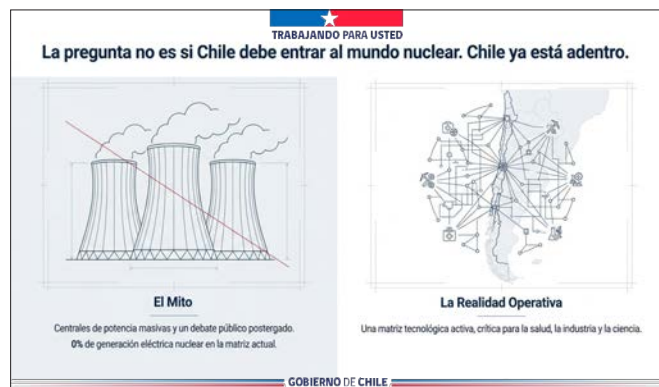


Figura 3

El origen de esta situación se remonta a la visión del senador Eduardo Cruz-Coke Lassabe, quien, en 1955, apenas dos años después del discurso de Eisenhower, presentó el primer proyecto de ley nuclear en Chile. Este proyecto de ley sentó las bases para la creación de la Comisión Nacional de Energía Nuclear, la cual posteriormente se transformaría en la Comisión Chilena de Energía Nuclear. La misión fundamental de esta comisión consiste en atender los problemas relacionados con la producción, adquisición y uso pacífico de la energía atómica en Chile.

Esta decisión representa una medida de estado temprana, dado que la incorporación al ámbito nuclear con fines pacíficos se concretó apenas dos años después del discurso de Eisenhower. Esta decisión ha sido transversal y se mantiene vigente hasta la fecha como una política de Estado (Figura 4).



Figura 4

La fundación de esta institución se sustenta en un marco institucional nacional, cuya organización y coordinación corresponden a la Comisión Chilena de Energía Nuclear (Figura 5).

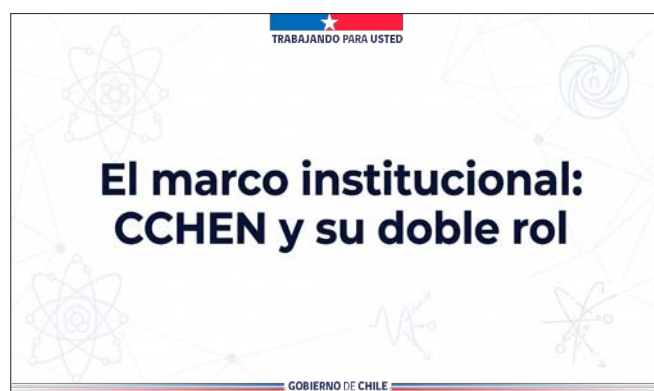


Figura 5

Esta comisión ejerce una doble función: por un lado, actúa como ente regulador, encargado de la formulación de la normativa, la expedición de autorizaciones y la supervisión de la regulación en materia nuclear; por otro lado, asume un rol en investigación, promoviendo la generación de conocimiento científico.

Nuestra institución se encuentra adscrita al Ministerio de Energía. Su principal función consiste en articular un sistema científico a nivel nacional, así como en establecer relaciones internacionales para la aplicación de diversas tecnologías nucleares (Figura 6).

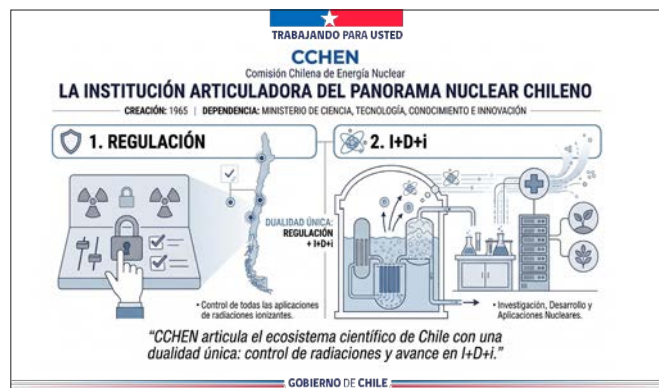


Figura 6

En el ámbito regulatorio, se establecen normas para todas las instalaciones y se lleva a cabo la fiscalización de personas. Esta fiscalización comprende no solo el uso de radiaciones, material y fuentes radioactivos, sino también el mantenimiento de salvaguardias. Adicionalmente, como se abordará más adelante en esta presentación, la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) desempeña un rol regulatorio en la extracción y venta de litio, un mineral estratégico para el país, no solo desde una perspectiva energética, sino también como mineral de interés nuclear (Figura 7).



Figura 7

En relación con el rol de investigación, desarrollo e innovación, la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) dispone de instalaciones singulares que operan bajo estándares internacionales rigurosos. Estas instalaciones comprenden un reactor nuclear, una planta de irradiación multipropósito y un laboratorio de análisis por activación neutrónica. A continuación, se profundizará en la comprensión de estos conceptos. La CCHEN posee un portafolio de capacidades de generación de conocimiento que buscan impactar en diversos ámbitos del país, con un impacto directo que se encuentra más cercano de lo que se podría concebir, aunque a menudo no es ampliamente reconocido.

Una dimensión fundamental de la ciencia nuclear reside en su capacidad para integrar el desarrollo nacional con el bienestar de las personas, aspecto que se ilustrará a lo largo de esta presentación (Figura 8).

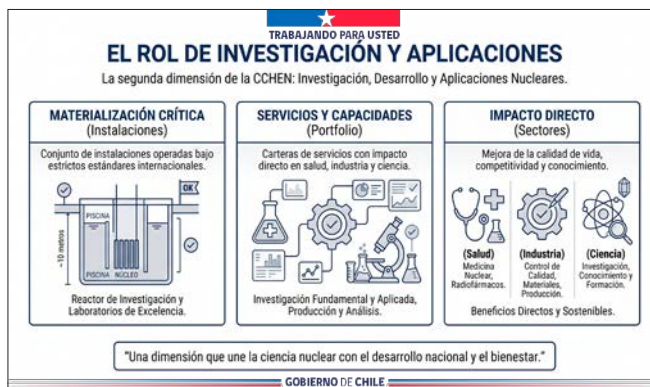


Figura 8

Chile cuenta con tres nodos fundamentales para el desarrollo de instalaciones nucleares y radioactivas, los cuales se integran a un ecosistema nacional (Figura 9).

El primer nodo de nuestra infraestructura es el Centro de Estudios Nucleares de La Reina, donde se ubica el reactor nuclear experimental chileno número 1 (RECH-1), operativo desde 1974 y sometido a diversas actualizaciones y renovaciones. Adicionalmente, el Centro de Estudios Nucleares de La Reina alberga un ciclotrón, operado en colaboración con el Banco Nacional de Tejidos para la esterilización de tejidos, así como otras instalaciones de investigación de vanguardia.



Figura 9

El segundo nodo de nuestra infraestructura es el Centro de Estudios Nucleares de Lo Aguirre, el cual alberga el segundo reactor experimental chileno (RECH-2), que entró en operación en 1977. Actualmente, este reactor se encuentra fuera de servicio. Adicionalmente, el centro cuenta con otras instalaciones de singular importancia, como la planta de irradiación multipropósito, única en Chile, la planta de fabricación de elementos combustibles, también única en Chile, y una planta de gestión de desechos radioactivos, diseñada para cumplir con los más altos estándares de seguridad y protección ambiental.

Nuestro tercer nodo es la sede Amunátegui, que funge como edificio administrativo y representa una colaboración estratégica con el ecosistema nacional. Este ecosistema comprende toda la infraestructura nuclear y radioactiva del país, incluyendo instalaciones hospitalarias e industriales que son fiscalizadas y reguladas, y que utilizan tecnologías radioactivas y nucleares de manera segura y eficiente (Figura 10).

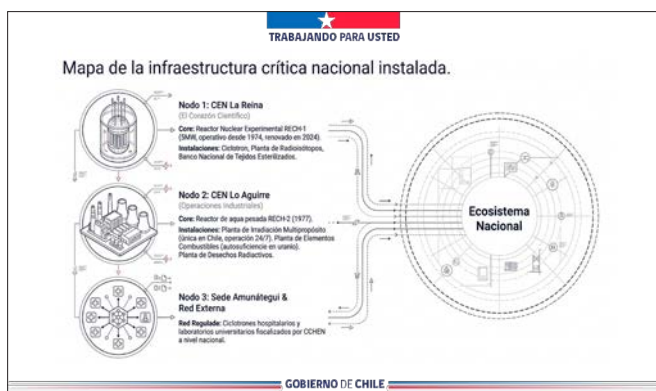


Figura 10

El corazón de la energía nuclear en Chile se ubica a tan solo 50 metros de mi posición actual: el Reactor Experimental Chileno-1. Este reactor ha operado durante más de 51 años y constituye una infraestructura crítica para el desarrollo científico del país. Sus aplicaciones son diversas, y su principal contribución a la población actualmente reside en su participación en la cadena de producción de radioisótopos. El reactor trabaja con estándares de seguridad y excelencia operacional que cumplen con los más altos niveles internacionales.

En el año anterior, se obtuvo una licencia de operación con una vigencia de seis años, la licencia de mayor duración en la historia operativa del reactor. Este reactor representa un diseño de ingeniería excepcional, cuya complejidad resulta difícil de transmitir en este breve espacio. Les invitamos a visitar nuestras instalaciones durante los días de puertas abiertas para que puedan apreciar sus características (Figura 11).



Figura 11

Un reactor experimental, como el que se encuentra en nuestras instalaciones, constituye una instalación dedicada a la investigación científica, médica e industrial, sin estar diseñado para la generación de energía eléctrica o nucleoelectrónica.

El núcleo del reactor se enfría mediante disipación térmica en una piscina de agua. Este actúa como una “fábrica de neutrones”, equipada con diversos escudos. La piscina de agua modera los neutrones y proporciona una capa de protección radiológica para los operadores. El reactor opera a una potencia de 5 megawatts y ofrece aplicaciones en investigación, medicina e industria, permitiendo la

realización de diversos ensayos. A lo largo de esta presentación, exploraremos estas aplicaciones con mayor detalle.

Es importante destacar que este reactor no fue diseñado inicialmente para la generación de electricidad, sino para fines de investigación y otros usos que se describirán a continuación (Figura 12).

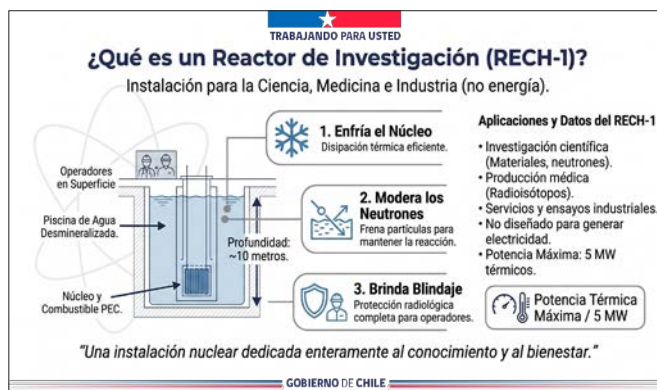


Figura 12

La distinción fundamental entre un reactor de potencia y un reactor de investigación reside en sus objetivos y productos principales. Un reactor de investigación se orienta a la generación de partículas subatómicas, especialmente neutrones, que propician modificaciones en diversos materiales. En este ámbito, el calor generado se considera un subproducto indeseable y, por consiguiente, su disipación resulta imperativa para garantizar la operación segura y eficiente del reactor. En contraste, un reactor de potencia tiene como objetivo primordial la producción de calor. Este calor se emplea para calentar el agua que circunda el núcleo, transformándola en vapor que impulsa turbinas para la generación de electricidad, la cual se distribuye a la red eléctrica. En síntesis, mientras que un reactor de potencia opera a potencias térmicas cercanas a los 3.000 megawatts y el calor constituye un producto deseable, un reactor de investigación se centra en la producción de neutrones, con el calor como un subproducto que se gestiona activamente (Figura 13).

Más allá de la producción de radiofármacos, los reactores de investigación ofrecen una amplia gama de aplicaciones, entre las cuales destaca la neutrografía. Esta técnica avanzada emplea neutrones dirigidos y controlados para realizar inspecciones no destructivas, análogas a las radiografías

convencionales, pero con la significativa ventaja de que los neutrones penetran los materiales de manera distinta a los rayos X. Esta característica permite la detección de características internas que, de otro modo, permanecerían invisibles.

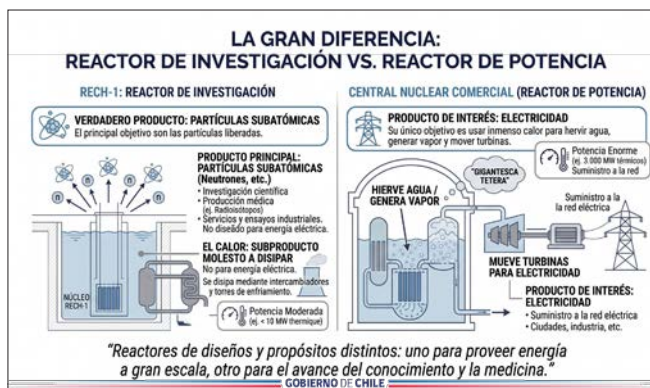


Figura 13

La neutrografía facilita la interacción a nivel nuclear de las partículas, a diferencia de los rayos X. Esta capacidad permite la visualización de materiales ligeros dentro de otros más pesados o metales pesados, incluyendo la detección de moléculas de hidrógeno. En consecuencia, se puede observar plástico, agua o incluso explosivos u otros materiales hidrogenados, lo que permite la inspección de materiales sin necesidad de desembalaje. A nivel internacional, esta tecnología se ha empleado para inspeccionar álabes de turbina de aviones, detectando zonas de humedad o corrosiones ocultas, verificando la presencia de cargas explosivas o inspeccionando su interior, y evaluando la integridad estructural de las mismas sin necesidad de desarmarlas. Asimismo, se utiliza para el control de calidad de componentes aeroespaciales, garantizando su óptimo funcionamiento y seguridad (Figura 14).

Los análisis por activación neutrónica constituyen una técnica analítica sofisticada que implica el bombardeo de una muestra con haces de neutrones, lo que provoca su transformación temporal en un estado radioactivo. Esta muestra emite radiación, la cual permite la determinación precisa de la composición química en concentraciones extremadamente bajas, hasta en partes por billón. Esta técnica encuentra aplicación en diversos campos, incluyendo la minería, el medioambiente, las ciencias forenses y la arqueología. Por ejemplo, el análisis de cabellos mediante

activación neutrónica ha permitido la detección de trazas de metales en cuerpos momificados, facilitando la evaluación de la exposición a materiales de metal pesado como el arsénico.



Figura 14

Esta tecnología ofrece la capacidad de revelar la composición elemental de una muestra en concentraciones excepcionalmente bajas, requiriendo para su implementación un reactor nuclear. Su singularidad y efectividad la convierten en una herramienta invaluable, y se encuentra implementada en la Comisión Chilena de Energía Nuclear (Figura 15).



Figura 15

Un reactor de investigación, como el que opera en nuestra institución, ofrece una amplia gama de aplicaciones en diversos campos. Entre ellas, destaca la prueba de materiales, la cual permite la exposición de diversos materiales a flujos de neutrones con el fin de estudiar su envejecimiento y evaluar

su resistencia al daño por radiación. Adicionalmente, se pueden generar trazadores industriales, los cuales facilitan el estudio de flujos de fluidos en industrias que utilizan oleoductos, optimizan mezclas en refinerías y permiten el análisis de sedimentos. Asimismo, existen aplicaciones novedosas y versátiles, como la coloración de gemas preciosas, por ejemplo, los topacios.

Un topacio, en su estado natural, es translúcido e incoloro. Sin embargo, mediante la exposición a neutrones a distintas intensidades y tiempos de irradiación, se puede inducir un cambio en su composición química, resultando en una coloración azulada característica de los topacios. Este proceso innovador también podría aplicarse a otros tipos de gemas, permitiéndoles adquirir una coloración que las hace atractivas y valiosas para el mercado (Figura 16).



Figura 16

Finalmente, se ha logrado la realización de estudios de difracción de neutrones y la ejecución de experimentación en ciencia básica. Un reactor de investigación, como el nuestro, no solo proporciona servicios, sino que también constituye una instrumentación que facilita la ciencia básica avanzada. Este tipo de investigación permite el estudio de la estructura de materiales, los principios del magnetismo y el comportamiento de la materia a nivel nuclear. Estas investigaciones tienen aplicaciones en el desarrollo de aleaciones avanzadas de materiales, nanomateriales, polímeros complejos, entre otros.

En consecuencia, esta “fábrica de neutrones” posee aplicaciones significativamente amplias, que trascienden las aplicaciones energéticas, como la generación de electricidad, que son comúnmente percibidas por la población (Figura 17).



Figura 17

La instrumentación singular de un reactor nuclear presenta una oportunidad única para la educación y capacitación, convirtiéndolo en un “aula viva” para el desarrollo de capital humano nuclear con experiencia práctica. En la actualidad, la contratación directa de un operador capacitado para operar un reactor nuclear, si bien factible, resulta sumamente compleja en nuestro país debido a la escasez de programas de formación y centros de entrenamiento especializados. En consecuencia, la capacitación para operar un reactor debe llevarse a cabo invariablemente en el propio reactor.

El reactor experimental chileno número uno se posiciona como un centro de capacitación integral para operadores, físicos, ingenieros nucleares, licenciados y físicos médicos, entre otros profesionales. Este centro ofrece un entorno propicio para el aprendizaje en tiempo real, la experimentación aplicada y la comprensión profunda de la cultura de seguridad. La operación de un reactor nuclear exige un conocimiento exhaustivo de los procedimientos de seguridad, una disciplina rigurosa en la operación y el desarrollo o la movilización de competencias necesarias para gestionar la complejidad de una máquina como un reactor nuclear.

La experiencia adquirida por los operadores en el reactor se traduce en competencias operativas reales y aplicables. Si bien la teoría nuclear y la capacitación son fundamentales, la transformación de esta teoría en competencias operativas prácticas solo es posible en el reactor experimental chileno número uno (Figura 18).

El funcionamiento de este reactor nuclear está intrínsecamente ligado a la disponibilidad de combustible, lo que subraya la importancia crítica de la soberanía energética

y tecnológica para Chile. Chile se distingue como uno de los escasos países con la capacidad de fabricar su propio combustible para reactores nucleares, gracias a la planta de elementos combustibles ubicada en el Centro de Estudios Nucleares de Lo Aguirre. Esta capacidad, en conjunto con el reactor, confiere a Chile una soberanía tecnológica que minimiza la dependencia de otros países para determinados aspectos.

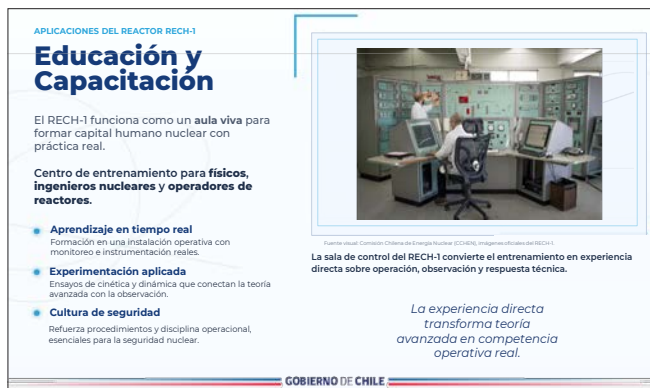


Figura 18

Durante la pandemia del COVID-19, la presencia de un reactor nuclear permitió al país mantener un suministro continuo de radiofármacos. Esta capacidad resultó crucial para mitigar el impacto de las restricciones de transporte y los cierres fronterizos en la disponibilidad de estos productos esenciales para la salud pública.

No obstante, surge la interrogante sobre las posibles consecuencias de una dependencia externa para el suministro de combustible del reactor. En tal escenario, la planta de fabricación de elementos combustibles no solo garantiza la seguridad energética, sino que también representa un pilar fundamental de la soberanía tecnológica chilena, permitiendo al país mantener una posición autónoma y resiliente en el ámbito nuclear (Figura 19).

La sofisticación de la tecnología implementada y la vasta experiencia del personal operativo en esta planta han propiciado la adquisición y el desarrollo de tecnologías con aplicaciones potenciales adicionales.

Con relación al proceso de fabricación del combustible nuclear destinado a nuestro reactor, la materia prima empleada es el uranio. Este material se incorpora en capas

de aluminio, conformando una estructura análoga a un sándwich. Estas láminas de uranio son sometidas a un proceso de laminación mediante rodillos, lo que resulta en una reducción progresiva de su espesor. Posteriormente, las placas resultantes se ensamblan con una precisión excepcional en una configuración específica, una sobre otra, de acuerdo con un diseño predeterminado (Figura 20).



Figura 19

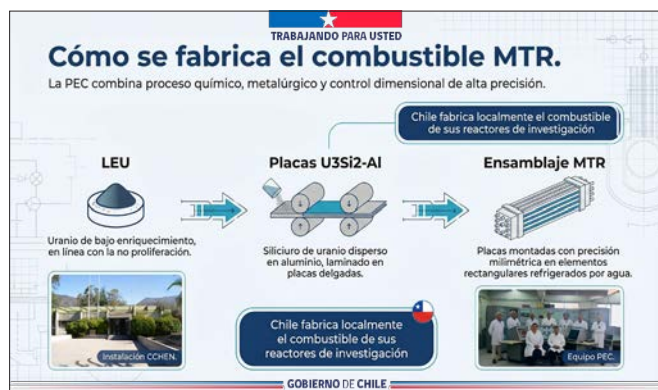


Figura 20

Este proceso culmina en la generación y el ensamblaje de combustibles del tipo MTR, los cuales permiten al país capitalizar el conocimiento adquirido y aplicarlo en diversas áreas.

La metalurgia avanzada, empleada por nuestros operadores en la planta de elementos combustibles y en la Comisión Chilena de Energía Nuclear, ofrece tecnologías que pueden ser aplicadas en la investigación de nuevas aleaciones, tales como las basadas en cobre, selenio u otros minerales. El riguroso control de calidad al que se someten los combustibles

fabricados en la planta de la Comisión permite utilizar estas altas exigencias para evaluar otros tipos de construcciones y materiales, garantizando así su integridad y rendimiento.

Asimismo, la experiencia adquirida en la conversión química durante el tratamiento del uranio proporciona conocimientos aplicables a procesos mineros, incluyendo el litio y otros metales estratégicos, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la industria minera nacional. Los tratamientos térmicos utilizados para formar las placas delgadas que componen los combustibles nucleares también permiten el desarrollo de otros elementos y la aplicación de tecnologías y maquinaria en diversas áreas, fomentando la innovación y la competitividad (Figura 21).



Figura 21

La precisión y el detalle requeridos para el combustible nuclear se traducen en capacidades para la industria avanzada, incluyendo aplicaciones en el ámbito del patrimonio. Las tecnologías de inspección de los elementos combustibles, que permiten su observación sin destrucción, pueden ser empleadas para detectar murales antiguos ocultos bajo múltiples capas de pintura, como lo demostró la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

Estas tecnologías también permiten evaluar la estructura o el estado de edificaciones patrimoniales y responder a emergencias, como los recientes incendios en el sur de Chile. En tales situaciones, se puede evaluar la infraestructura y la estructura de las edificaciones para determinar su viabilidad de reconstrucción o demolición. En conclusión, el conocimiento nuclear contribuye a la protección del patrimonio, la infraestructura y la seguridad pública mediante estos análisis (Figura 22).



Figura 22

En el mismo complejo donde se ubica la planta de elementos combustibles, se encuentra otra infraestructura singular en el país: la planta de irradiación multipropósito. Esta planta emplea Cobalto 60 como fuente radiactiva, lo que permite la reducción de la carga microbiana mediante radiación gamma, equivalente a la esterilización. La principal ventaja de este tratamiento reside en su naturaleza no térmica y libre de productos químicos, lo que elimina la generación de residuos postratamiento, a diferencia de los tratamientos químicos, y evita la radioactividad residual en el producto. Esta tecnología se implementa a nivel mundial en diversas industrias.

La irradiación puede aplicarse a frutas, alimentos y materiales médicos destinados a diversas aplicaciones, incluyendo el pabellón. Además de la reducción de la carga microbiana, existen otras áreas potenciales de expansión, como el tratamiento de semillas para mejorar su resistencia a los cambios ambientales, incluyendo los derivados del cambio climático.

Asimismo, se puede utilizar para el tratamiento de bienes patrimoniales, ya que la eliminación de agentes biológicos permite extender la vida útil de estos materiales, que con el tiempo pueden verse afectados por mosquitos, hongos, microorganismos unicelulares como bacterias y otros pluricelulares como larvas. En conclusión, la tecnología nuclear y de radiación en Chile proporciona al país una herramienta de precisión que garantiza la seguridad y la preservación (Figura 23).

Más allá de la esterilización de productos, la energía nuclear desempeña un papel crucial en los ámbitos de la medicina y la radiofarmacia (Figura 24).

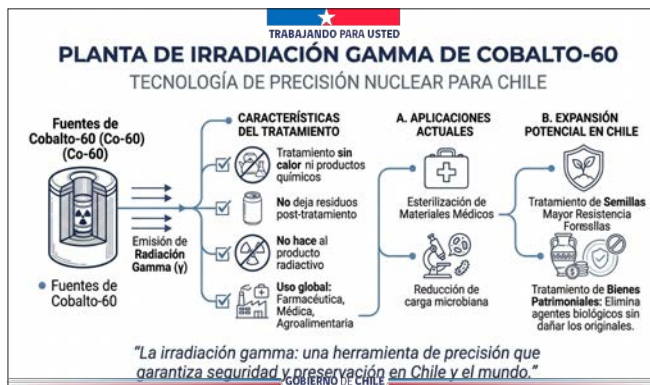


Figura 23



Figura 24

En este contexto, es crucial destacar la soberanía que ha alcanzado en el ecosistema oncológico, gracias a las capacidades que se han desarrollado en el país.

La fase inicial de este proceso consiste en la irradiación de blancos, tales como el telurio, en un reactor nuclear o en un ciclotrón (cuya explicación se presentará posteriormente), con el objetivo de generar radiofármacos como el yodo. Es importante resaltar que el reactor nuclear requiere la operación de una planta de elementos combustibles para su funcionamiento.

Posteriormente, los materiales irradiados en el reactor son trasladados a laboratorios especializados dentro de la comisión, donde, bajo estándares estrictos de buenas prácticas de manufactura, se purifican los radioisótopos y se fabrican los radiofármacos que posteriormente se distribuyen a los hospitales y clínicas del país para el tratamiento y diagnóstico del cáncer.

En consecuencia, resulta de suma importancia que las tecnologías nucleares estén presentes en el país para diversas aplicaciones, con un impacto significativo en la soberanía científica y tecnológica, así como un impacto directo en la población (Figura 25).

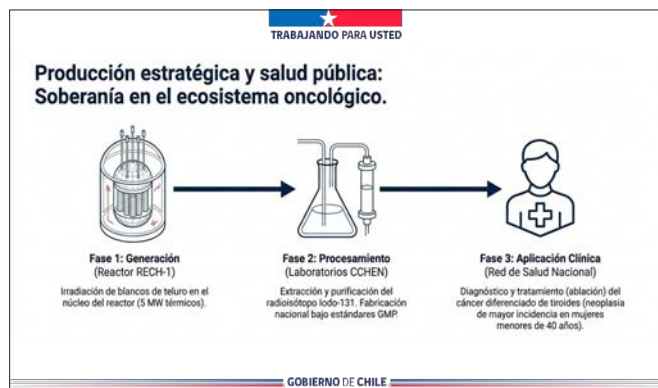


Figura 25

La medicina nuclear y los radiofármacos operan con base en su capacidad dual como herramientas diagnósticas y terapéuticas. Estas permiten la detección de diversos procesos internos del organismo, incluyendo alteraciones metabólicas, dado que la presencia tumoral constituye una modificación en el metabolismo.

Adicionalmente, los radiofármacos son capaces de identificar cambios en los flujos y las actividades biológicas, lo que los posiciona como una aplicación nuclear con una relevancia considerable para la población. Por consiguiente, considero que esta aplicación, dada su amplia repercusión, es la que más deseo presentarles, ya que estimo que puede propiciar un mayor conocimiento en la población acerca de las capacidades de la energía nuclear (Figura 26).

El Flúor 18, generado mediante ciclotrón, equipo disponible en la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), facilita la detección de tumores al evidenciar las alteraciones metabólicas humanas asociadas al consumo de glucosa. Mediante estudios de Tomografía por Emisión de Positrones (PET), este isótopo se conjuga con el Fluorodesoxiglucosa (FDG), permitiendo la visualización de la captación del Flúor 18 y, en consecuencia, la identificación de cambios metabólicos, un incremento en el consumo de glucosa y, potencialmente, la presencia de procesos tumorales (Figura 27).



Figura 26

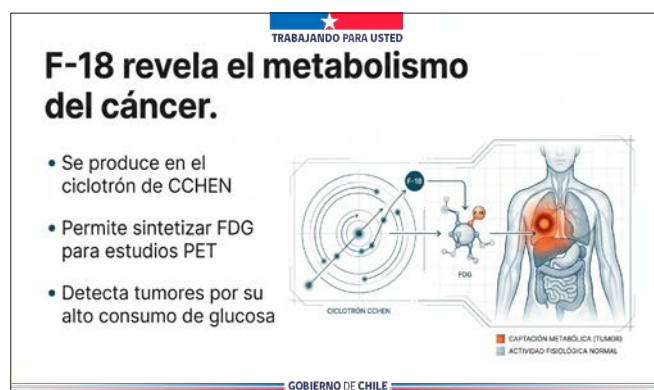


Figura 27

El reactor también genera Tecnecio 99, el cual posee múltiples aplicaciones en estudios óseos, cardíacos y otros estudios funcionales (Figura 28).

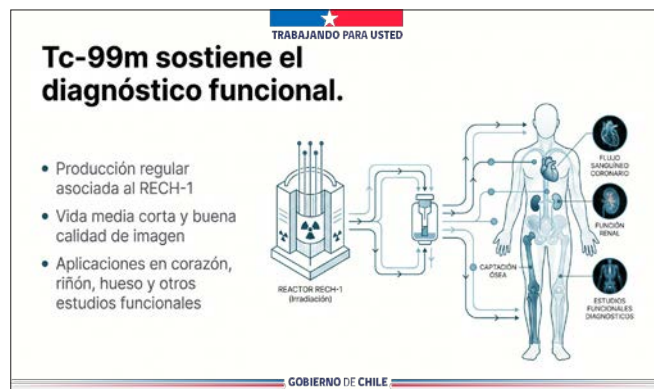


Figura 28

El tercer radiofármaco sintetizado en el reactor es el Yodo 131, el cual integra funciones diagnósticas y terapéuticas. Su captación preferencial por la glándula tiroides lo convierte en un elemento fundamental para la detección de hipertiroidismo y cáncer de tiroides (Figura 29).

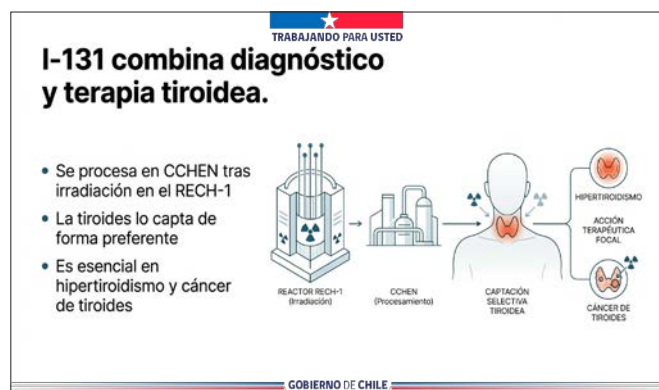


Figura 29

Estas aplicaciones representan el futuro de la radiofarmacia y la posición estratégica de la CCHEN en este campo.

Los radioligandos terapéuticos de alta selectividad presentan la oportunidad de diseñar moléculas con un enfoque preciso, facilitando la unión a dianas específicas y la creación de radiofarmacias de precisión.

Chile implementará capacidades preclínicas avanzadas, incluyendo tomografía por emisión de positrones (PET), tomografía por emisión de fotón único (SPET) y tomografía computarizada (CT), para estudiar en vivo la biodistribución y eficacia de posibles radiomoléculas con aplicaciones radiofarmacéuticas futuras. Este proyecto se encuentra en desarrollo en la Comisión Chilena de Energía Nuclear y se proyecta que esté completamente operativo en el mediano plazo.

Asimismo, se busca integrar a Chile en una red de terapia dirigida e investigación traslacional, con el objetivo de impulsar la innovación tecnológica en el país mediante el desarrollo de nuevos radiofármacos. Para alcanzar este objetivo, es esencial ampliar las redes de colaboración y difundir el conocimiento sobre estas temáticas, fomentando el interés de investigadores e investigadoras chilenos (Figura 30).



Figura 30

Más allá de las aplicaciones clínicas, farmacéuticas y médicas, las tecnologías nucleares ofrecen un amplio abanico de aplicaciones industriales y ambientales (Figura 31).



Figura 31

En el sector minero industrial, los ensayos no destructivos, la gestión hídrica y ambiental, y la hidrología isotópica representan ejemplos de su aplicación. En el ámbito agroforestal, se emplean técnicas como la del insecto estéril o la irradiación gamma para el control de plagas y la extensión de la vida útil de las exportaciones. Asimismo, la mutagénesis y la radiohormesis permiten que las especies vegetales se adapten a los cambios climáticos, contribuyendo a la conservación del patrimonio cultural, como se mencionó anteriormente (Figura 32).

Estas aplicaciones se basan en la capacidad de la tecnología nuclear para inspeccionar, medir y esterilizar.



Figura 32

La inspección permite la detección de fallas internas en equipos, mientras que la medición facilita la detección de radioactividad y el monitoreo de procesos mediante trazadores, lo que permite la identificación de fugas y niveles de radioactividad. La esterilización, por su parte, tiene aplicaciones en los sectores de salud y alimentos, reduciendo la carga microbiana.

En conclusión, las tecnologías nucleares ofrecen la capacidad de inspeccionar, medir y esterilizar, sentando las bases para el desarrollo de aplicaciones pacíficas de estas tecnologías (Figura 33).



Figura 33

Hemos tenido experiencias sumamente satisfactorias en la Comisión Chilena de Energía Nuclear, y nos interesa fomentar estas actividades. Nuestro objetivo es la protección del patrimonio cultural mediante el estudio interno de objetos patrimoniales, garantizando su integridad. Para ello, empleamos técnicas avanzadas como los exámenes

de activación neutrónica, que nos permiten analizar la procedencia de los materiales con precisión. Además, nos dedicamos a la mitigación de los efectos del biodeterioro en objetos frágiles conservados en museos, contribuyendo así a la prolongación de su vida útil y a la preservación de nuestro patrimonio cultural (Figura 34).

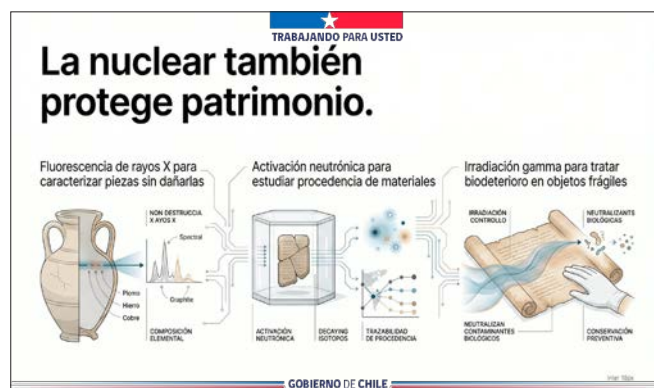


Figura 34

Los isótopos ofrecen una herramienta valiosa para el análisis del agua y el medio ambiente. La hidrología isotópica permite determinar el origen de los afluentes de agua, facilitando la identificación de su procedencia.

Nuestra capacidad de trazabilidad proporciona una comprensión profunda de los acuíferos y la interconexión de los sistemas hídricos. Esta capacidad facilita la identificación y el rastreo de contaminantes, determinando su origen, ya sea en contextos mineros u otras aplicaciones, como el análisis de microplásticos en océanos y zonas con recursos hídricos (Figura 35).

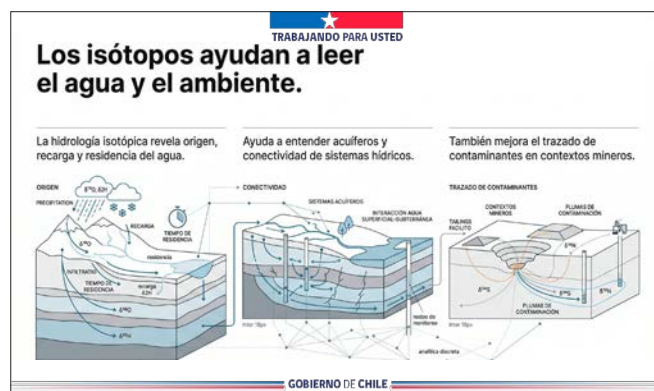


Figura 35

En el ámbito nacional, disponemos de la ventaja de brindar apoyo a diversos sectores, incluyendo la minería en el Valle Central, la agroindustria y el estudio de los recursos hídricos en la costa. Adicionalmente, mediante alianzas estratégicas, como la establecida con el Instituto Nacional Antártico Chileno, se facilita el monitoreo de ecosistemas antárticos ubicados en el extremo sur del país (Figura 36).

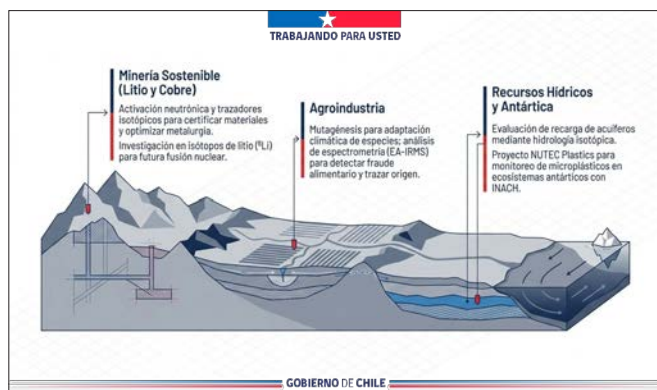


Figura 36

La minería sostenible constituye un tema de suma importancia, considerando que uno de los ejes reguladores de la comisión se centra en el litio, como se evidenció en una de las primeras presentaciones.

El litio es un mineral de gran relevancia nuclear. Nuestra capacidad tecnológica nos permite el estudio y la medición del litio, y estamos estableciendo el primer laboratorio de referencia del litio a nivel nacional. Mediante nuestra investigación, podemos contribuir a la extracción y sostenibilidad de los procesos mineros de litio y otros minerales.

La importancia del litio reside en su papel fundamental en la generación de tritio, materia prima esencial para la operación de reactores de fusión nuclear. Esto posiciona a Chile como un potencial proveedor estratégico global para futuros reactores de fusión (Figura 37).

El Reactor Experimental Chileno 1 (RECH-1) es un reactor de fisión nuclear que opera mediante el bombardeo de neutrones para dividir núcleos pesados, como el uranio, liberando así neutrones adicionales. Este proceso es fundamental para la generación de energía nuclear.

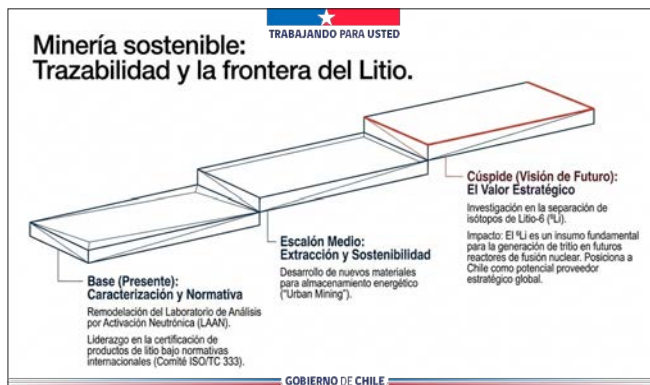


Figura 37

En contraste, la fusión nuclear implica la unión de núcleos ligeros, un fenómeno que ocurre naturalmente en estrellas como el Sol. La investigación actual se centra en la optimización de la eficiencia de la unión de deuterio y tritio, isótopos del hidrógeno. Sin embargo, la disponibilidad de tritio a nivel global es limitada, con una estimación de aproximadamente 20 kilogramos de tritio disponible en el mundo. Por lo tanto, la producción de tritio se presenta como un requisito crucial para el desarrollo de la energía de fusión nuclear (Figura 38).

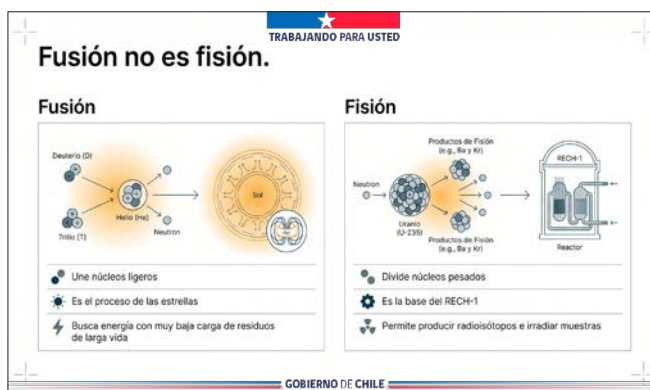


Figura 38

El litio constituye el elemento fundamental para la producción de tritio, componente esencial para el funcionamiento de los reactores de fusión a nivel global. Chile posee un potencial considerable para el desarrollo de estas tecnologías, las cuales se encuentran en fase de investigación y representan la base del futuro de los reactores de fusión (Figura 39).

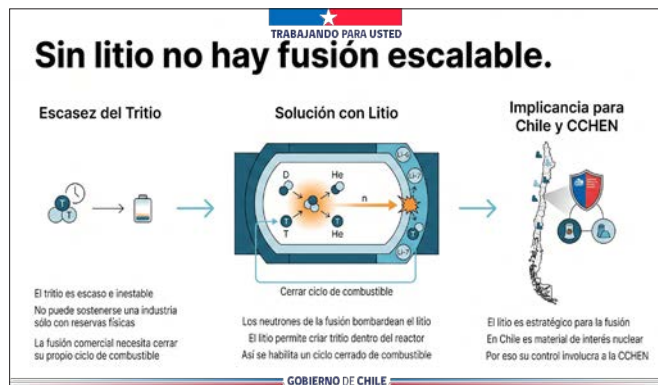


Figura 39



Figura 41

Antes de abordar la utilidad y la importancia de la fusión, es pertinente destacar que Chile ya realiza investigaciones en el ámbito de la fusión y el plasma (Figura 40).



Figura 40

En la entrada del Centro de Estudios Nucleares de la Reina se exhibe un mural titulado “Energía Creadora”, el cual representa la evolución desde el sol, ubicado en la parte superior izquierda, hasta el desarrollo tecnológico que posibilita la construcción de reactores de fusión. Este mural simboliza el ciclo de desarrollo desde un reactor natural de fusión, como el sol, hasta la creación de reactores artificiales que nos permiten reutilizar la energía solar (Figura 41).

Chile ha desempeñado un papel pionero en estas investigaciones, gracias a la labor fundamental de nuestros ingenieros e investigadores. Los estudios en plasma y fusión requieren equipamiento de alto costo y experimentos a gran escala para alcanzar los niveles de temperatura y energía necesarios.

Hace varias décadas, los investigadores de la Comisión Chilena de Energía Nuclear desarrollaron una estrategia innovadora. Reconociendo las limitaciones en el acceso a equipos de gran escala y recursos financieros considerables, se propusieron alcanzar conclusiones equivalentes o similares a través de experimentos de menor envergadura.

Al identificar y aplicar las leyes de escala, lograron miniaturizar estos experimentos, obteniendo energías comparables a las de los experimentos globales de gran escala en equipos significativamente más compactos. Esta aproximación permitió a Chile integrarse al ecosistema mundial de fusión nuclear (Figura 42).

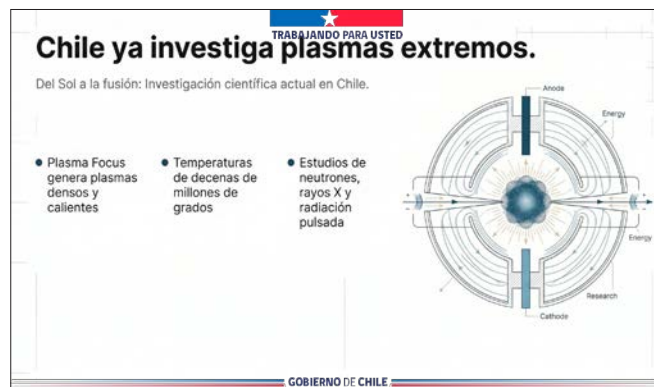


Figura 42

La fusión nuclear representa una fuente prometedora de generación de energía, atrayendo tanto la atención de la comunidad científica internacional como un creciente interés por parte de inversionistas privados en su desarrollo. Se estima que para el año 2040, los primeros reactores de

fusión nuclear podrían estar operando, lo que permitiría la generación de electricidad a partir de esta fuente energética (Figura 43).

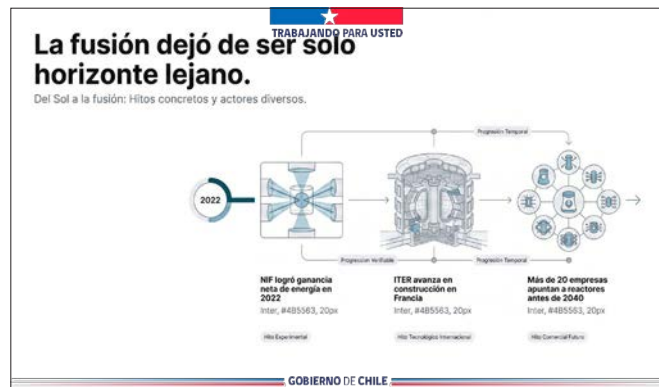


Figura 43

Chile se encuentra en una posición privilegiada para participar activamente en este diálogo global. Ya contamos con investigación en este ámbito, pero requerimos la formación de capital humano, la cual estamos desarrollando en nuestro laboratorio. Además, se contempla la posibilidad de colaboración internacional, particularmente desde Chile, iniciativa que estamos implementando (Figura 44).



Figura 44

Un acontecimiento de gran relevancia en este ámbito se registró en el año 2025, cuando la Comisión Chilena de Energía Nuclear, en representación de Chile, hizo de anfitriona de la primera conferencia interamericana en ciencia y tecnología de fusión nuclear. Este evento nos

permitió consolidar nuestra posición como un punto de encuentro para el sur global, facilitando el diálogo sobre el futuro de la fusión nuclear.

Chile ha generado conocimiento de vanguardia en este campo y debemos perseverar en esta trayectoria para asegurar una preparación óptima para el futuro (Figura 45).



Figura 45

A partir de este momento, se abre un debate sobre el tema energético, lo que probablemente dará lugar a diversas interrogantes. ¿Cuenta Chile con la capacidad técnica y los recursos necesarios para la construcción de reactores de generación eléctrica? ¿Existe la posibilidad de que, en el futuro, el país se oriente hacia la fusión nuclear mediante la implementación de tecnologías alternativas, tales como los reactores modulares pequeños?

Como funcionario técnico del Estado y representante de la Comisión, una agencia técnica del Estado, nuestra misión no radica en emitir juicios de valor, ya sean afirmativos o negativos, sino en participar activamente en el diálogo, promoviendo la entrega de datos fidedignos y verificables, fomentando la creación y el intercambio de conocimiento, y brindando asesoría técnica a quienes tengan la responsabilidad de tomar las decisiones pertinentes en este ámbito (Figura 46).

En este contexto, la cuestión estratégica debe ser abordada como una opción de política pública, y el análisis debe ser realizado con neutralidad. La CCHEN se encuentra comprometida a promover y proporcionar datos y conocimiento para facilitar dicho análisis.



Figura 46

Nuestro rol técnico consiste en informar con rigor, no en convencer. La decisión final corresponde al Estado, con la participación de todas las áreas pertinentes, incluyendo la ciudadanía (Figura 47).



Figura 47

Con base en datos fidedignos, se puede afirmar que la energía nuclear de potencia, o la generación eléctrica a través de la energía nuclear, ha resurgido como un tema central en el debate global. Francia, por ejemplo, está impulsando activamente la construcción de nuevos reactores nucleares, mientras que Europa ha reabierto el debate energético en general, considerando la energía nuclear como una opción viable. Asimismo, Japón ha reactivado sus reactores nucleares tras el incidente de Fukushima, demostrando su compromiso con esta fuente de energía. En consecuencia, la energía nuclear se ha consolidado como un tema relevante en el debate global, respaldado por datos concretos que evidencian su importancia en el panorama energético actual (Figura 48).

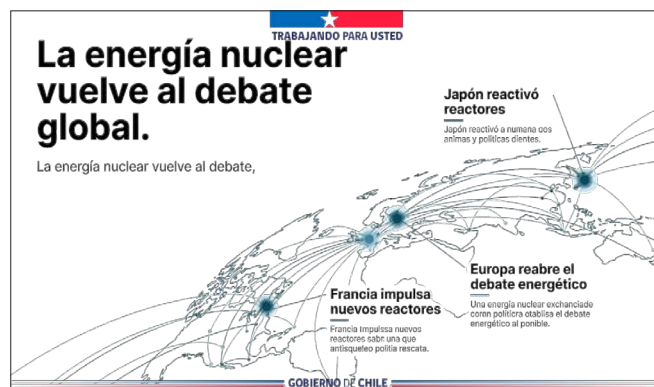


Figura 48

El debate y el resurgimiento de la energía nuclear se han visto impulsados por el desarrollo de las tecnologías de los reactores modulares pequeños (SMR). Estos reactores buscan superar barreras históricas relacionadas con los costos, la seguridad y el espacio.

Los SMR, una tecnología en desarrollo por diversos países, incluyendo algunos vecinos de la región, presentan un menor costo inicial de construcción y tiempos de construcción reducidos. Su naturaleza modular permite el ensamblaje *in situ* de piezas provenientes de diferentes ubicaciones, ofreciendo flexibilidad en cuanto a emplazamiento y escala. Dado que operan a menor potencia, requieren un menor tamaño, lo que los hace adecuados para ubicaciones remotas con espacio limitado para otras fuentes de energía renovable no convencionales.

Adicionalmente, estos reactores pueden contribuir a mitigar los efectos de la generación eléctrica, la escasez y la calefacción, por ejemplo, reduciendo el consumo de leña en sectores extremos de países como Chile (Figura 49).

La innovación en el ámbito de los reactores modulares pequeños (SMR) se encuentra en constante evolución a nivel internacional, con más de 80 diseños en fase de desarrollo. Se encuentran en marcha proyectos en Argentina, China, Rusia y Canadá, este último promoviendo activamente una hoja de ruta estratégica en esta materia. Adicionalmente, el Organismo Internacional de Energía Atómica proporciona asistencia técnica a los países para la preparación de la implementación de estas tecnologías emergentes (Figura 50).



Figura 49



Figura 51



Figura 50

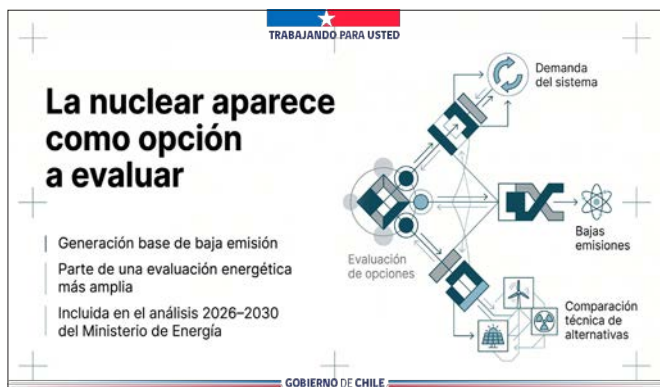


Figura 52

Chile se encuentra en un proceso de transformación de su matriz energética, habiendo incrementado sustancialmente la contribución de fuentes renovables, tales como la energía solar y eólica.

En la actualidad, más del 60% de la generación de energía del país se origina en fuentes renovables. No obstante, se presentan desafíos relacionados con la gestión de respaldo, el almacenamiento y la flexibilidad (Figura 51).

En este contexto, la energía nuclear emerge como una alternativa viable para la generación de energía. La Comisión Chilena de Energía Nuclear desempeña un papel crucial en la provisión de información exhaustiva sobre esta opción, presentando tanto sus beneficios como las medidas de seguridad necesarias, y proponiéndola como una solución viable para las necesidades energéticas del país (Figura 52).

Poseemos la capacidad de efectuar análisis exhaustivos gracias a nuestra amplia experiencia en operación y regulación nuclear, nuestro profundo conocimiento del marco internacional y nuestro capital humano altamente calificado, el cual nos permite brindar asesoría estratégica para las decisiones futuras en este sector (Figura 53).

Chile cuenta con una capacidad institucional de carácter técnico, lo que nos permite presentar la información con el rigor necesario para las discusiones pertinentes (Figura 54).

Sin embargo, existen desafíos y oportunidades que deben ser abordados; no todos los resultados son logros ni ganancias. Esta exposición también podría generar ideas para reducir estas brechas y enfrentar los desafíos y oportunidades mencionados (Figura 55).



Figura 53



Figura 54



Figura 55

El principal desafío radica en la insuficiencia de capital humano. Si Chile pretende adentrarse en el futuro de estas tecnologías, es fundamental reconocer que la formación de especialistas en tecnología nuclear se ve limitada por la ausencia de una industria nuclear desarrollada a gran escala. En consecuencia, la oferta de programas de posgrado

en física e ingeniería nucleares es escasa, mientras que la demanda en hospitales e industria supera la disponibilidad de profesionales capacitados.

Actualmente, resulta imperativo formar expertos no solo para la operación, sino también para la evaluación de proyectos y el desarrollo de aplicaciones que trasciendan las tecnologías de producción eléctrica. Esta situación representa una oportunidad para implementar una estrategia de formación en estas áreas (Figura 56).

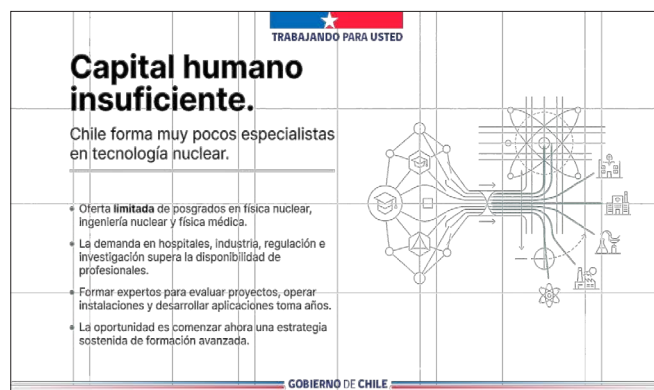


Figura 56

Enfrentamos desafíos significativos en la alfabetización nuclear, dado que la promoción de debates informados requiere una mejora sustancial en la percepción pública sobre la energía nuclear, la cual constituye un componente esencial de las políticas energéticas. La percepción pública actual se caracteriza por una tendencia negativa, principalmente influenciada por los accidentes de Chernobyl y Fukushima, siendo este último el más reciente y, por lo tanto, el que ejerce una mayor influencia en la opinión pública. Adicionalmente, es imperativo la formación de otros especialistas, tales como periodistas científicos y comunicadores de riesgos, para garantizar que los riesgos asociados a la energía nuclear sean comunicados con precisión y contextualización, evitando su negación, sino presentándolos de manera objetiva y fundamentada.

La alfabetización en este contexto implica la capacidad de la ciudadanía para diferenciar entre conceptos como irradiación, radiación de alimentos, medicina nuclear, radioterapia y reactor de potencia. Es fundamental que se comprendan los principios subyacentes a cada una de estas aplicaciones para que las conversaciones y discusiones se

basen en información precisa y con un sólido fundamento técnico (Figura 57).



Figura 57

La modernización representa tanto un desafío como una oportunidad tecnológica. Consideremos nuestro reactor, que ha operado de manera prácticamente continua durante más de cinco décadas. En consecuencia, la modernización se presenta como un desafío, y actualmente nos encontramos en el proceso de transición de sistemas analógicos a digitales. Los sistemas utilizados hace medio siglo ya no son los mismos que se emplean en la actualidad.

En este contexto, la digitalización surge como una oportunidad, y tecnologías como los gemelos digitales y la inteligencia artificial, que se están promoviendo en otras industrias, también ofrecen beneficios potenciales para la industria nuclear nacional. A nivel internacional, la industria nuclear ya es objeto de estudio para explorar oportunidades como el mantenimiento predictivo, lo que nos permitiría anticipar fallas y gestionar el envejecimiento de instalaciones nucleares de manera más eficaz. Sin embargo, para lograr estos objetivos, es indispensable contar con profesionales capacitados que puedan llevar a cabo estos proyectos (Figura 58).

Para alcanzar un impacto sustancial con las aplicaciones nucleares en la ciudadanía y, en última instancia, en el país, resulta indispensable la articulación. Una mayor articulación se traduce en un mayor impacto. La Comisión Chilena de Energía Nuclear, como organismo técnico, requiere la colaboración de diversos actores para establecer redes que permitan a universidades, hospitales e industrias desarrollar aplicaciones de mayor alcance, profundizar su

conocimiento sobre la energía nuclear, formar capital humano y crear mecanismos que conecten estas capacidades con las necesidades específicas del país y del Estado, con el objetivo de llegar a la ciudadanía (Figura 59).



Figura 58



Figura 59

Al concluir esta presentación, es imperativo reconocer que la tecnología nuclear se fundamenta en más de seis décadas de historia, representando la transformación del conocimiento de la materia a través de la ingeniería, lo que ha facilitado el desarrollo de herramientas de gran utilidad para el país.

En consecuencia, exhorto a todos los ingenieros e ingenieras del país a profundizar en el conocimiento de las potencialidades de la energía nuclear, dado su papel fundamental en el desarrollo de las tecnologías futuras, incluyendo reactores modulares, en caso de que el país decida emprender este camino, la fusión nuclear y la preparación del terreno para las generaciones venideras, permitiéndoles

construir un futuro de aplicaciones nucleares pacíficas, seguras e innovadoras, sustentado en evidencia sólida (Figura 60).



Figura 60

Agradezco su interés en las materias que abordamos hoy.

A continuación, el Sr. Guevara responde a consultas y preguntas de los asistentes. El director don Mauro Grossi, hace de moderador.

Sr. Mauro Grossi.

—Sr. Guevara, muchas gracias por su intervención.

Hemos recibido numerosas consultas internas de interesados que han manifestado su deseo de visitar el reactor y conocer más a fondo sus operaciones y gestión. Si bien estas consultas superan el marco de una simple presentación, evidencian un considerable interés en nuestras actividades.

Sr. Felipe Guevara.

—Por ejemplo, durante el Día del Patrimonio, organizamos jornadas de puertas abiertas en el marco de eventos como CoSantiago, carreras universitarias y agrupaciones gremiales. Estas visitas pueden ser coordinadas a través de la Oficina de Alianza Estratégica y Relaciones Internacionales o la Oficina de Comunicaciones de la institución. Las entidades interesadas, ya sean colegiadas, instituciones o carreras universitarias, deberán comunicar su intención de visitar

a estas oficinas. Para más información, pueden consultar nuestra página web: www.cchen.cl.

Sr. Mauro Grossi.

—El documento se ha compartido en el chat para su consulta. Se presentan diversas preguntas, y de acuerdo con la disponibilidad de tiempo, se procederá a su resumen en dos o tres. Se presentarán todas las preguntas al Sr. Felipe Guevara P. de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) para facilitar el avance en la discusión.

La primera pregunta se refiere a las experiencias compartidas en diversas áreas, con el objetivo de identificar los principales desafíos. En particular, se cuestiona si las limitaciones se deben a restricciones presupuestarias, a la disponibilidad de capital humano, a políticas públicas, o a una combinación de estos factores. Asimismo, se indaga sobre la posibilidad de ampliar el trabajo, especialmente en el ámbito de la investigación.

La segunda pregunta es similar a la anterior, pero se centra en el papel de los reactores modulares en la matriz energética nacional.

La tercera pregunta aborda las exportaciones actuales de la CCHEN. En caso de existir exportaciones derivadas de la presencia de una planta de generación de combustible, se busca comprender la contribución de Chile al mercado global en este ámbito.

Estas serán las tres preguntas iniciales. Se considerará el tiempo disponible para abordar cada una de ellas.

Sr. Felipe Guevara.

—Agradezco su atención. Como mencioné previamente en la presentación, la función de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, así como mi rol como jefe de división, no consiste en promover una tecnología sobre otra, sino en proporcionar la información necesaria para la toma de decisiones informadas. Por lo tanto, me gustaría abordar los obstáculos que impiden el inicio de las conversaciones pertinentes. Las decisiones políticas, presupuestarias y la decisión de emprender este proyecto son todas decisiones cruciales que requieren un análisis exhaustivo.

A nivel estatal, las decisiones presupuestarias suelen priorizarse debido a las limitaciones financieras inherentes. Asimismo, las decisiones se priorizan en función de las necesidades más inmediatas, a mediano plazo y a largo plazo, considerando la disponibilidad de recursos y las prioridades estratégicas del país. Sin embargo, existen brechas significativas que deben abordarse para avanzar en este proceso, las cuales mencioné al final de mi presentación.

Una de estas brechas es la de capital humano. Si decidimos embarcarnos en la construcción de reactores nucleares, debemos evaluar cuidadosamente si contaremos con la capacidad operativa necesaria para garantizar la seguridad y eficiencia de las instalaciones. Es fundamental cuestionarnos si nuestros ingenieros e ingenieras están debidamente preparados para participar en la construcción, comprender los emplazamientos, gestionar los riesgos asociados y cumplir con las normativas vigentes. ¿O tendremos que recurrir a la importación de este conocimiento especializado cuando llegue el momento, lo que podría implicar costos adicionales y dependencia externa? Como mencioné en una de las diapositivas, se está reactivando el diálogo a nivel global sobre la energía nuclear, y nuestro rol es proporcionar los datos y la información necesarios para que las decisiones se tomen de manera informada y basada en evidencia científica.

Si bien no puedo precisar exactamente qué información adicional falta para tomar estas decisiones de manera definitiva, la Comisión Chilena de Energía Nuclear está recopilando activamente datos y generando conocimiento en diversas áreas relacionadas con la energía nuclear. Este conocimiento se encuentra en constante actualización y podría estar disponible para el Estado cuando así lo requiera, para apoyar la toma de decisiones informadas y el desarrollo sostenible del sector energético.

La pregunta sobre la naturaleza de nuestras exportaciones es de gran interés, ya que abarca tanto bienes tangibles como intangibles. Exportamos conocimiento, destacándonos como líderes en diversas áreas de generación de conocimiento, con publicaciones científicas que han sido portadas de revistas de renombre internacional y han obtenido reconocimiento a nivel global, contribuyendo así

al avance del conocimiento científico y tecnológico en el ámbito de la energía nuclear.

Nos encontramos a la vanguardia de las discusiones sobre fusión nuclear en América Latina, lo cual se evidenció en la organización del primer congreso latinoamericano de fusión nuclear en Chile y en la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) el año anterior. Nuestra contribución a las exportaciones de otras áreas, como el sector agroalimentario, se realiza mediante la irradiación de alimentos, los cuales posteriormente son exportados.

Si bien es imperativo avanzar en la exportación de la tecnología que estamos desarrollando, para lograr este objetivo es fundamental establecer alianzas estratégicas, como se ilustró en una de las últimas diapositivas presentadas.

La tecnología que hemos desarrollado requerirá la intervención de un socio externo para facilitar la transferencia tecnológica y la exportación. Como ente público, corresponde a la comisión llevar estas tecnologías al mercado. Si bien nuestro rol principal es la transferencia tecnológica con impacto en la población, también es fundamental contar con una red de colaboradores externos que nos permita acelerar este proceso y expandir nuestros desarrollos más allá de nuestras fronteras.

Sr. Mauro Grossi.

—Agradezco su intervención, Felipe. En cuanto a las consultas sobre cómo contactarse, el sitio web www.cchen.cl debería ser el punto de contacto principal, ya sea a través de la oficina de alianzas o mediante un banner de contacto.

En mi calidad de representante de un organismo estatal, reconozco nuestra obligación de cumplir con la Ley 20.500, lo que conlleva la implementación de un módulo de participación ciudadana, ¿es correcto, Sr. Felipe?

Sr. Felipe Guevara.

—Afirmativo.

Sr. Mauro Grossi.

—Para finalizar, abordaré una interrogante de particular relevancia para los ingenieros: ¿cuáles son los procedimientos establecidos para el contacto y la obtención de información relativa a las medidas de precaución o la resistencia sísmica al operar un reactor?

Sr. Felipe Guevara.

—Esta es una pregunta sumamente pertinente, dado que el reactor ha demostrado su capacidad para soportar sismos de gran magnitud en nuestro país, incluyendo los ocurridos en 1985 y 2010. Cabe destacar que, durante el sismo de 2010, el reactor se encontraba en operación. Es fundamental subrayar que una instalación nuclear, como un reactor nuclear, está diseñada para resistir tales eventos. En consecuencia, cuenta con mecanismos de seguridad redundantes, lo que implica que no depende de un único mecanismo. Existen sensores sísmicos que activan una serie de instrumentos que permiten no solo la detección de la actividad sísmica, sino también la reducción de la potencia del reactor a cero de manera casi inmediata, es decir, su apagado rápido y eficiente mediante estos mecanismos de control. La edificación en sí cumple con los estándares más exigentes de la mayoría de las estructuras civiles.

El sismo de 2010 no tuvo consecuencias significativas y, como se mencionó, el reactor se encontraba en operación en ese momento. La tranquilidad reside en la existencia de mecanismos de seguridad redundantes, una sensorización robusta para la actividad sísmica y, sobre todo, la especialización y capacitación de los operadores de reactor, tanto hombres como mujeres, quienes poseen la experiencia necesaria para reaccionar eficazmente ante una emergencia como un sismo de gran magnitud.

Sr. Mauro Grossi.

—Estimados Felipe y distinguidos invitados, hemos abordado diversas temáticas y preguntas, y les proporcionamos el enlace www.cchen.cl para cualquier consulta adicional. Agradezco su intermedio, Felipe. Entiendo que la Sra. Bárbara Nagel, también de la Oficina de Alianza, se encuentra conectada, por lo que le expresamos nuestra gratitud por sus gestiones, su presentación y, por supuesto, a la Comisión Chilena de Energía Nuclear por su presencia hoy en el Instituto de Ingenieros de Chile. Extendemos nuestra gratitud a todos los asistentes y les informaremos que a fines de mayo realizaremos nuestra segunda charla del Instituto, a la cual toda la comunidad está cordialmente invitada.

Durante el tiempo en que el Sr. Felipe respondía la última pregunta, procedí a revisar la página web institucional y confirmo que la convocatoria para el evento “Puerta Abierta” se encuentra publicada. Para aquellos interesados en obtener información adicional y antecedentes, les informamos que podrán acceder a la página web del Instituto en la dirección electrónica www.cchen.cl.

Agradecemos nuevamente su atención y procedemos a la conclusión de nuestra transmisión.

Sr. José Orlandini.

—Expreso mi más sincero agradecimiento al Sr. Felipe por su excelente exposición. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a todos los asistentes que nos han acompañado a través de nuestro portal digital. Como se había anunciado previamente, procederemos a la publicación de esta presentación en nuestro canal de YouTube y en la revista del Instituto. Una vez más, muchas gracias por su valiosa participación.

Fin de la conferencia.

ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS



Como una necesidad de preservar la historia de ingenieros o ingenieras destacados de la Ingeniería, la Comisión de Ingenieros en la Historia Presente sigue en una serie de entrevistas, con el objeto señalado.

En esta ocasión, se presenta un extracto de la entrevista realizada al Ingeniero Sr. Eduardo Frei Ruiz-Tagle, Premio “Medalla de Oro – Año 2025” y al Sr. Francisco Suárez Poch, Premio “Al Ingeniero por Acciones Distinguidas – 2025”.

Estas entrevistas, como las que se hagan en el futuro, serán objeto de una publicación especial.

EDUARDO FREI RUIZ-TAGLE.

Un Ingeniero que llegó a lo más alto sirviendo a su país.

En su decisión de estudiar ingeniería, la principal influencia fue su padre, el expresidente Eduardo Frei Montalva. Cuenta que su padre, de joven, tuvo un interés inicial por la medicina, pero por motivos económicos familiares optó por estudiar derecho; siempre transmitió a sus hijos una visión ligada al desarrollo material y moderno del país: infraestructura, industrialización, energía y progreso técnico. Sostiene que en el gobierno de su padre se impulsaron grandes obras públicas, la modernización del Estado y la “Revolución en Libertad”, procesos que lo acercaron al mundo de la ingeniería y a la planificación del desarrollo nacional. Esa mirada de futuro, sustentada en el avance científico y tecnológico, implicaba también un cambio profundo en la vida de las personas.

Eduardo Frei Ruiz-Tagle estudió ingeniería porque era la carrera que más le gustaba. Siempre se sintió atraído por entender cómo funcionan las cosas, resolver problemas complejos, ser creativo, emprender, impulsar proyectos y trabajar en equipo, y sostiene que su decisión fue vocacional. Optó por estudiar en la Universidad de Chile porque esa casa de estudios ofrecía un enfoque tanto teórico como práctico, con una formación científica y rigurosa, reconocida por profundizar en los fundamentos científicos y matemáticos y por formar ingenieros con gran capacidad analítica para resolver problemas complejos. Además, lo atraía el ambiente diverso y plural de la universidad, junto con su tradición política y su compromiso social.

Señala que todos los ramos de la carrera le fueron de gran utilidad en su vida profesional. Siempre sintió atracción por las asignaturas relacionadas con construcción de infraestructura como puentes, aeropuertos, carreteras y represas, así como también por aquellos ramos relativos a edificación, generación de energía, automatización y telecomunicaciones. Nos cuenta que tuvieron una gran influencia en su formación académica y profesional varios de los profesores que impartían clases en la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, muchos de los cuales provenían de Endesa S.A., la principal empresa eléctrica del país en aquella época. Además, tuvo la oportunidad de ser discípulo de un destacado académico: Francisco Javier Domínguez S., profesor de hidráulica y director del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería. Tuvo el privilegio de ser ayudante de su cátedra durante



tres años, y este profesor participó además como guía de su memoria de título. Nos comenta que el reconocido texto de hidráulica escrito por este profesor gozaba de prestigio internacional por su excelencia académica.

Sostiene que la ingeniería le entregó una formación muy completa, que le permitió enfrentar diversos desafíos durante su paso por el sector privado. También fue clave en su trayectoria pública porque la ingeniería ayuda a formar equipos, visualizar problemas y sus soluciones, y también a tomar decisiones oportunas y adecuadas.

Tras titularse como Ingeniero Civil Hidráulico, obtuvo una beca de especialización en Administración y Técnicas de Gestión en la empresa Snam Progetti, perteneciente al Grupo ENI, en Italia. Posteriormente, logró una beca de trabajo que le permitió conocer en profundidad el sistema de concesiones implementado en el norte de Italia, aprovechando la experiencia adquirida con ese sistema en el centro y sur de ese país. Esta etapa de formación y experiencia internacional fue un gran aporte a su trayectoria profesional, ya que posteriormente le permitió impulsar y desarrollar, durante su gobierno, el sistema de concesiones en Chile, herramienta clave para la modernización de la infraestructura del país y que ha seguido vigente a lo largo de los años.

Posteriormente trabajó veinte años en una gran empresa, Sigdo Koppers, donde se desarrollan importantes proyectos de diversas áreas de la ingeniería. Destaca, como ejemplo, su paso por el Departamento de Ingeniería de esa empresa, donde trabajó como ingeniero administrador en la planta de aceros especiales en Rengo, en la planta de renio y molibdeno en San Antonio, en un complejo frigorífico en Valparaíso y en la planta de pellets de Maipú.

Considera que el desafío principal de su vida profesional fue asumir responsabilidades de servicio público durante largos años. Fue Senador de la República durante 18 años. Adicionalmente, tuvo el honor de desempeñarse como presidente de la República entre los años 1994 y 2000. Más adelante, asumió la labor de Embajador Especial para Asia-Pacífico durante ocho años. Cada una de estas responsabilidades le implicó enfrentar importantes desafíos políticos, económicos e institucionales. Todo ello forma parte de su trayectoria que es de conocimiento público.

Estima que sus principales aportes a la ingeniería los realizó en su gobierno, por la trascendencia social que tuvieron y su impacto en el desarrollo del país. Por ejemplo, haber impulsado el sistema de inversiones mediante la asociación público-privada, lo que significó la construcción de grandes obras de infraestructura, así como también la privatización y concesiones de las empresas sanitarias, y el desarrollo del sector eléctrico en generación, transmisión y distribución.

Eduardo Frei Ruiz-Tagle se mantiene hasta el día de hoy activamente trabajando para nuestro país, apoyando políticas públicas, cooperando al desarrollo y aumento de la capacidad exportadora de Chile, contribuyendo con su experiencia a la construcción de un mejor país para todos. Por ejemplo, nos comenta que participa muy activamente en el Consejo de Políticas de Infraestructura (CPI), la que considera una institución especialmente valiosa en Chile por su pluralismo y su sólida visión técnica y profesional, orientada a contribuir al desarrollo y crecimiento de la economía del país. Ha recibido numerosas condecoraciones y premios por su destacada trayectoria. El año 2025 el Instituto de Ingenieros de Chile le otorgó el premio “Medalla de Oro”, máximo reconocimiento otorgado por esta institución, que premia a ingenieros destacados por los servicios prestados al país y a la ingeniería.

Nos comenta que hasta hoy mantiene contacto con ingenieros de su generación, y que tanto en su paso por el sector privado como en su trayectoria pública conoció y trabajó con muchos ingenieros, con varios de los cuales mantiene relaciones de amistad.

Para él, nos dice, lo más importante que ha hecho en su vida es formar una familia con su esposa, sus cuatro hijas y doce nietos. Es el lugar donde siempre encuentra el amor incondicional, la comprensión y el apoyo para cada una de las cosas que ha hecho en su vida. Cree que nada de eso habría tenido sentido sin ella. Los valores que guían su vida son los que le transmitieron sus padres: la importancia de la familia, la rectitud, el respeto a los demás, la responsabilidad y la solidaridad con quienes no han tenido las mismas oportunidades.

Le preguntamos por qué en particular le gustaría ser recordado, y qué legado le gustaría dejar, y nos dice que su aporte está a la vista. Los chilenos lo reconocen y hasta el día de hoy le hacen sentir su afecto y agradecimiento. Para él eso es suficiente y lo llena de satisfacción. Nunca ha pedido algo para sí mismo, pero como lo señaló días antes de terminar su gobierno, le gustaría que el país conserve en su memoria a una persona que siempre quiso servir a Chile con responsabilidad, honestidad y un profundo compromiso con el bien superior de la patria y de todos los chilenos.

En relación al desarrollo de la ingeniería en el tiempo, sostiene que ha sido impresionante ver cómo ha evolucionado a través de los siglos y muy especialmente en los últimos 40 años. Esta actividad parte con la construcción de estructuras antiguas, como las pirámides y acueductos. Desde ahí, y a través de los siglos, la ingeniería avanzó hasta la revolución industrial, pasando por el desarrollo de la máquina de vapor y la electricidad, y numerosos avances tecnológicos, hasta llegar hoy a la automatización, la inteligencia artificial y la sostenibilidad en los proyectos. Sostiene que estamos en la era de la información, donde se está transformando profundamente la sociedad y mejorando la calidad de vida de las personas, y que cada paso nos ha permitido ampliar lo que podemos imaginar y construir.

En relación con el futuro de la ingeniería opina que es difícil predecirlo porque, como señaló anteriormente, es una actividad que cambia continuamente y ha empujado los límites más allá de lo imaginable. Nos dice que lo que sí se sabe, es que el desarrollo tecnológico y la innovación serán la base en que se sustentará la ingeniería del futuro. Las empresas que quieran ofrecer más eficiencia, calidad y un mejor servicio deberán usar los avances tecnológicos que día a día impactan a todas las economías en el mundo. Cree que las herramientas innovadoras son las que permitirán a las empresas conocer bien sus procesos, identificar fallas o problemas de funcionamiento y poder aplicar técnicas para minimizar sus impactos negativos.

Le preguntamos qué consejo les daría a las nuevas generaciones y nos dice que el mundo de la ingeniería está en constante evolución, y con el paso de los años, las habilidades que antes eran esenciales ahora deben combinarse con competencias más innovadoras. Le diría a los futuros ingenieros que desarrollen determinadas capacidades como entender y manejar la tecnología, especialmente en el ámbito de la programación; tener pensamiento crítico y creatividad; comunicarse de manera clara y efectiva para plantear ideas complejas a compañeros de equipo, gerentes o clientes; trabajar en equipo, escuchar a otros profesionales y aportar ideas desde una perspectiva colaborativa, gestionar proyectos y contar con habilidades de liderazgo.



FRANCISCO SUÁREZ POCH.

Aportando con excelencia a la Ingeniería Hidráulica.

Llegó a Ingeniería de manera natural, por su interés temprano en las matemáticas y los problemas lógicos. Una influencia decisiva fue su tío Jaime Poch Suárez, ingeniero civil de la Universidad de Chile, quien le mostró una ingeniería amplia, creativa y orientada a resolver problemas concretos de la sociedad. Eligió como casa de estudios la Universidad Católica por su prestigio, infraestructura, ambiente académico y flexibilidad curricular. Los ramos que más le gustaron fueron Ingeniería Hidráulica, Hidráulica Avanzada, Aguas Subterráneas, Modelación en Ingeniería Hidráulica y Análisis Estructural. Disfrutaba los cursos que conectaban fundamentos físicos, modelación y problemas reales. Los ramos que más le han servido son Ingeniería Hidráulica y Aguas Subterráneas. Se recibió como Ingeniero Civil Hidráulico y posteriormente realizó un doctorado en la Universidad de Nevada, en Reno EEUU.

En su formación académica influyeron mucho Bonifacio Fernández, Eduardo Varas y José Francisco Muñoz, quienes le transmitieron rigurosidad técnica, mirada sistémica y conexión con problemas reales. También fue fundamental Scott W. Tyler, su supervisor doctoral en Nevada, de quien aprendió ciencia, colaboración, generosidad y alto



estándar académico. Howard Wheeler y Denis Peach, con quienes trabajó en el caso Silala, fueron grandes maestros que le enseñaron mucho sobre cómo comunicar evidencia científica rigurosa en contextos de alta relevancia pública e internacional.

Sus primeros pasos como ingeniero fueron en estudios hidrológicos e hidrogeológicos en el Salar de Atacama, primero en DICTUC y luego en Geohidrología Ltda. También realizó consultorías para Crystal Lagoons durante su doctorado. Luego, en su desarrollo profesional destacan diversas actividades: estudios hidrológicos e hidrogeológicos, investigación sobre balances energéticos en pozas de evaporación y, especialmente el trabajo científico-técnico en la cuenca del río Silala. Durante cerca de ocho años colideró y participó, junto a un equipo amplio de investigadores, ingenieros y profesionales del Estado de Chile, en el diseño y ejecución de diversos estudios orientados a comprender la hidrología, hidrogeología, y el funcionamiento eco ambiental de esa cuenca. Ese trabajo tuvo una dimensión científica, técnica y pública muy relevante, porque apoyó la posición de Chile ante la Corte Internacional de Justicia. Por este último trabajo, recibió junto a Francisco Muñoz Pardo el “Premio Al Ingeniero por Acciones Distinguidas” otorgado el año 2025 por el Instituto de Ingenieros de Chile.

También desarrolló, junto a su equipo, Turbu-vap, un instrumento chileno para medir evaporación a escalas entre 200 m² y 1 km², con énfasis en aplicaciones para la minería. El instrumento emplea principios de turbulencia atmosférica para determinar tasas de evaporación, y así poder gestionar el recurso hídrico en las aplicaciones antes mencionadas.

Considera que su aporte principal a la ingeniería ha sido integrar ciencia, medición avanzada, modelación y aplicación práctica en problemas hídricos complejos, especialmente en ambientes áridos y de alta montaña. También ha contribuido a vincular la investigación con necesidades públicas y productivas, y a formar estudiantes, investigadores y profesionales jóvenes con rigurosidad técnica, criterio e integridad.

Una anécdota que recuerda con mucho cariño ocurrió cuando fue a presentar una tecnología de medición en la que estaban trabajando para una consultora especializada en temas hídricos y ambientales. Esas capacidades las habían desarrollado gracias al trabajo con un colaborador holandés, muy reconocido internacionalmente. Un par de meses después de la reunión con la consultora conversó con su colega holandés y este le contó que la consultora lo había contactado directamente para que fuera él quien implementara la tecnología en Chile. El colega les respondió

que no necesitaban traerlo a él, porque en Chile, Francisco Suárez trabajaba en estos temas y podía hacerlo mejor estando en el país. Esta situación lo marcó mucho, porque venía de alguien a quien admira profundamente y también le hizo tomar conciencia de que en Chile se podían desarrollar capacidades de frontera, sin depender siempre que las soluciones vinieran desde afuera.

Ha tenido vínculos relevantes con ingenieros senior como Bonifacio Fernández, José Francisco Muñoz, Ximena Vargas, Jorge Gironás y Sebastián Vicuña. También valora la relación de trabajo que ha tenido con numerosos ingenieros jóvenes. Además, ha trabajado con investigadores internacionales y con profesionales del Estado en temas de alta relevancia pública. Considera que ha aprendido mucho tanto de estos ingenieros jóvenes, como de los ingenieros más senior con los que ha interactuado. Asimismo, ha trabajado con profesionales de distintas disciplinas, como geólogos, micrometeorólogos, biólogos, arqueólogos, arquitectos, especialistas en ciencias atmosféricas y antropólogos, destacando particularmente sus aportes con la geología y la micrometeorología.

Señala que uno de sus principales desafíos ha sido equilibrar vida personal y profesional. El apoyo de su familia ha sido fundamental, y ha aprendido que una carrera no se construye solo desde el esfuerzo individual, sino también desde las redes que sostienen a una persona.

La ingeniería le ha entregado una forma estructurada de pensar: formular problemas, medir procesos, identificar variables, construir modelos y evaluar incertidumbre. Esa base le ha permitido dialogar con otras disciplinas y aportar una mirada cuantitativa y aplicada a sistemas naturales complejos. En docencia considera que ha aportado, intentando mostrar que la ingeniería no se trata solo de ecuaciones, sino de una forma rigurosa de enfrentar problemas relevantes para la sociedad. En los cursos de hidráulica y aguas subterráneas conecta fundamentos con agua, minería, sequía, cambio climático y medioambiente. Eso permite mostrar a los estudiantes que los conceptos que aprenden en clases no son abstractos, sino herramientas para entender y transformar el mundo.

Su aporte a las organizaciones en las que ha estado ha sido promover colaboración, confianza, rigurosidad y respeto por las capacidades de otros. Ha buscado formar equipos, no solo ejecutar proyectos, y construir puentes

entre academia, consultoría, industria, Estado, estudiantes y otras disciplinas

Le consultamos cómo se definiría en una palabra y nos dice como un “integrador”, palabra que considera resume bastante bien su trayectoria, porque su trabajo ha consistido en conectar cosas que a veces aparecen separadas: teoría y práctica, investigación y aplicación, ingeniería y otras disciplinas, mediciones de terreno y modelación, academia y problemas reales del país. También ha intentado integrar personas, formando equipos con estudiantes, profesionales jóvenes, investigadores y colaboradores de distintas áreas.

Más allá del trabajo, sus experiencias más memorables están asociadas a relaciones humanas: familia, amigos, estudiantes y equipos. Tener dos hijas ha cambiado su forma de mirar la vida y le ha hecho valorar los espacios simples y la formación de nuevas generaciones. Considera que uno de sus talentos es ayudar a que las personas trabajen hacia un propósito común y descubran su propio potencial. Lo ha desarrollado aprendiendo a escuchar, confiar, delegar, acompañar y transmitir exigencia con cercanía.

Una filosofía que lo guía es hacer cosas que tengan sentido, no solo que parezcan exitosas desde fuera. Valora la excelencia con propósito, la colaboración, la responsabilidad ética y la capacidad de “pensar despacio”: detenerse, revisar supuestos, reconocer sesgos y tomar decisiones con criterio. También considera que la vida profesional se construye con otros. La imagen del logro puramente individual es totalmente incompleta e incluso utópica.

También le gustaría compartir que la rigurosidad técnica debe ir siempre acompañada de responsabilidad ética. En ingeniería, las decisiones no son neutras: afectan territorios, personas, ecosistemas e instituciones. Por eso, no basta con saber calcular o modelar bien; también hay que preguntarse para qué se está haciendo ese trabajo, a quién sirve y qué consecuencias puede tener. Sostiene que se debe mantener la curiosidad y la humildad para seguir siempre aprendiendo, y que la trayectoria profesional no es una línea recta, que uno va cambiando, descubriendo intereses, equivocándose, corrigiendo y abriendo caminos

nuevos. Sus valores centrales son integridad, responsabilidad, respeto, rigurosidad y compromiso con el trabajo bien hecho. Desde la docencia y la gestión universitaria ha intentado transmitir que la integridad no es complementaria, sino que es parte esencial de la identidad profesional de un ingeniero.

Le preguntamos qué le hubiese gustado hacer de manera distinta, y nos dice que haber equilibrado antes la vida personal y profesional, y aprender más temprano a delegar. Con el tiempo comprendió que formar a otros implica darles espacio para crecer, equivocarse, decidir y liderar.

Quisiera ser recordado como alguien que puso la ingeniería y la ciencia al servicio de problemas importantes para la sociedad, especialmente en agua y medioambiente, y que ayudó a formar personas rigurosas, íntegras y conscientes de la responsabilidad pública de la ingeniería. Que quienes trabajaron con él sientan que aprendieron a mirar los problemas con más profundidad, con más rigurosidad y también con más sentido humano.

Con respecto a su visión de la ingeniería, considera que ha habido una evolución tecnológica enorme: sensores, monitoreo remoto, modelos numéricos, imágenes satelitales, datos masivos e inteligencia artificial. Pero cree que lo esencial no ha cambiado: una buena ingeniería requiere fundamentos sólidos, criterio profesional e integridad. Hacia el futuro, ve a la ingeniería con un potencial enorme. Está convencido que las nuevas tecnologías, especialmente la inteligencia artificial, pueden ampliar la capacidad de análisis, diseño y toma de decisiones, pero que se debe velar siempre que su uso sea con criterio ético y al servicio de las personas, las comunidades, el medioambiente y la sociedad.

A las nuevas generaciones les diría que se formen muy bien en los fundamentos, que valoren la experiencia de los profesionales senior y usen la tecnología como apoyo y no como reemplazo del pensamiento propio. Que la ingeniería exige rapidez cuando corresponde, pero sobre todo pausa, análisis crítico, responsabilidad, y que esté al servicio de las personas y de la sociedad, siendo una manera concreta de contribuir al bien común.





**ANALES
DEL INSTITUTO
DE INGENIEROS DE CHILE**

Vol. 138, N° 2 - AGOSTO 2026

ISSN 0716-2340

“Uno de los pensamientos que más ha preocupado al Instituto de Ingenieros, desde su fundación, ha sido la creación de un organo que lo ponga en relación con la sociedad, a cuyos intereses trata de servir, i cada día que pasa nos hace ver más i más la necesidad que la corporación tiene de consignar en un periódico las ideas que surjan i que se elaboren en su seno, referentes a los multiplicados i variadísimos ramos de la ingeniería.

En esta virtud, no porque nuestro periódico sea especialmente el órgano del Instituto, dejará de serlo también del país en general, i léjos de esto, creemos obrar en consonancia con nuestro propósito, ofreciendo sus columnas a las personas ilustradas i de buena voluntad que nos honren con el precioso continjente de ideas útiles”.

(Anales del Instituto de Ingenieros. Tomo 1, Año 1, 1888).

Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 138, N° 2, agosto de 2026

ISSN 0716-2340

Contenido

ESTIMACIÓN DE LA SOCAVACIÓN ALREDEDOR DE CEPAS DE PUENTE EN ESCURRIMIENTOS SUPERCRÍTICOS.

Pág. 39

Oscar Link L., Vicente Saenger D., Scarlett Moraga

LA TECNOLOGIA DE VERMIFILTRACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS EN PEQUEÑAS COMUNIDADES.

Pág. 50

Laura Dossow, Víctor Gutiérrez, Felipe Barriga, Gladys Vidal

TEMPORAL DEL 15 AL 20 DE JULIO DE 2026 EN CHILE: DURACIÓN CRÍTICA, PERÍODOS DE RETORNO E IMPACTOS HIDROMETEOROLÓGICOS.

Pág. 70

Cristóbal Soto-Escobar, Mauricio Zambrano-Bigiarini

VALDIVIA 1960, Mw 9.5 A TESTIMONY OF MY OWN.

Pág. 85

Raúl Labbé

Editora

Ximena Vargas Mesa, Instituto de Ingenieros de Chile

Comité Editorial

Ximena Vargas M., Editora y Académica del Departamento de Ingeniería Civil de la FCFM de la Universidad de Chile.

Mario Lafontaine, Presidente de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA).

Jorge Gironás L., Presidente de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID).

Aldo Tamburrino T., Académico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Los Anales del Instituto estarán dedicados a la presentación de trabajos técnicos en el área de la Ingeniería y ramas afines, para lo cual acepta colaboraciones tanto del país como del extranjero.

Se publicarán aquellos artículos que, a juicio del Comité Editorial, contribuyan al desarrollo o difusión del conocimiento, de técnicas y métodos o de aplicaciones de importancia en la Ingeniería. Artículos de índole expositiva que unifiquen resultados dispersos o que den una visión integrada de un problema o de una puesta al día de una técnica o área, serán bienvenidos. Del mismo modo, ensayos sobre temas de interés para la profesión como perspectivas educacionales, históricas o similares.

ESTIMACIÓN DE LA SOCAVACIÓN ALREDEDOR DE CEPAS DE PUENTE EN ESCURRIMIENTOS SUPERCRÍTICOS

Oscar Link L.¹, Vicente Saenger D.², Scarlett Moraga³

RESUMEN

La socavación alrededor de puentes es una de las causas de colapso de puentes más importantes a nivel mundial. Ha sido estudiada ampliamente para variadas condiciones que representan bien el caso de ríos de llanura, caracterizados por escurrimientos subcríticos ($Fr < 1$). Sin embargo, casi no existen estudios sobre socavación en escurrimientos supercríticos ($Fr > 1$). Las guías de diseño no diferencian entre los regímenes subcrítico, crítico y supercrítico para estimar la socavación local alrededor de cepas. En muchos casos, se recomienda la aplicación de fórmulas de socavación que han sido desarrolladas sobre la base de mediciones de socavación en escurrimiento subcrítico. En este artículo, se presenta un análisis de la performance de todas las ecuaciones de socavación existentes para estimar la socavación medida en 91 ensayos con escurrimiento supercrítico bien documentados en la literatura especializada. Se obtiene un ranking de las ecuaciones existentes de socavación y se entregan recomendaciones para su aplicación en la práctica.

Palabras Clave: socavación, escurrimiento supercrítico, puentes, recomendaciones

ABSTRACT

Scour around bridges is one of the leading causes of bridge collapse worldwide. It has been extensively studied under various conditions representative of lowland rivers, which are characterized by subcritical flow ($Fr < 1$). However, there are virtually no studies on scour in supercritical flow ($Fr > 1$). Design guidelines do not distinguish between subcritical, critical, and supercritical flow regimes when estimating local scour around bridge piers. In many cases, the use of scour formulas developed based on measurements taken under subcritical flow conditions is recommended. This article presents an analysis of the performance of all existing scour equations in estimating scour measured in 91 well-documented experiments involving supercritical flow. A ranking of the existing scour equations is established, and recommendations for their practical application are provided.

Keywords: scour, supercritical flow, bridges, recommendations

¹ Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: olink@udec.cl

² Estudiante de Doctorado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: vsenger2017@udec.cl

³ Estudiante de Magíster en Cs. de Ingeniería c/m en Ing. Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: smoraga2018@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

La socavación alrededor de puentes es una de las causas de colapso de puentes más importantes a nivel mundial. En Chile, probablemente sea junto con los terremotos la primera causa de colapso de puentes.

La socavación local ha sido estudiada ampliamente para variadas condiciones que representan bien el caso de ríos de llanura, caracterizados por escurrimientos subcríticos ($Fr < 1$). Los primeros trabajos se remontan a inicios del siglo XX, con investigaciones de campo realizadas por el ingeniero chileno Domingo Santa María (Santa María 1909, Link & Dey, 2025). Desde ese entonces, se han propuesto más de 40 ecuaciones para estimar la profundidad máxima de socavación local alrededor de una cepa de puente, cuyos resultados pueden variar enormemente para las mismas condiciones, incluso superando un orden de magnitud (Baranwal & Das, 2024).

En Chile, el Manual de Carreteras (MOP, 2002) recomienda aplicar tres ecuaciones para estimar la socavación local: la ecuación propuesta por Breusers et al. (1977), la ecuación de la Colorado State University, CSU propuesta originalmente por Richardson et al. (1975) y la envolvente de datos experimentales, EDE desarrollada por diversos autores en la Universidad de Chile. La selección de una u otra ecuación depende del número de Froude del escurrimiento. Para $Fr < 0,5$ se recomienda la ecuación de Breusers et al. (1977), para $0,5 \leq Fr \leq 0,7$ la ecuación CSU (Richardson et al., 1975) y para $Fr > 0,7$ se recomienda utilizar la EDE.

Una de las ecuaciones ampliamente utilizadas en el mundo, que ha mostrado entregar estimaciones precisas de la socavación local es la propuesta por Sheppard et al. (2014) y que ha sido adoptada en métodos para calcular la evolución temporal de la socavación como los propuestos por Link et al. (2017) y Pizarro et al. (2020).

El escurrimiento supercrítico alrededor de un obstáculo presenta elementos diferentes a los

observados en escurrimientos subcríticos. Riviere et al. (2017) propusieron la existencia de dos patrones de flujo, que ocurren dependiendo del número de Froude y del ancho relativo de la cepa respecto a la profundidad de escurrimiento. Los denominaron *detached hydraulic jump* y *wall jet like bow wave*. Martínez et al. (2025) caracterizaron el flujo en ambos casos mediante simulaciones numéricas que resolvieron las ecuaciones de Reynolds con un cierre de turbulencia k-w y un modelo de superficie libre Volume of Fluid, VoF.

En la literatura especializada prácticamente no existen estudios específicos sobre socavación en escurrimientos supercríticos (Link et al., 2019). Jain y Fisher (1980) realizaron ensayos de socavación con velocidades de escurrimiento altas alrededor de cepas hincadas en arena y propusieron una ecuación para estimar la socavación en función de un número de Froude modificado. En dicha fórmula, la socavación aumenta continuamente con el número de Froude. Roux et al. (2022) realizaron ensayos de socavación con transporte generalizado de sedimento para los dos patrones de flujo documentados por Riviere et al. (2017) usando mezclas bien graduadas de arena con grava. Encontraron que la socavación no fue mayor a la socavación calculada con las ecuaciones de Jain y Fisher (1980), CSU (Richardson et al., 1975), Sheppard et al. (2014), ni la ecuación 65-1 ampliamente utilizada en China (Qi et al., 2016).

En este artículo, se presenta un análisis del desempeño de todas las ecuaciones de socavación existentes para estimar la socavación medida en 91 ensayos con escurrimientos supercríticos bien documentados en la literatura especializada. A continuación, se describen las ecuaciones y datos existentes y los indicadores para evaluar el desempeño de las ecuaciones. Finalmente, se presenta una evaluación de las ecuaciones de socavación existentes y se entregan recomendaciones para su aplicación en la práctica.

2. ECUACIONES PARA ESTIMAR LA SOCAVACIÓN LOCAL

La Tabla 1 muestra el autor y las variables independientes de cada ecuación de socavación local que se evaluó en el presente

estudio. En los casos en que las ecuaciones de socavación informan un rango de las variables dependientes en que pueden ser aplicadas, su aplicación se restringió en concordancia. En los demás casos, las ecuaciones fueron aplicadas a los casos medidos.

Tabla 1. Autor y las variables independientes en las ecuaciones de socavación local

Referencia	Variables independientes	Referencia	Variables independientes
Santa María (1909)	$f = (H, b, V_{crs})$	Jain & Fischer (1980)	$f = (H, b, F_r, d_{50}, d, s, \nu)$
Inglis (1949)	$f = (H, b, F_r)$	Jain (1981)	$f = (H, b, V_{crs}, g)$
Inglis – Poona I (Inglis, 1949)	$f = (H, b, V)$	Zanke (1982)	$f = (b, V_{crs}, d_{50})$
Inglis – Poona II (Inglis, 1949)	$f = (H, b, V)$	Melville & Sutherland (1988)	$f = (H, b, V, d_{50}, \sigma, forma\ pila, ^\circ)$
Laursen and Toch (1956)	$f = (H, b)$	Johnson & Ayyub (1992)	$f = (H, b, F_r, \sigma)$
Laursen (1960)	$f = (H, b)$	Kothyari et al. (1992b)	$f = (H, b, d_{50})$
Blench (1962)	$f = (H, b)$	Gao et al. (1993)	$f = (H, b, V, d_{50}, V_{crs})$
Blench – Inglis I (1969)	$f = (H, b, V, d_{50})$	Melville (1997)	$f = (H, b, V, d_{50}, forma\ pila)$
Blench – Inglis II (Blench, 1969)	$f = (H, b)$	Yanmaz (2001)	$f = (H, b, V, g)$
Laursen (1962)	$f = (H, b)$	Sheppard & Miller (2006)	$f = (H, b, V, V_{crs}, d_{50}, forma\ pila)$
Laursen (1963)	$f = (H, b)$	Lee & Sturm (2009)	$f = (b, d_{50})$
Larras (1963)	$f = (b)$	Guo (2012)	$f = (H, b, V, d_{50}, \sigma, \rho)$
Breusers (1965)	$f = (b)$	Sheppard et al. (2014)	$f = (H, b, V, V_{crs}, d_{50}, pier\ shape, g)$
Shen (1966)	$f = (b, F_r)$	Ettmer et al. (2015)	$f = (b, V, V_{crs})$
Arunachalam (1967)	$f = (H, b)$	Equation 65-1. Qi et al. (2016)	$f = (H, b, V, d_{50}, forma\ pila, ^\circ)$
Coleman (1971)	$f = (H, b, V, g)$	Equation 65-2. Qi et al. (2016)	$f = (H, b, V, d_{50}, forma\ pila, ^\circ, g)$
Hancu (1971)	$f = (H, b, d_{50})$	Sharafi et al. (2016)	$f = (H, b, V, d_{50}, \sigma, g)$
Neill (1973)	$f = (b, forma\ pila)$	Pandey et al. (2018)	$f = (H, b, V, d_{50}, s, g)$
Basak et al. (1975)	$f = (b)$	Franzetti et al. (2022)	$f = (H, b, V, V_{crs})$
CSU (Richardson et al. 1975)	$f = (H, b, F_r)$	Nandi & Das (2023)	$f = (H, b, V, V_{crs})$
Breusers et al. (1977)	$f = (H, b, V, d_{50}, g, s)$	MdeC (MOP, 2002)	$f = (H, b, F_r, forma\ pila, ^\circ)$

donde b es el diámetro de la cepa (m), H es la profundidad de escurrimiento (m), V es la velocidad de escurrimiento (m/s), y d_{50} es el tamaño de al menos el 50% del sedimento (mm), ν es la viscosidad cinemática del agua (m^2/s), σ es la desviación estándar geométrica del tamaño de los sedimentos, V_{crs} es la velocidad crítica de Hjulström, F_r es el número de Froude (-), g es la aceleración de gravedad ($= 9,81\ m/s^2$) y s es la gravedad específica.

3. MEDICIONES DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN LOCAL

La Tabla 2 muestra el rango de las variables independientes para cada set de datos disponible en la literatura con escurrimiento supercrítico.

Tabla 2. Rango de las variables independientes para cada set de datos

Reference	Nº de datos	V (m/s)	H (m)	d_{50} (mm)	σ	V_{crs} (m/s)	b (m)	Z_{eq} (m)	F_r	V/V_{crs}	H/b	b/d_{50}	Z_{eq}/b
Shen et al. (1966)	1	1,08 - 1,08	0,12 - 0,12	0,24 - 0,24	1,0 - 1,0	0,20 - 0,20	0,15 - 0,15	0,16 - 0,16	1,02 - 1,02	5,40 - 5,40	0,77 - 0,77	625,0 - 625,0	1,06 - 1,06
White (1975)	1	1,2 - 1,2	0,1 - 0,1	0,9 - 0,9	1,0 - 1,0	0,25 - 0,25	0,08 - 0,08	0,1 - 0,1	1,21 - 1,21	4,80 - 4,80	1,25 - 1,25	88,89 - 88,89	1,25 - 1,25
Jain & Fischer (1979)	1	1,2 - 1,2	0,1 - 0,1	0,25 - 0,25	1,0 - 1,0	0,20 - 0,20	0,1 - 0,1	0,18 - 0,18	1,2 - 1,2	5,00 - 6,00	1,0 - 1,0	406,4 - 406,4	1,82 - 1,82
Jain & Fischer (1980)	7	1,2 - 1,5	0,1 - 0,1	0,25 - 2,5	1,25 - 1,34	0,20 - 0,40	0,05 - 0,1	0,11 - 0,18	1,2 - 1,5	6,00 - 3,75	1,0 - 2,01	20,32 - 406,4	1,56 - 3,09
Chee (1982)	17	1,05 - 1,4	0,1 - 0,12	0,24 - 1,4	1,22 - 1,3	0,20 - 0,30	0,05 - 0,1	0,08 - 0,14	1,03 - 1,41	5,25 - 4,66	0,98 - 2,28	36,29 - 423,33	1,15 - 1,88
Zanke (1982)	1	2,2 - 2,2	0,42 - 0,42	0,24 - 0,24	1,45 - 1,45	0,20 - 0,20	0,09 - 0,09	0,27 - 0,27	1,08 - 1,08	11,00 - 11,00	4,67 - 4,67	375,0 - 375,0	3,0 - 3,0
Chiew (1984)	29	1,29 - 1,84	0,17 - 0,34	0,24 - 1,45	1,18 - 5,5	0,20 - 0,30	0,03 - 0,05	0,04 - 0,1	1,0 - 1,41	6,45 - 6,13	3,35 - 7,56	21,9 - 166,67	1,2 - 2,46
Melville (1984)	18	1,0 - 1,2	0,1 - 0,1	0,24 - 1,4	1,0 - 1,0	0,20 - 0,30	0,05 - 0,1	0,11 - 0,19	1,01 - 1,21	5,00 - 4,00	0,98 - 1,97	56,79 - 423,33	1,4 - 2,3
Kothyari et al. (1992)	1	5,13 - 5,13	2,53 - 2,53	0,72 - 0,72	1,0 - 1,0	0,22 - 0,22	4,88 - 4,88	6,02 - 6,02	1,03 - 1,03	23,32 - 23,32	0,52 - 0,52	6777,78 - 6777,78	1,23 - 1,23
Mignot et al. (2016)	1	0,63 - 0,63	0,01 - 0,01	1,5 - 1,5	1,06 - 1,06	0,30 - 0,30	0,1 - 0,1	0,09 - 0,09	2,08 - 2,08	2,10 - 2,10	0,1 - 0,1	65,33 - 65,33	0,92 - 0,92
Roux et al. (2022)	6	1,06 - 1,88	0,05 - 0,12	7,0 - 7,0	4,5 - 4,5	0,80 - 0,80	0,06 - 0,14	0,08 - 0,17	1,54 - 1,8	1,33 - 2,35	0,48 - 1,78	8,57 - 20,0	0,79 - 1,47
Bascuñán (2024)	8	0,66 - 0,78	0,02 - 0,02	7,51 - 7,51	1,33 - 1,33	0,90 - 0,90	0,04 - 0,04	0,02 - 0,02	1,58 - 2,03	0,73 - 0,86	0,38 - 0,45	5,33 - 5,33	0,45 - 0,59
Total de datos	91	0,63 - 5,13	0,01 - 2,53	0,24 - 7,51	1,0 - 5,5	0,20 - 0,90	0,03 - 4,88	0,02 - 6,02	1,0 - 2,08	0,73 - 23,32	0,1 - 7,56	5,33 - 6777,78	0,45 - 3,09

4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS ECUACIONES

El desempeño de las ecuaciones de socavación se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), el error absoluto medio (MAE), el error cuadrático medio (RMSE) y el error porcentual medio (MAPE). Las cuatro métricas se definen de la siguiente forma:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - C_i|}{O_i} \cdot 100\% \quad (4)$$

donde C_i y O_i corresponden a la profundidad normalizada de socavación calculada y observada, $\bar{O}$ es la profundidad normalizada de socavación promedio y n es el número de observaciones.

5. RESULTADOS

La Tabla 3 muestra el desempeño de las distintas ecuaciones de socavación al aplicarlas al set de 91 datos.

Las ecuaciones que predicen la mayor cantidad de observaciones con diferencias menores a 10% son las de Laursen y Toch (1956), Basak et al. (1975), Breusers et al. (1977), Sheppard y Miller (2006) y Sheppard et al. (2014). Sin embargo, la cantidad de observaciones bien predichas

varía entre 31 y 41.8% del total, lo que se considera poco. En cambio, hay varias ecuaciones que producen estimaciones conservadoras: las tres ecuaciones propuestas por Inglis (1949), la ecuación de Blench-Inglis I (Blench, 1969), Shen (1966), CSU Equation (Richardson et al., 1975), Jain y Fischer (1980), Melville (1997), Ettmer et al. (2015), Ecuación 65-1 (Qi et al., 2016), Nandi y Das (2023) y MdeC (MOP, 2002). No obstante, de estas últimas ecuaciones, las ecuaciones de Inglis (1949), de Blench - Inglis I y II (Blench, 1969) y de Shen (1966) se descartan por tener errores demasiado grandes. Por su parte, las ecuaciones que tienen los mejores coeficientes de determinación y por lo tanto consideran las variables adecuadas de una forma también adecuada son las ecuaciones de Laursen & Toch (1956), Breusers et al. (1977), Melville & Sutherland (1988), Sheppard & Miller (2006) y Sheppard et al. (2014). En base a las métricas presentadas, las mejores fórmulas para predecir la socavación alrededor de cepas en escurrimientos supercríticos son las de Laursen & Toch (1956), Breusers et al. (1977), Sheppard & Miller (2006) y Sheppard et al. (2014). Estas cuatro ecuaciones tienen un buen porcentaje de las predicciones con errores menores al 10% y las demás en el lado conservador, presentan errores comparativamente bajos y un coeficiente de determinación relativamente alto. La Figura 1 muestra la profundidad normalizada de socavación medida y calculada por estas cuatro ecuaciones.

Tabla 3. Desempeño de las ecuaciones de socavación local

Ecuación	R ²	MAE (m)	RMSE (m)	MAPE (%)	> +10%	±10%	< -10%
Santa María (1909)	-16,31	1,53	2,25	93,35	37,4	7,7	54,9
Inglis (1949)	-232,11	6,7	8,26	418,92	98,9	1,1	0
Inglis – Poona I (Inglis, 1949)	-25,86	2,21	2,8	144,76	97,8	1,1	1,1
Inglis – Poona II (Inglis, 1949)	-1003,27	15,57	17,15	1119,9	98,9	1,1	0
Laursen y Toch (1956)	0,4	0,31	0,42	24,8	30,8	41,8	27,5
Laursen (1960)	-0,56	0,5	0,68	33,72	56	22	22
Blench – Inglis I (Blench, 1969)	-36,74	3,22	3,32	250,24	97,8	2,2	0
Blench – Inglis II (Blench, 1969)	-8,49	1,57	1,67	97,97	0	1,1	98,9
Blench (1962)	-1,35	0,72	0,83	41,02	1,1	6,6	92,3
Laursen (1962)	0,05	0,4	0,53	26,15	29,7	26,4	44
Laursen (1963)	0,05	0,4	0,53	26,15	30,8	27,5	41,8
Larras (1963)	-1,01	0,6	0,77	62,24	78	16,5	5,5
Breusers (1965)	-5,44	1,26	1,37	75,07	1,1	0	98,9
Shen (1966)	-1130,05	16,08	18,2	1474,41	100	0	0
Arunachalam (1967)	-2,98	0,94	1,08	61,53	12,1	3,3	84,6
Coleman (1971)	-0,13	0,43	0,58	39,73	34,1	25,3	40,7
Hancu (1971)	-0,8	0,55	0,73	53,1	34,1	19,8	46,2
Neill (1973)	-1,23	0,69	0,81	44,37	11	3,3	85,7
Basak et al. (1975)	-0,36	0,42	0,63	45,76	44	40,7	15,4
CSU Equation (Richardson et al., 1975)	-4,41	1,1	1,26	86,19	95,6	3,3	1,1
Breusers et al. (1977)	0,56	0,27	0,36	20,2	41,8	38,5	19,8
Jain & Fischer (1980)	-5,41	0,52	0,61	34,65	84,2	15,8	0
Jain (1981)	-0,16	0,43	0,58	42,22	42,9	26,4	30,8
Zanke (1982)	-2,06	0,76	0,98	78,63	32,3	23,1	44,6
Melville y Sutherland (1988)	0,37	0,37	0,43	29,14	56	23,1	20,9
Johnson & Ayyub (1992)	-0,51	0,52	0,66	53,1	57,1	18,7	24,2
Kothyari et al. (1992b)	-0,47	0,54	0,66	31,53	1,1	14,3	84,6
Gao et al. (1993)	-0,55	0,52	0,67	52,01	72,5	22	5,5
Melville (1997)	-0,15	0,52	0,58	37,81	82,4	13,2	4,4
Yanmaz (2001)	-1,37	0,66	0,83	51,48	72,5	19,8	7,7
Sheppard & Miller (2006)	0,46	0,3	0,4	21,06	52,7	37,4	9,9
Lee & Sturm (2009)	-1,83	0,6	0,75	40,23	54,2	21,7	24,1
Guo (2012)	-0,01	0,44	0,54	28,37	14,3	19,8	65,9
Sheppard et al. (2014)	0,43	0,33	0,41	26,12	57,1	33	9,9
Ettmer et al. (2015)	-2,52	0,96	1,02	81,19	93,3	5,6	1,1
Ecuación 65-1, Qi et al. (2016)	-10,13	1,6	1,81	104,48	97,8	2,2	0
Ecuación 65-2, Qi et al. (2016)	0,07	0,38	0,52	23,22	36,3	30,8	33

Tabla 3. Desempeño de las ecuaciones de socavación local (continuación)

Ecuación	R ²	MAE (m)	RMSE (m)	MAPE (%)	> +10%	±10%	< -10%
Sharafi et al. (2016)	-2,6	0,93	1,03	56,36	0	0	100
Pandey et al. (2018)	-0,08	0,45	0,56	30,07	16,5	14,3	69,2
Franzetti et al. (2022)	-0,2	0,49	0,55	28,87	72,2	16,7	11,1
Nandi & Das (2023)	-1,07	0,69	0,78	53,68	82,4	7,7	9,9
MdeC	-0,61	0,62	0,69	52,84	85,7	11	3,3

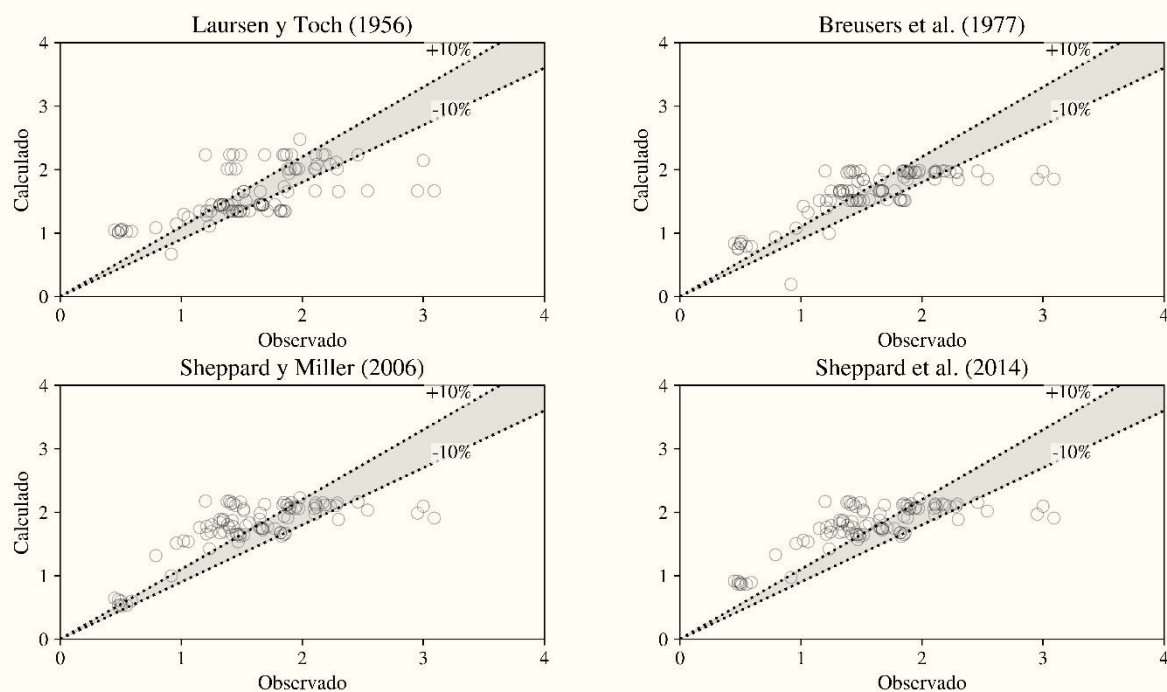


Figura 1. Profundidad de socavación normalizada, medida y calculada con las ecuaciones propuestas por Laursen y Toch (1956), Breusers et al. (1977), Sheppard y Miller (2006) y Sheppard et al. (2014) en casos con escurrimiento supercrítico.

Se observa que las ecuaciones limitan el valor máximo calculado de la socavación normalizada a cerca de 2, lo que no es realista, ya que existen registros de profundidades normalizadas en torno a 3. En estos casos, las ecuaciones subestiman la socavación. Las ecuaciones de Sheppard y Miller (2006) y de Sheppard et al. (2014) son conservadores en la mayoría de los casos y tienen una precisión adecuada.

Dado que la ecuación de Sheppard et al. (2014) corresponde a una versión mejorada de Sheppard y Miller (2006), se recomienda el uso de la ecuación de Sheppard et al. (2014) para estimar la socavación alrededor de cepas de puente en escurrimientos supercríticos.

6. CONCLUSIÓN

La socavación local alrededor de cepas de puente en escurrimientos supercríticos ha sido poco estudiada. Se analizó el desempeño de las ecuaciones existentes en 91 casos medidos que se encuentran bien documentados en la literatura especializada.

Las ecuaciones propuestas por Laursen y Toch (1956), Breusers et al. (1977), Sheppard y Miller (2006) y Sheppard et al. (2014) tuvieron los mejores desempeños. Se recomienda el uso de la ecuación de Sheppard et al. (2014) para estimar la socavación alrededor de cepas de puente en escurrimientos supercríticos.

En el futuro, se debería ampliar el rango de los parámetros que influyen en la socavación local, particularmente el número de Froude y el tamaño de los sedimentos, a fin de verificar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por la ANID a través del proyecto Fondecyt Regular 1221341: Local Scour at Bridge Piers in Supercritical Flows y la beca Doctorado Nacional/2025–21252243.

REFERENCIAS

Anubhav Baranwal, Bhabani Shankar Das; Scouring around bridge pier: A comprehensive analysis of scour depth predictive equations for clear-water and live-bed scouring conditions. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 1 March 2024; 73 (3): 424–452. doi: <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.235>

Arunachalam, K., 1965, Scour around bridge piers: J. of the Indian Roads Congress (No.2), August, pp. 189/210.

Arunachalam, K., 1967, Discussion to Neill (1965): Proc. Inst. Civ. Eng., London, 36, pp. 402/404.

Baranwal, A., & Das, B. S. (2024). Live-bed scour depth modelling around the bridge pier using ANN-PSO, ANFIS, MARS, and M5Tree. *Water Resources Management*, 38(12), 4555–4587.

Basak, V., Basamisli, Y., & Ergun, O. (1975). Maximum equilibrium scour depth around linear-axis square cross-section pier groups. *Devlet su Isteri Genel Mudurlugu, Ankara, Turkey*.

Bascuñán Campos, J.L. (2024). Análisis experimental de la socavación alrededor de un cilindro en escurrimiento supercrítico.

Blench, T., Bradley, J. N., Joglekar, D. V., Bauer, W. J., Tison, L. J., Chitale, S. V., ... & Romita, P. L. (1962). Discussion of “Scour at Bridge Crossings”. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127(1), 180–207.

Breusers, H. N. C. (1965). Scouring around drilling platforms. *J. Hydraul Res. IAHR, Bull.*, 19, 276.

Breusers, H. N. C., Nicollet, G., & Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of hydraulic research*, 15(3), 211–252.

Chee, R. K. W. (1982). Live-bed scour at bridge piers. *Publication of: Auckland University, New Zealand*, (290).

Chiew, Y. M. (1984). *Local scour at bridge piers* (Doctoral dissertation, ResearchSpace@Auckland).

Coleman N. L. 1971 Analyzing laboratory measurements of scour at cylindrical piers in sand beds. In: Proc. 14th Congress IAHR, International Association of Hydraulic Research. International Association for Hydraulic Research, Madrid, Spain, pp. 307–313.

Ettmer, B., Orth, F., & Link, O. (2015). Live-bed scour at bridge piers in a lightweight

polystyrene bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(9), 04015017.

Franzetti, S., Radice, A., Rebai, D., & Ballio, F. (2022). Clear water scour at circular piers: A new formula fitting laboratory data with less than 25% deviation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(10), 04022021.

Gao D., Posada G. & Nordin C. F. 1993 Pier scour equations used in the People's Republic of China-Review and summary. FHWA-SA-93076. US Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, pp. 1031–1036.

Breusers, H. N. C., Nicollet, G., & Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of hydraulic research*, 15(3), 211-252.

Kothyari, U. C., Ranga Raju, K. G., & Garde, R. J. (1992). Live-bed scour around cylindrical bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 30(5), 701-715.

Hancu, S. (1971). Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles des ponts. In *Proceedings of the 14th IAHR congress, Paris, France* (Vol. 3, No. 1, pp. 299-313).

Hydraulic Research, 50:1, 18-27, DOI: 10.1080/00221686.2011.644418

Inglis S. C. 1949 Maximum depth of scour flatheads of guide bands and groynes, pier noses, and downstream bridges-the behavior and control of rivers and canals. Indian Waterways Experimental Station, Poona, India, 327–348.

Jain, S. C. (1981). Maximum clear-water scour around circular piers. *Journal of the Hydraulics Division*, 107(5), 611-626.

Jain, S. C., & Fischer, E. E. (1979). *Scour around circular bridge piers at high Froude numbers* (No. FHWA-RD-79-104). United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration.

Jain, S. C., & Fischer, E. E. (1980). Scour around bridge piers at high flow velocities. *Journal of the Hydraulics Division*, 106(11), 1827-1842.

Johnson, P. A., & Ayyub, B. M. (1992). Assessing time-variant bridge reliability due to pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(6), 887-903.

Guo, J. (2012). Pier scour in clear water for sediment mixtures. *Journal of hydraulic research*, 50(1), 18-27.

Larras, J. (1963). Profondeurs maximales d'erosion des fonds mobiles autour des piles en riviere. *Ann. Ponts Chaussees*, 133, 411-424.

Laursen, E. M. (1960). Scour at bridge crossings. *Journal of the Hydraulics Division*, 86(2), 39-54.

Laursen, E. M. (1962). Scour at bridge crossings. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127(1), 166-180.

Laursen, E. M. (1963). An analysis of relief bridge scour. *Journal of the Hydraulics Division*, 89(3), 93-118.

Laursen, E. M., & Toch, A. (1956). *Scour around bridge piers and abutments* (Vol. 4). Ames, IA: Iowa Highway Research Board.

Lee, S. O., & Sturm, T. W. (2009). Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *Journal of hydraulic engineering*, 135(10), 793-802.

Link, O., Castillo, C., Pizarro, A., Rojas, A., Ettmer, B., Escauriaza, C., & Manfreda, S. (2017). A model of bridge pier scour during flood waves. *Journal of hydraulic research*, 55(3), 310-323.

Link, O., Henriquez, S., & Ettmer, B. (2019). Physical scale modelling of scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 57(2), 227-237.

- Link O & Dey S. (2025) "Santa María and the first bridge scour formulas". *Journal of Hydraulic Engineering* 151(1).
<https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14216>
- Martínez, B., Guerra, M., Riviere, N., Mignot, E., & Link, O. (2025). RANS simulation of supercritical open channel flows around obstacles. *Journal of Hydraulic Research*, 63(1), 1-14.
- Melville, B. W. (1984). Live-bed scour at bridge piers. *Journal of hydraulic engineering*, 110(9), 1234-1247.
- Melville, B. W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of hydraulic Engineering*, 123(2), 125-136.
- Melville, B. W., & Sutherland, A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226.
- Mignot, E., Moyne, T., Doppler, D., & Rivière, N. (2016). Clear-water scouring process in a flow in supercritical regime. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(4), 04015063.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. (2002). *Manual de carreteras. Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Nandi, B., & Das, S. (2023). Identify most promising temporal scour depth formula for circular piers proposed over last six decades. *Ocean Engineering*, 286, 115639.
- Neil, C. R. (1973). *Guide to Bridge Hydraulics*. Roads and Transportation Association of Canada.
- Pandey, M., Sharma, P. K., Ahmad, Z., & Karna, N. (2018). Maximum scour depth around bridge pier in gravel bed streams. *Natural hazards*, 91(2), 819-836.
- Pizarro, A., Manfreda, S., & Tubaldi, E. (2020). The science behind scour at bridge foundations: A review. *Water*, 12(2), 374.
- Qi, M., Li, J., & Chen, Q. (2016). Comparison of existing equations for local scour at bridge piers: parameter influence and validation. *Natural Hazards*, 82(3), 2089-2105.
- Richardson, E. V., Karaki, S., Mahmood, K., Simons, D. B., & Stevens, M. A. (1975). *Highways in the River Environment—Hydraulic and Environmental Design Considerations: Basic Course Instructor's Lesson Plans* (No. FHWA-NHI-76-N004). United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration.
- Rivière, N., Vouillat, G., Launay, G., & Mignot, E. (2017). Emerging obstacles in supercritical openchannel flows: Detached hydraulic jump versus wall-jet-like bow wave. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7), 04017011.
- Roux, S., Link, O., Riviere, N., & Mignot, E. (2022). Live-bed pier scour in supercritical open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 60(4), 675-685.
- Santa María, D. V. (1909). Determinación de las Profundidades de socavación de las aguas corrientes. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* (No. 2, pp. ág-67).
- Sharafi, H., Ebtehaj, I., Bonakdari, H., & Zaji, A. H. (2016). Design of a support vector machine with different kernel functions to predict scour depth around bridge piers. *Natural Hazards*, 84(3), 2145-2162.
- Shen, H. W., Schneider, V. R., & Karaki, S. (1966). *Mechanics of local scour: supplement, methods of reducing scour*.
- Shen, H. W., Schneider, V. R., & Karaki, S. S. (1966). *Mechanics of local scour*. US Department of Commerce, National Bureau of Standards. *Institute for Applied Technology*.

Sheppard, D. M., & Miller Jr, W. (2006). Live-bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(7), 635-642.

Sheppard, D. M., Melville, B., & Demir, H. (2014). Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 14-23.

Yanmaz M. A. 2001 Uncertainty of local scour parameters around bridge piers. *Journal Engineering and Environmental Science* 25 (4), 127–137.

White, W. R. (1975) “Scour Around Bridge Piers in Steep Streams,” Proceedings of the 16th I.A.H.R. Congress, Sao Paulo, Vol. 2, 1975, pp. 279–284.

Zanke U. 1982 Scour at piles in steady flow and under the influence of waves (“Kolke am Pfeiler in richtungskonstanter Strömung und unter Welleneinfluss,” in German). *Mitteilungen des Franzius-Instituts*, University of Hannover, Hannover, Germany.

LA TECNOLOGÍA DE VERMIFILTRACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS EN PEQUEÑAS COMUNIDADES

Laura Dossow¹, Víctor Gutiérrez¹, Felipe Barriga¹, Gladys Vidal^{1*}

RESUMEN

Los vermifiltros son una solución basada en la naturaleza utilizada como tratamiento secundario biológico para aguas servidas y efluentes industriales. Los vermifiltros se encuentran instalados a lo largo de todo el territorio nacional, aunque la mayor concentración se encuentra en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins. La degradación de la materia orgánica y nitrificación dependen de la interacción simbiótica entre lombrices y microorganismos y de los parámetros de diseño, operación y factores ambientales del vermifiltro. Esta tecnología ha demostrado ser eficaz para eliminar materia orgánica en aguas servidas con un promedio de 86,5% de eliminación de Demanda Química de Oxígeno (DQO), 90% de eliminación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), 70,5% de Nitrógeno Total (NT), 81% de eliminación de Amonio (N-NH₄⁺), 54,8% de Fosforo Total (PT), 78% de Solidos Suspendidos Totales (SST) y 99% de Coliformes Totales (CT). Un vermifiltro en comparación con tecnologías convencionales, presenta ventajas comparativas relativas con un bajo consumo energético, simplicidad de la operación del sistema y bajos costos de operación relativos. No obstante, el proceso puede generar emisiones de gases de efecto invernadero, con valores reportados entre 314–21.663 mg CO₂/m²·h, 0–1.870 mg CH₄/m²·h y 0–120 mg N₂O/m²·h. Además, se registra un impacto de eutrofización estimado en 10.984 m³/(kg P eq./kg DQO eliminado). Por otra parte, el lodo generado es equivalente a 0,08 kg SST/DQO eliminada, cuya disposición inadecuada podría generar riesgos sanitarios y deterioro del suelo.

Palabras clave: vermifiltros, aguas servidas, costos de operación, ventajas, riesgos

ABSTRACT

Vermifilters are a nature-based solution used for secondary biological treatment for wastewater and industrial effluents. They are installed throughout the country, with highest concentration found in the Libertador General Bernardo O'Higgins Region. Organic matter degradation and nitrification rely on the symbiotic interaction between earthworms and microorganisms, as well as on the vermifilter's design parameters, operational conditions and environmental factors. This technology has proven effective in removing organic matter from wastewater, achieving an average removal rate of 86.5% for Chemical Oxygen Demand (COD), 90% for Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), 70.5% for Total Nitrogen (TN), 81% for Ammonium (N-NH₄⁺), 54.8% for Total Phosphorus (TP), 78% for Total Suspended Solids (TSS), and 99% for Total Coliforms (TC). Compared to conventional technologies, vermifilters offer relative advantages with low energy consumption, operational simplicity, and relatively low operating costs. However, the vermifiltration process can generate greenhouse gas emissions, with reported values ranging from 314–21,663 mg CO₂/m²·h, 0–1,870 mg CH₄/m²·h, and 0–120 mg N₂O/m²·h. Furthermore, an estimated eutrophication impact of 10,984 m³/(kg P eq./kg COD removed) has been recorded. Additionally, the sludge generated in the vermifilter is equivalent to 0.08 kg TSS/COD removed; improper disposal of this sludge could pose health risks and lead to soil degradation.

Keywords: vermifilters, wastewater, operating costs, advantages, risks

¹ Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA-UDEC), Departamento de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), Centro FONDAP de ANID. Concepción

1. Introducción

En un contexto de escasez hídrica y cambio climático, el tratamiento de aguas servidas representa un desafío por los riesgos asociados en la salud humana y en los ecosistemas. La presencia de productos químicos, metales pesados y patógenos en las aguas servidas favorece la transmisión de enfermedades. También, estos componentes deterioran las condiciones en los cuerpos de agua receptores de la descarga de los contaminantes (Thorn and Kerekes, 2001, Kesari *et al.*, 2021). Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de 2025, durante el periodo de 2000-2021 la extracción total de agua dulce incrementó un 0,7% anual. El aumento de la demanda de agua ha provocado que un cuarto de la población mundial enfrente un estrés hídrico. Se estima que un 80% del agua potable utilizada por usuarios domésticos se convierte en aguas servidas. Este aumento de la demanda entonces ha incrementado a la vez la presión sobre los tratamientos de aguas servidas. Además, la OMS (2021) indicó que un 44% de las aguas servidas se descargan sin un tratamiento seguro. Esto ocurre por la falta de infraestructura y educación para su correcto funcionamiento. En Chile esta situación se evidencia en que un 83% de las zonas rurales carecen de alcantarillado adecuado para el tratamiento de aguas servidas (SISS, 2022).

En este escenario, el tratamiento de aguas servidas por medio de tecnologías basadas en la naturaleza ha adquirido importancia en los últimos años. La ventaja de estas tecnologías es que logran su objetivo a un costo estructural y energético en un 40 a 70% menos que una tecnología convencional (Castellar *et al.*, 2022). Entre estas tecnologías se encuentra el vermifiltro que se han implementado principalmente en zonas rurales y también en la industria. Sin embargo, aún representa menos de 1% de las tecnologías utilizadas en Chile (SISS, 2022).

2. Vermifiltros en Chile

Los vermifiltros fueron introducidos en Chile bajo el nombre de “Sistema Tohá” debido al desarrollo realizado por el Dr. José Tohá Castella, en el laboratorio de Biofísica de la

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Esta tecnología se encuentra patentada por la Fundación para la Transferencia Tecnológica, UNTEC (Patente N° 40.754) desde mediados de la última década del siglo XX.

Un hito importante de esta tecnología en el país fue la construcción de la primera planta de tratamiento en base a un vermifiltro instalada en la ciudad de Melipilla en el año 1994, la cual atendió a una población de 1.000 personas. En la actualidad estos sistemas se encuentran funcionando en Chile y además en países como Argentina, Bolivia, Ecuador, India, entre otros (Sistema Tohá, 2024).

Los vermifiltros se encuentran instalados a lo largo de todo el territorio nacional. La Figura 1 muestra la densidad de operación de vermifiltros por zonas del país. La mayor concentración de esta tecnología está en la macrozona centro, específicamente en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, con 46 vermifiltros instalados. En esta región, que cuenta con un 25,6% de población rural, se encuentran instalados vermifiltros en el sector productivo y también para el tratamiento de aguas servidas. La Figura 2 muestra la distribución del uso de vermifiltros, tanto en el tratamiento de aguas servidas domésticas, como en actividades productivas. De este modo el 80% del total está instalado en zonas rurales. Su uso es destacado en las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins, la Araucanía y Maule, con 41, 13 y 12 vermifiltros operando, respectivamente. El 20% de los vermifiltros restantes en el país está dividido en múltiples rubros del sector industrial, liderando su uso de aplicación industrial la Región Metropolitana, del Libertador General Bernardo O'Higgins y Valparaíso con 8, 5 y 4 en cada región, respectivamente. Desde la región de Arica hasta Coquimbo están instalados solamente vermifiltros para tratamiento de aguas servidas; mientras que la región de Aysén es la única región que posee solo vermifiltros industriales (Barrientos *et al.*, 2024). En la región del Biobío están operando 12 vermifiltros, representando cerca del 7% de los vermifiltros instalados en Chile. De éstos, 11 de ellos están destinados al tratamiento de aguas servidas en zonas rurales y 1 está destinado al uso industrial (Barrientos *et al.*, 2024).

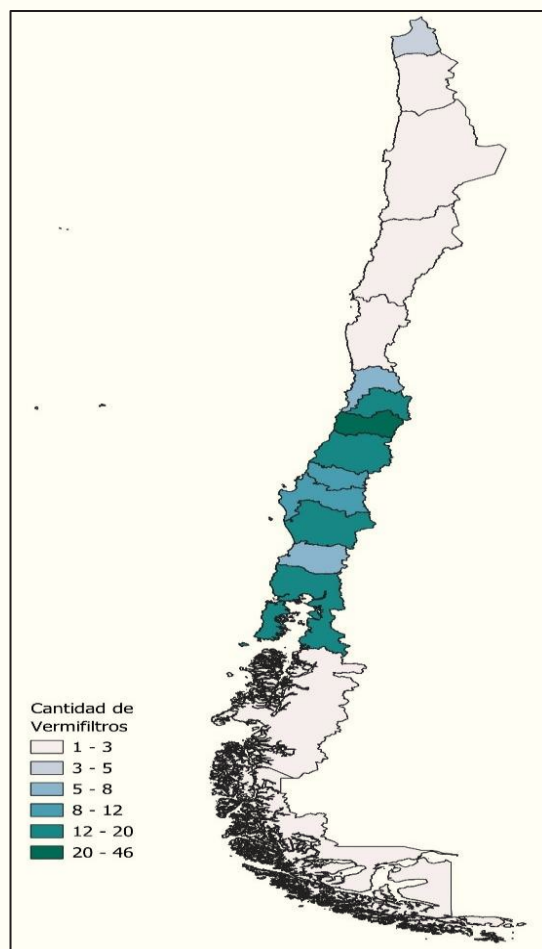


Figura 1. Distribución de vermifiltros instalados a lo largo de Chile por región. Fuente: adaptado de Barrientos *et al.*, 2024.

Respecto al uso industrial del vermifiltro, este se emplea en distintos rubros que producen efluentes de aguas residuales con alta materia orgánica, usualmente en rangos de 0,2-0,4 kg DQO/m²d, debido a la capacidad de tratamiento que tienen el consorcio bacterias – lombrices contenidas en estos sistemas.

En la Figura 3 se muestra la distribución de los distintos rubros industriales por región en los que se emplea el vermifiltro, destacando la industria alimenticia, la cual está presente de forma relevante en cinco regiones. Por su parte, la Región Metropolitana es la que posee mayor diversidad en materia de rubros industriales donde se emplea el vermifiltro, que considera rubro agrícola, alimenticio, lácteo, avícola y cervecero.

La instalación de esta tecnología y su eficiencia de operación es bien entendida y aplicada cuando se entienden los fundamentos que la rigen. Entender los fundamentos técnicos permite identificar las fortalezas y debilidades de la tecnología y los mecanismos físico - químicos y bioquímicos que comprende el sistema de vermifiltración, donde el consorcio bacteria – lombriz es la clave para producir la descontaminación del agua, generación de una reducida cantidad de biosólidos y emisiones de gases efectos invernaderos. De este modo, el vermifiltro está siendo considerado una vía alternativa de saneamiento, reduciendo la propagación de enfermedades, asequibles y sustentables que permite el avance en los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS).

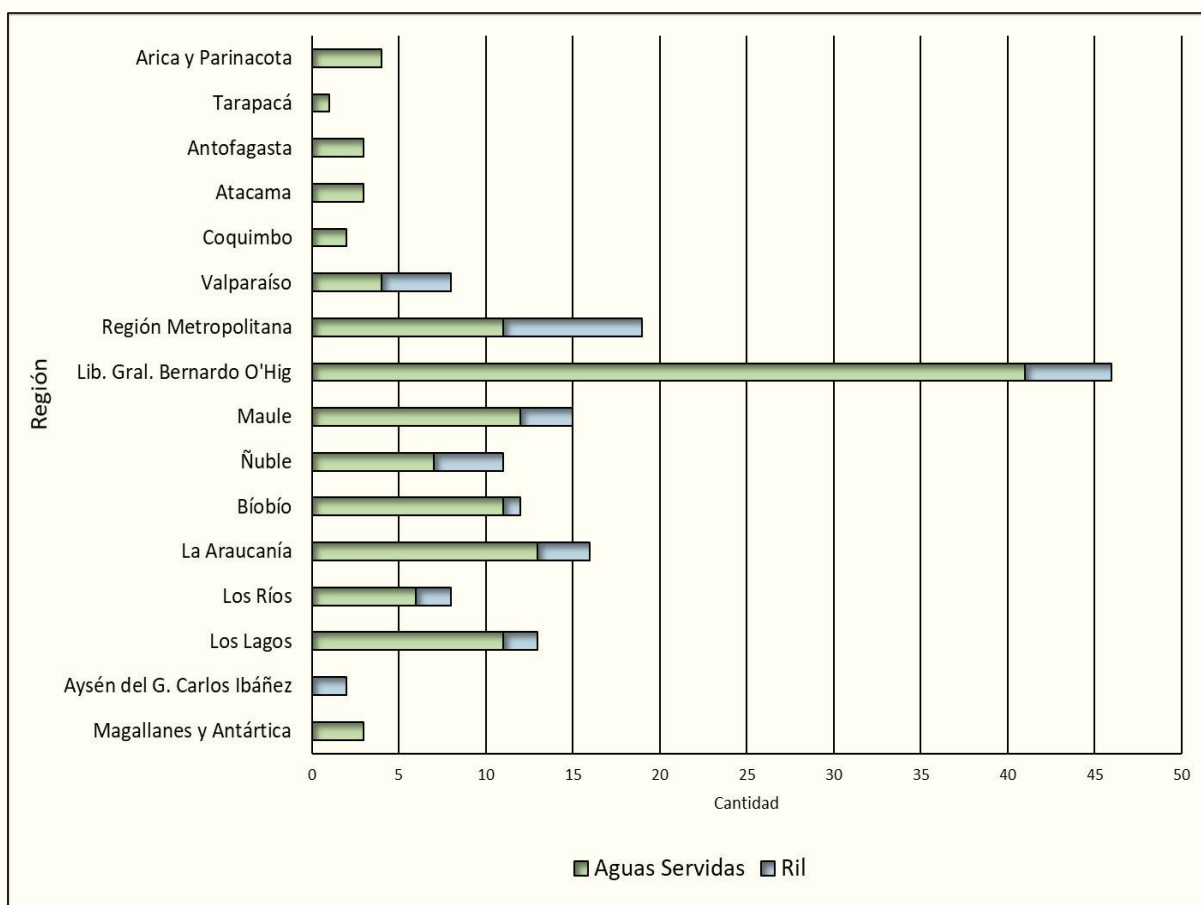


Figura 2. Comparación entre el uso doméstico e industrial del vermifiltro por región. Fuente: Adaptado de Barrientos *et al.*, 2024.

3. Fundamentos técnicos

El vermifiltro es un tratamiento secundario de aguas servidas creada y desarrollada por el Dr. José Tohá Castellá en la Universidad de Chile (Vidal et al., 2014) que surge desde la necesidad de implementar una tecnología compatible con la situación en zonas rurales. En este sector la densidad de población es reducida (<1000 habitantes). Por lo tanto, no produce más de 3800 m³/d de aguas servida (Vidal et al., 2014). Considerando lo anterior, el vermifiltro cumple con los requisitos de poseer una baja complejidad, mínima necesidad de mantención de equipos, reducción de residuos derivados del

tratamiento, bajo consumo energético y operación sencilla (Vidal et al., 2014).

El vermifiltro utiliza un proceso de bio-oxidación basado en la relación simbiótica entre lombrices y microorganismos. Generalmente el tipo de lombriz utilizada es *Eisenia foetida* y *Eudrilus eugeniae* (Kumar et al., 2016). Las reacciones químicas e interacciones biológicas aceleran la estabilización de la materia orgánica (Dey Chowdhury et al., 2022; Gutiérrez et al., 2023a). Las condiciones óptimas para el correcto desarrollo y funcionamiento de la especie *Eisenia foetida* son de un pH ideal que se encuentra cercano a la neutralidad cuyos rangos se estiman de entre 6,5 a 7,5.

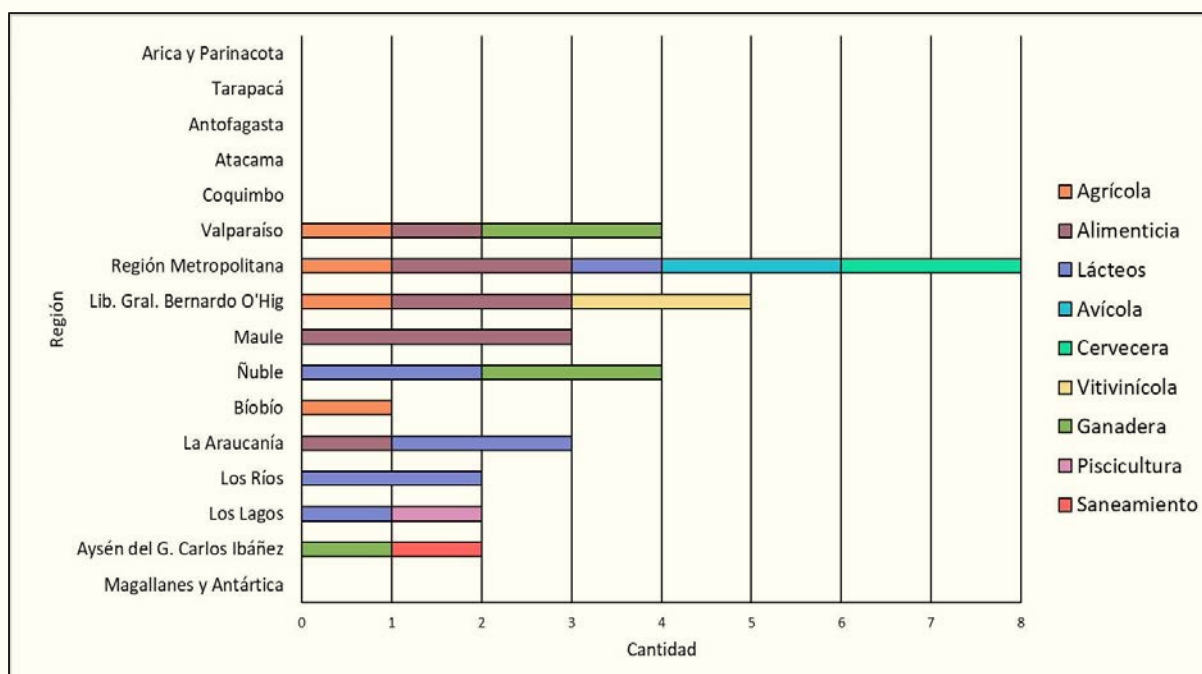


Figura 3. Comparación entre los distintos rubros industriales que tiene el vermifiltro por región. Fuente: Adaptado de Barrientos *et al.*, 2024.

En cuanto a la humedad, se requiere un contenido del 70% al 80%, ya que niveles inferiores o superiores a este rango, pueden afectar negativamente la supervivencia y eficiencia de las lombrices. La temperatura óptima para un correcto funcionamiento y desarrollo de la especie oscila entre los 20°C a 25°C (Somarriba-Reyes y Guzmán Guillén, 2004). La tecnología del sistema funciona como un biofiltro aeróbico a causa del comportamiento de excavación de las lombrices que aumentan el oxígeno. En consecuencia, no necesita aireación inducida o sistemas de bombeo (Gutiérrez *et al.*, 2023b).

- Comunidad microbiana y actividad enzimática. Es posible identificar algunos microorganismos dentro de la complejidad de diversidad en la microflora del vermifiltro. Dentro de las destacadas que se encuentran en el tracto digestivo de las lombrices son las especies bacterianas *Bacillus sp* y *Enterobacter*. También se identificaron hongos y actinobacterias que contaban con actividad

antibacteriana como *Penicillium chrysigenum* y *Streptomyces*. (Arora *et al.*, 2014).

Por otra parte, Yang *et al.* (2017) han identificado bacterias en las biopelículas del vermifiltro. Las *Proteobacterias* son las dominantes en este medio por su adaptabilidad a los cambios. Seguida de esta, se encuentran las bacterias *Bacteroidetes* reconocidas por ser desintegradoras que participan en la eliminación de nitrógeno y fósforo de las aguas servidas. Por otra parte, las bacterias *Xanthomonadaceae* y *Lysobacter* producen una variedad de enzimas extracelulares que permiten la hidrólisis y digestión de materia orgánica en lodos. Este mismo estudio menciona una relación 5 es a 1 de presencia de bacterias aeróbicas y anaeróbicas respectivamente. De esta última categoría se identificó *Holophagaceae* y bacterias anaeróbicas facultativas *Aeromonas*.

Si bien los microorganismos son los principales responsables de los procesos mencionados, es

importante destacar el rol de las lombrices que refuerza la degradación de los componentes. A través de diferentes mecanismos como la excavación, digestión, y deposición permiten modificar la biomasa microbiana (Arora *et al.*, 2020). La excavación crea condiciones aeróbicas aumentando el OD desde 0,35 mg/L a 2 - 5 mg/L en los primeros 5 cm de profundidad del medio. En el tracto digestivo de la lombriz se asimila parte del carbono y nutrientes y se secreta una sustancia que estimula a los microorganismos en el medio (Arora *et al.*, 2020; Capowiez *et al.*, 2021; Saapi *et al.*, 2024). Adugna *et al.* (2019) comprobaron que hubo un aumento de cantidad y variedad de cinco veces más en la población microbiana en comparación a un sistema sin lombrices. Saapi *et al.* (2024) reportó que en un sistema con una densidad de lombrices hasta 10000 lombrices/m³ se detectaron 26 especies de microorganismos aeróbicos. Por el contrario, en un sistema sin lombrices solo se identificaron 11 especies.

Dicho lo anterior, la comprensión de los mecanismos que se desarrollan dentro del

medio filtrante del vermifiltro proporciona las herramientas para evaluar las eficiencias de eliminación. Esta información ayuda a distinguir cómo la variabilidad de múltiples factores afecta la eliminación de contaminantes. A pesar de que las eficiencias de eliminación de DQO y SST son optimistas, no deja de ser importante que los mecanismos mencionados son propensos a generar impactos en el medio ambiente.

- Constitución de un vermifiltro. La Figura 4 muestra un vermifiltro compuesto por distintos estratos filtrantes. En la primera capa ocurre la interacción de lombrices y microorganismos favoreciendo la degradación de materia orgánica. En el o los niveles siguientes el medio filtrante aumenta el tamaño del material que permite la retención de sólidos. El agua servida es distribuida sobre la superficie del primer medio y el efluente tratado se recolecta en el punto de descarga del sistema (Singh *et al.*, 2017).

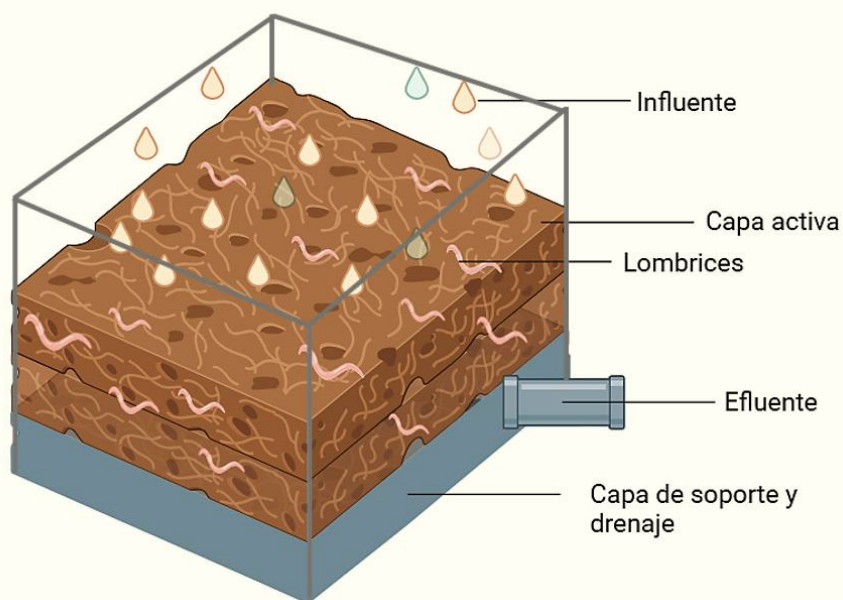


Figura 4. Esquema de un tratamiento de aguas servidas mediante un vermifiltro.

La Figura 5 muestra tres tipos de vermifiltro según el flujo de agua servida (influyente), subsuperficial vertical, horizontal e híbrido. En los vermifiltros verticales (Figura 5a) se apilan capas de forma vertical con un medio de soporte y drenaje en la parte inferior. En estos sistemas el agua servida fluye desde la superficie hacia abajo, lo que permite que predomine la condición aeróbica y además asegura una degradación completa. En el vermifiltro subsuperficial horizontal (Figura 5b) se mantienen condiciones aeróbicas y anóxicas. Mientras que la Figura 5c muestra un vermifiltro híbrido que combina dos etapas una vertical y otra horizontal. El beneficio de este último es una mejor eliminación de materia orgánica y nutrientes, causado por el tiempo de retención hidráulica y condiciones óxido-

reducción favorables en el sistema (Dey Chowdhury *et al.*, 2022).

Si bien se ha evaluado el vermifiltro como un tratamiento secundario de aguas servidas, se desconoce el detalle sobre los indicadores de sostenibilidad ambiental, asequibilidad económica y aceptabilidad social (Dey Chowdhury *et al.*, 2022).

- Mecanismos de funcionamiento. El vermifiltro está constituido por lombrices y microorganismos que subsisten en un medio filtrante. En este medio ocurren procesos bioquímicos, físico-químicos y biológicos que permiten la eliminación de la materia orgánica, transformación de nutrientes, sólidos y filtración de compuestos y microorganismos (Saapi *et al.*, 2024).

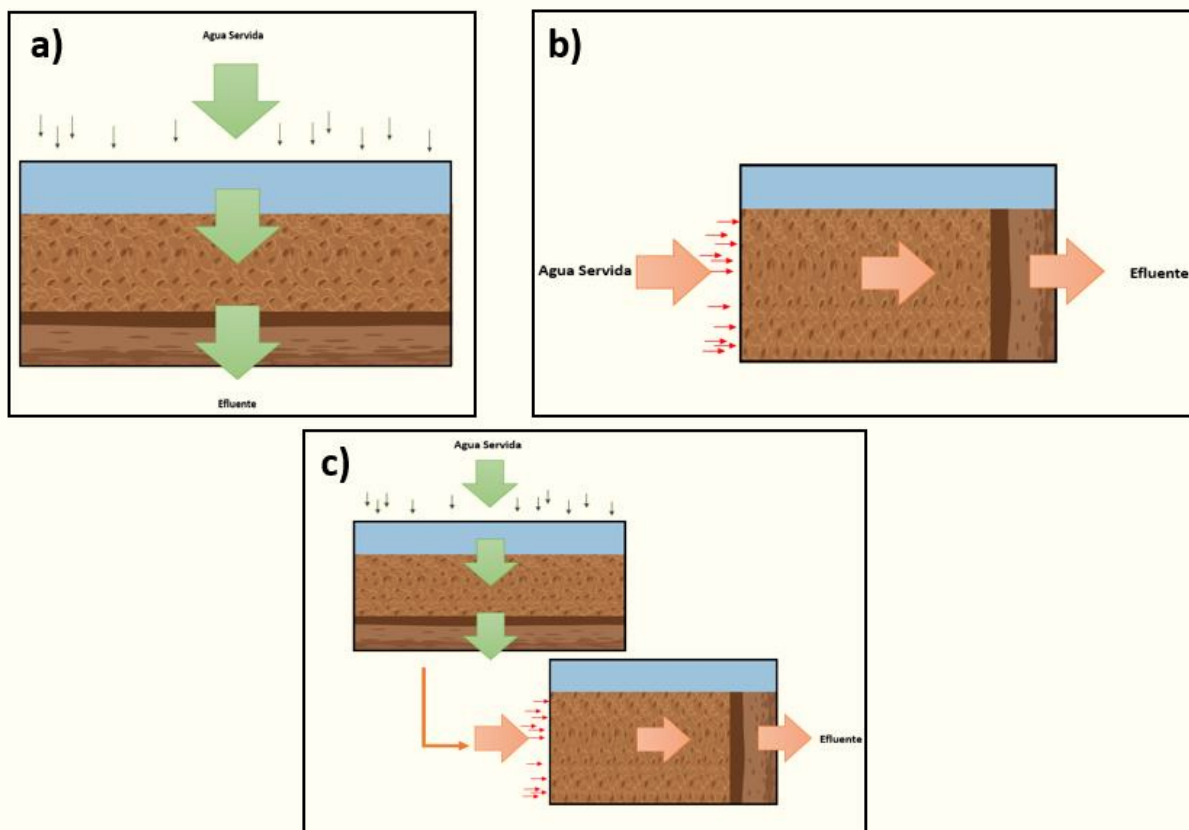


Figura 5. Tipos de vermifiltros según el flujo del agua servida. a) subsuperficial vertical; b) subsuperficial horizontal; c) híbrido.

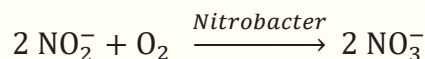
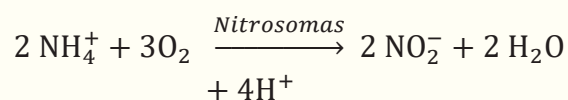
La Figura 6 ilustra los principales componentes del agua servida que ingresan a un sistema de tratamiento por vermifiltro. Las partículas sólidas son fragmentadas en partículas más finas por la acción de digestión de las lombrices. De esta manera, aumenta su área superficial y son degradadas por los microorganismos o adsorbidas por el medio filtrante (Arora *et al.*, 2020; Saapi *et al.*, 2024). Como resultado de este proceso la materia orgánica es retenida en el medio o se mineraliza y libera iones solubles. Lo anterior puede cuantificarse a través de la determinación del parámetro in situ de conductividad eléctrica (CE). Una forma más directa es la determinación de la eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos totales (SST). Arora *et al.* (2020) identificaron este efecto en su vermifiltro de estudio registrando un aumento de 2.500 a 3.000 $\mu\text{S}/\text{m}$ en CE y una eficiencia de eliminación del 90% de SST. Además, Nogales *et al.* (2020) asocian la fragmentación de partículas al parámetro de actividad microbiana medida por la enzima deshidrogenasa.

La materia orgánica ingresada al vermifiltro es modificada por acción de microorganismos asociados a las lombrices mediante su actividad enzimática (Arora *et al.*, 2020). La materia orgánica se descompone a través de un proceso de hidrólisis en compuestos más simples. Luego experimenta una oxidación o deshidrogenación para la estabilización de este componente (Arora *et al.*, 2020). Finalmente se transforma en biomasa, agua y dióxido de carbono (CO_2) si tiene una oxidación completa. En caso contrario, puede generar emisiones de metano (CH_4) o ser directamente descargada en el agua tratada (Gutiérrez *et al.*, 2023b).

Por otra parte, el nitrógeno está presente en el agua servida en forma de amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) o nitrógeno orgánico (N_{org}). Pueden estar en el medio en conjunto, pero la configuración predominante dependerá de las condiciones ambientales del lugar de

estudio. Para ello, se debe considerar los tres procesos del ciclo del nitrógeno: fijación de N_2 , nitrificación y desnitrificación.

Si el vermifiltro se encuentra en condiciones favorables para el crecimiento de microorganismos aeróbicos, es decir, 2 mg/L de OD, 20°C y pH neutro, los componentes del agua servida tenderán a la nitrificación. El nitrógeno orgánico se transforma en amonio (NH_4^+) a través de microorganismos heterótrofos en un proceso de amonificación. Seguidamente, las bacterias *Nitrobacter* y *Nitrosomas* generan procesos de nitrificación transformando el NH_4^+ a NO_3^- . Dentro de esta reacción se genera como intermediario el nitrito (NO_2^-). Las reacciones químicas a continuación muestran en detalle como ocurre la oxidación:



Las reacciones químicas muestran la dependencia hacia el oxígeno disuelto (OD) para que se lleven a cabo. La nitrificación es incompleta cuando la concentración de OD se encuentra en una concentración inferior a 0,5 mg/L. Esto incrementa la concentración de NO_2^- en el sistema, ya que no se conserva suficiente oxígeno para la segunda parte del mecanismo (Dey Chowdhury and Bhunia, 2021). A la vez, un bajo OD provoca la conversión del NO_3^- en NO_2^- . O directamente el NO_2^- acumulado es liberado a la atmósfera como N_2O o N_2 en un proceso de desnitrificación (Singh *et al.*, 2021; Dey Chowdhury *et al.*, 2023).

Por su parte, el fósforo se encuentra como ácidos nucleicos, nucleótidos, fosfolípidos, polifosfatos y otros componentes celulares. También se presenta de forma inorgánica soluble como PO_4^{3-} (Canfield *et al.*, 2005). Su eliminación en un sistema de tratamiento depende más de la capacidad de adsorción del

medio filtrante que de los microorganismos. Además, las lombrices son propensas a la mineralización del fósforo, pero no de eliminar este contenido (Gutiérrez *et al.*, 2023a). Por consiguiente, hay una variabilidad en la cantidad del fósforo presente, debido a que aún con la adsorción en el sistema que contribuye a su eliminación, la actividad metabólica de las lombrices promueve la rápida mineralización de fosfato en el sistema. Por lo tanto, el fósforo en las aguas residuales puede quedar retenido en el medio filtrante, se incorpora a la biomasa microbiana o liberarse nuevamente a al efluente.

Finalmente, sobre la capacidad de eliminar patógenos y contaminantes microbianos se han medido de forma indirecta a través de parámetros como Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF). Ambos son indicadores de posible presencia de patógenos. Su eliminación en el medio filtrante está dada principalmente por procesos de filtración y adsorción. Esto es reforzado por la secreción de una consistencia viscosa y pegajosa de las lombrices que limita el movimiento de microorganismos externos (Gutiérrez *et al.*, 2023).

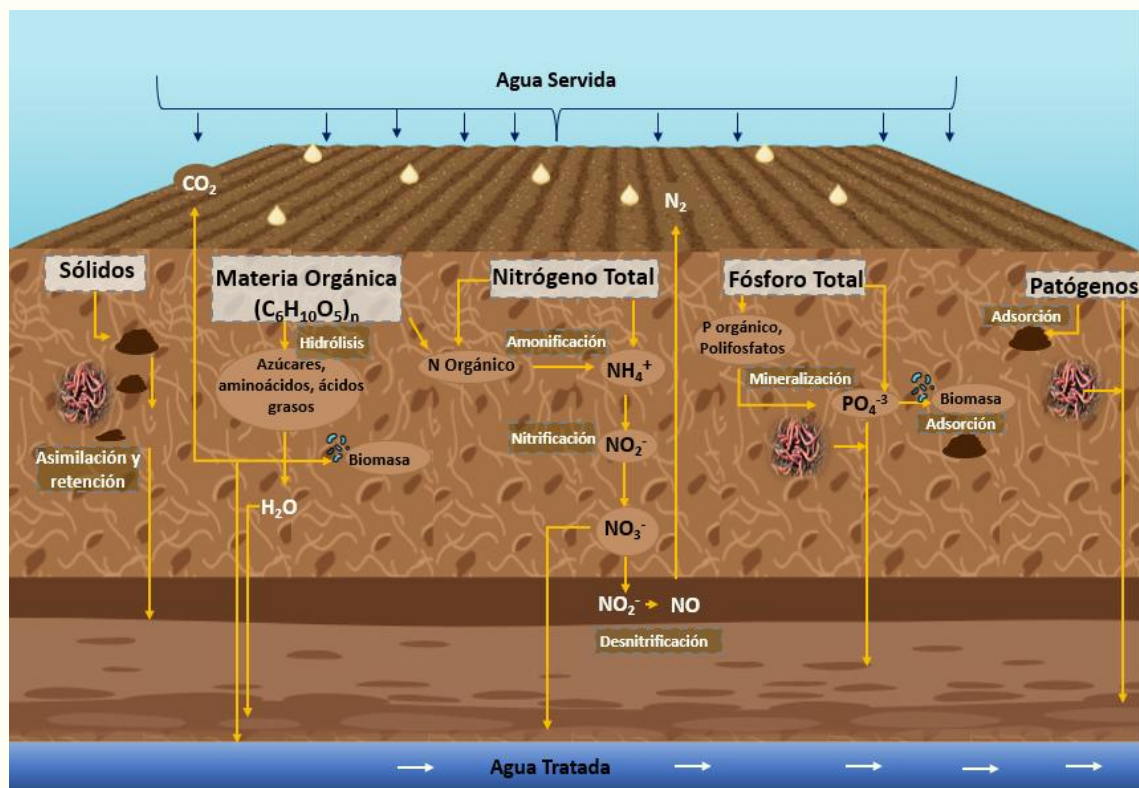


Figura 6. Representación de mecanismos y reacciones en un vermifiltro.

Como se ha indicado las aguas residuales pasan a través de la capa activa, donde la materia orgánica se convierte en vermicompost enriquecido con humus por las lombrices de tierra. Posteriormente, se produce la filtración a través del medio filtrante. El medio filtrante favorece el crecimiento de microorganismos y, posteriormente, se lleva a cabo un tratamiento secundario. La actividad de molienda de las

lombrices de tierra ayuda a aumentar la superficie específica total presente en el medio filtrante, lo que permite una mayor absorción de los contaminantes orgánicos e inorgánicos de las aguas residuales. Las partículas disueltas y en suspensión quedan atrapadas en el medio filtrante a medida que se percolan y se estabilizan mediante complejos bioprocesos que tienen lugar en la capa activa.

Los componentes disueltos de las aguas residuales se desplazan hacia abajo en los perfiles, adsorbidos en la matriz superficial del medio y degradados por la acción simbiótica de las enzimas y los microbios liberados por las lombrices de tierra. El vermifiltro no se obstruye porque las lombrices mejoran la aireación al excavar y aceleran la actividad microbiana al aumentar la población de

microorganismos del suelo, incrementando así la rápida utilización de los compuestos orgánicos absorbidos. Esta actividad simbiótica y sinérgica de las lombrices y los microorganismos también modifica las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales. La Figura 7 muestra detalladamente el mecanismo y la transformación de los compuestos contenidos en las aguas servidas.

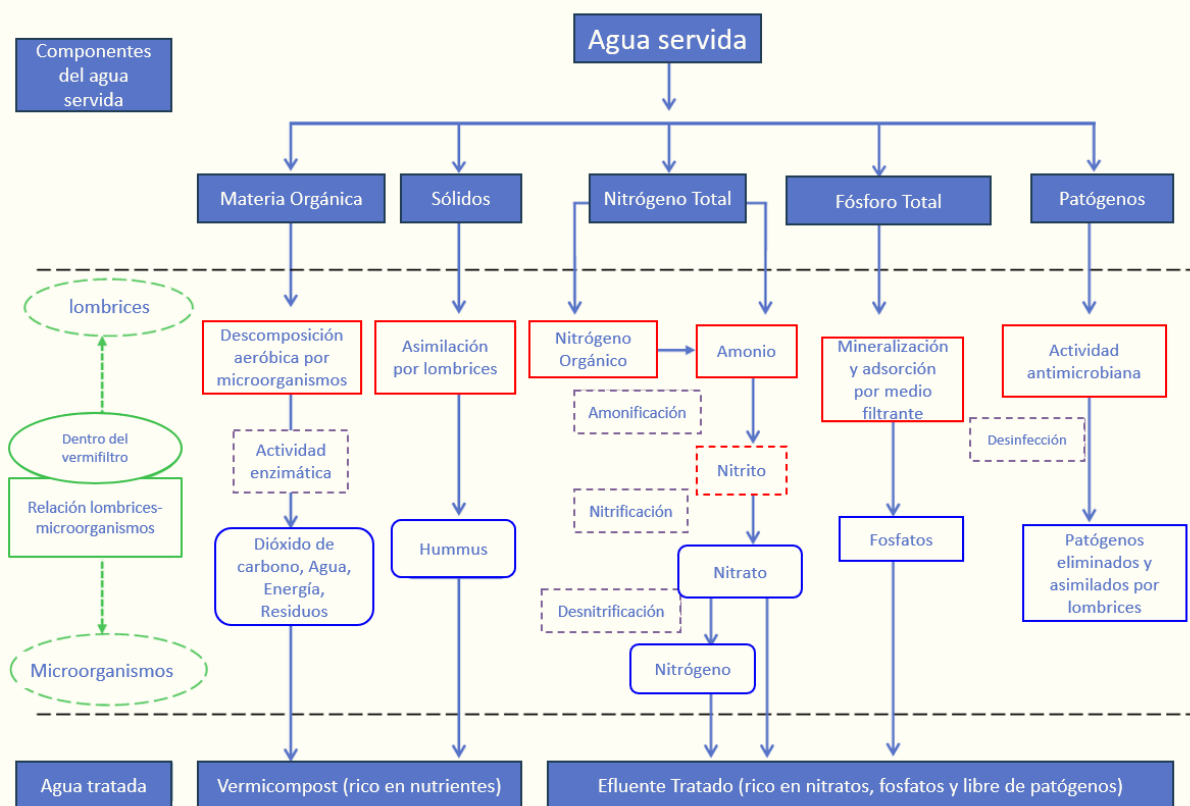


Figura 7. Mecanismo y transformación de los compuestos contenidos en las aguas servidas vía vermifiltración (modificado de Aroraa y Saraswatb, 2021).

- Condiciones de diseño y operación. Como se mencionó anteriormente, el vermifiltro es una tecnología de tratamiento de aguas servidas que no se encuentra estandarizada. Por ello, se pueden encontrar una serie de estudios con distintas condiciones de diseño y operación para evaluar su eficiencia.

La Tabla 1 muestra los parámetros óptimos de un vermifiltro de acuerdo con la bibliografía recopilada. Según Singh *et al.* (2017) existen dos parámetros relevantes para su diseño: El medio filtrante y la especie de lombriz. El medio filtrante abarca al menos dos capas, la parte superior o capa activa puede tener más de un material; aserrín, arena, compost, virutas de

madera, entre otros. Este último mencionado según varios estudios tiene una capacidad de adsorción, porosidad y retención hidráulica superior que permite una mejor eficiencia de eliminación.

Por otra parte, Gutiérrez *et al.* (2023b) indicaron que la especie de lombriz que se ajusta mejor al sistema es la *Eisenia foetida*. Esta especie resulta importante por su capacidad de adaptación a cambios ambientales y de operación. Kumar *et al.* (2016) realizaron un estudio comparativo entre *Eisenia foetida* y *Eudrilus eugeniae*, donde esta última tuvo una mortalidad total. Los experimentos con la *Eisenia foetida* presentaron una eficiencia de eliminación de DQO de un 27% superior en comparación a un sistema sin lombrices (Sinha *et al.*, 2008). La densidad de las lombrices en el medio debe ser suficiente para una eficiente eliminación de la DQO. Cuando la densidad supera las 10.000 lombrices/m³, se puede generar obstrucción en el medio filtrante. Por lo tanto, como se menciona en la Tabla 1 un rango óptimo se encontraría entre 5.000 – 10.000 lombrices/m³.

También hay que considerar en el diseño la profundidad del medio filtrante. Mientras mayor sea la profundidad, más tiempo de retención tendrá el sistema. Sin embargo, algunas investigaciones han indicado que esto conlleva implicancias ambientales como, por ejemplo, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Gutiérrez *et al.*, 2023b). Al ser un sistema que simula un entorno natural, las lombrices tenderán a acumularse en la zona rociada de agua servida. En consecuencia, las zonas más profundas solo tienen una función filtrante y generan un ambiente propicio para formar componentes no deseados. Teniendo en cuenta las variables, el promedio óptimo oscila entre 0,6 – 1,2 m de profundidad.

En cuanto a la Velocidad de Carga Hidráulica (VCH) y Velocidad de Carga Orgánica (VCO) es importante regularlas como en cualquier

sistema de tratamiento de aguas servidas. La VCH debe fluctuar entre 0,02 – 2,5 m³/m²d. Esto con el fin de tener un tiempo de retención adecuando sin provocar desprendimientos o cambios en las colonias de los microorganismos. Igualmente, los valores óptimos de la VCO se mantienen entre 0,2 – 0,4 kg DQO/m²d. Con el propósito de evitar la obstrucción del sistema y la limitación de la disponibilidad alimentaria para los microorganismos (Singh *et al.* 2017, Singh *et al.* 2021, Gutiérrez *et al.* 2023a, Gutiérrez *et al.* 2023b, Miito *et al.* 2025).

Durante la operación del vermifiltro se supervisa los parámetros de temperatura, pH, humedad, POR, OD y la conductividad. Estos son algunos de los parámetros esenciales que permiten medir el estado y funcionamiento del tratamiento de aguas servidas. En la Tabla 1 se muestran los rangos óptimos para un sistema de tratamiento de aguas servidas considerando la sensibilidad de las lombrices. La temperatura para la supervivencia de las lombrices se debe encontrar entre 15 – 25°C, con un pH entre 5 – 9 y un porcentaje de humedad comprendido entre un 60 – 80%. El OD en un rango de 2 – 4 mgO₂/L y el (POR) mayor a 100 mV, son indicativos de que el sistema se mantiene mayormente aeróbico. Si el vermifiltro instalado cumple con las condiciones mencionadas se podrá regular el metabolismo de los microorganismos y de las lombrices, es decir, se podrá mantener una óptima eficiencia de eliminación de materia orgánica.

Además del diseño y la operación del vermifiltro se debe considerar la mantención del sistema. No se ha determinado la frecuencia de este, ya que dependerá de las condiciones en el que se encuentre.

Sin embargo, es necesario la observación frecuente y la determinación de eficiencias de eliminación de distintos parámetros. Dependiendo de ello, se puede efectuar un

cambio de medio filtrante o retiro de residuos superficiales según se estime conveniente.

- Eficiencia de eliminación de un vermifiltro.
La eficiencia de eliminación de los contaminantes en un vermifiltro varía según los parámetros operacionales, las condiciones

ambientales y el tipo de agua servida. En la Figura 8 se muestran las eficiencias de eliminación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos recopiladas de diferentes estudios. Estos resultados permiten entender el comportamiento general de los contaminantes medidos en el vermifiltro.

Tabla 1. Parámetros de optimización de un vermifiltro

Categoría	Parámetro	Óptimo	Unidad de medida
Diseño	Medio Filtrante	Virutas de madera	°C
	Profundidad medio filtrante	0,6 a 1,2	m
	Especie de lombriz	<i>Eisenia foetida</i>	-
	Densidad de lombrices	5.000 – 10.000	lombrices/m ³
	VCH	0,02 – 2,5	m ³ /m ² d
	VCO	0,2 – 0,4	kg DQO/m ² d
Operación	Temperatura	15 – 25	°C
	pH	5 – 9	-
	Humedad	60 – 80	%
	POR	100 – 350	mV
	OD	2 – 4	mg/L

VCH: Velocidad de Carga Hidráulica; VCO: Velocidad de Carga Orgánica; DQO: Demanda Química de Oxígeno; POR: Potencial Óxido-Reducción; OD: Oxígeno Disuelto. Fuente: Gerardi (2007), Singh *et al.* (2017), Arora and Saraswat (2021), Singh *et al.* (2021), Gutiérrez *et al.* (2023a, b), Miito *et al.* (2025).

La materia orgánica medida en términos de DQO, tiene una eficiencia de eliminación entre 77% a 96%, atribuyéndose principalmente a la interacción entre lombrices y microorganismos. Sin embargo, este parámetro es sensible a la VCO y la VCH. Esto también ocurre con los sólidos suspendidos totales (SST) que son eliminados principalmente por procesos físicos. El rango de eficiencia de este componente es amplio, desde un 43% a un 96%. Singh *et al.* (2018) obtuvo una eficiencia de DQO del 96,0 ± 1,2% con un VCH de 1,8 m/día. No obstante, se observó una eliminación del 74,4 ± 2,2% de DQO con un VCH de 4,5 m/día. Por lo tanto, un sistema con un VCH más bajo suele tener más

eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos totales.

El nitrógeno total (NT) tiene una eficiencia de eliminación entre un 53,9 y 87%. Este valor dependerá de las reacciones como nitrificación y desnitrificación. Cuando ocurre la nitrificación disminuye la concentración del amonio, pero a la vez aumenta la del nitrato. Hay que recordar que el NT que consiste en la suma de las concentraciones del componente nitrogenado del nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato. Por lo tanto, para una eliminación efectiva requiere del proceso de desnitrificación, es decir, transformación a un nitrógeno gaseoso que se produce en ambientes anóxicos. De todas formas, la eficiencia de

eliminación del NT se mantiene en un rango elevado. La eficiencia de eliminación del amonio ronda entre los 81,8% y 98,2%. Como se mencionó, se debe a que el sistema aeróbico producidas por acción de las lombrices permiten el proceso que llevan a cabo las bacterias nitrificantes. Por lo tanto, la actividad microbiana en un vermifiltro normalmente se encuentra activa para realizar esas reacciones.

Una de las eliminaciones más variantes y bajas corresponde al fósforo total (PT). El mecanismo es principalmente por adsorción del medio y es contrastado por la mineralización por parte de

las lombrices. Lo que conlleva a solo un 43 – 66,5% de eliminación.

Finalmente, las eficiencias de eliminación de parámetros microbiológicos medidos en CT y CF son elevadas. Varios estudios indicaron eficiencias de alrededor de un 99% para ambos parámetros. Rajpal et al. (2014) y Pous et al. (2021) confirmaron a que se debe por la actividad enzimática y las secreciones que permiten acumular las coliformes en el medio. Arora and Kazmi (2015) además menciona la importancia de la influencia de la temperatura. Ante una temperatura en una temporada de invierno, la eficiencia puede bajar a un 43%.

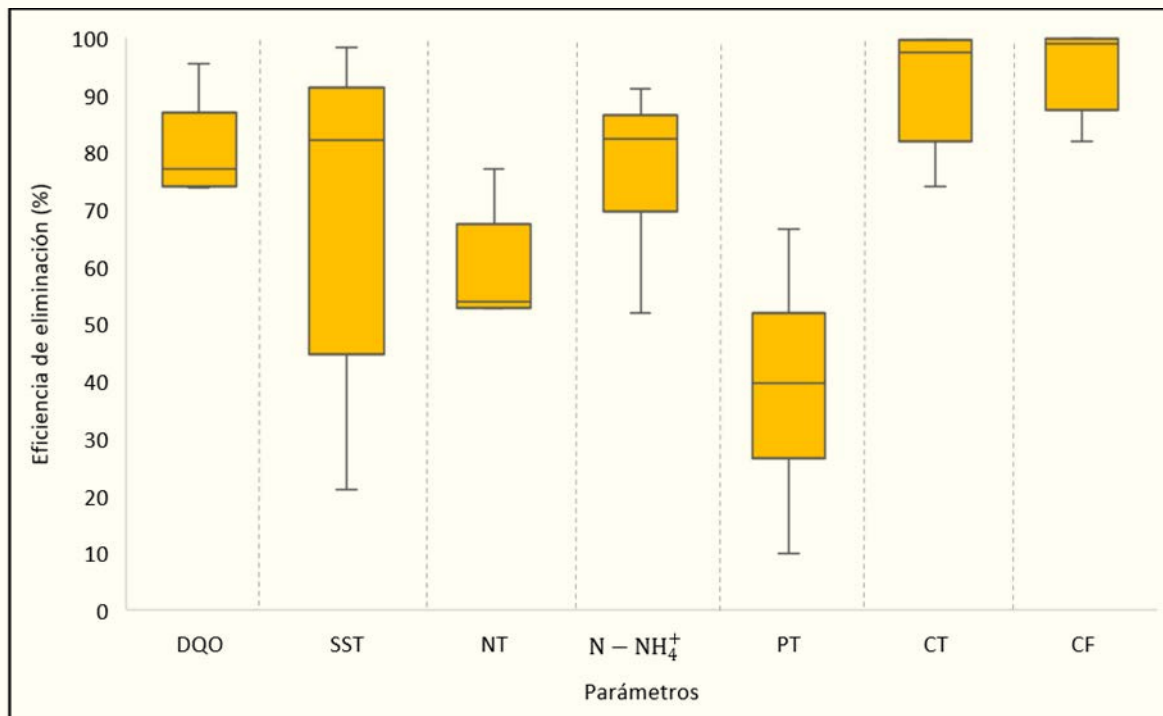


Figura 8. Eficiencias de eliminación (%) de parámetros fisicoquímicos y biológicos de una recopilación de estudios. DQO: Demanda Química de Oxígeno; SST: Sólidos Suspendidos Totales; NT: Nitrógeno Total. N-NH₄⁺: Nitrógeno de Amonio; PT: Fósforo Total; CT: Coliformes Totales; CF: Coliformes Fecales. Fuente: Arora et al. (2014), Rajpal et al. (2014), Lourenço and Nunes (2017), Singh et al. (2018), Dey Chowdhury and Bhunia (2021), Pous et al. (2021), Miito et al. (2022), Singh et al. (2022), Dey Chowdhury and Bhunia (2024), Kumar and Khwairakpam (2024), Miito et al. (2024), Arora and Kazmi (2015).

La Tabla 2 resume las principales diferencias según costos y rendimiento de cuatro tecnologías. El vermifiltro presenta un costo de operación de 56,2 CLP/m³año y consumo eléctrico despreciable.

El pequeño costo está relacionado en lo prescindible que es la aireación asistida y equipos eléctricos complejos para su manejo. Esto es debido a que depende de una filtración por gravedad y microorganismos naturales que se encuentran en el medio (Sinha et al. 2014, Saapi et al. 2024). Lo mismo sucede con los humedales construidos que es menos costoso con 17,4 CLP/m³año. Por otro lado, las tecnologías más mecanizadas como los lodos activados convencionales, el Reactor de Lecho

Móvil (MBBR) y el Reactor SBR, cuentan con un costo más elevado de mínimo 192, 146 y 70 CLP/m³año respectivamente. Principalmente el aumento de estos gastos se debe al consumo eléctrico que van desde los 0,3 a 0,8 (kWh/m³).

Por otro lado, un lodo activado, MBBR y SBR requieren de una purgación del lodo generado de forma continua. En cambio, tanto el vermifiltro como el humedal construido se pueden mantener por años. Por lo tanto, estas dos últimas tecnologías mencionadas son ideales para zonas rurales descentralizadas. Además, en cuanto a nivel de complejidad solo necesitan de un sistema de bombeo y desinfección.

Tabla 2. Costos y rendimiento operacional de tecnologías de tratamiento de aguas servidas

Tecnología	Costo de operación (CLP/m ³ año)	Consumo eléctrico (kWh/m ³)	Purgación	Complejidad	Eficiencia DQO (%)	Ref.
Vermifiltro	56,2	~ 0	2 – 3 años	Muy simple [#]	77 – 96	[1], [2]
Humedales construidos	17,4	0,08	5 – 10 años	Muy simple	67 – 84	[1], [3], [4], [5], [6]
Lodos activados	192,4 – 259,8	0,3 – 0,65	1 – 7 días	Complejo ^{&}	>90	[2], [7]
Reactor de lecho móvil (MBBR)	146,1 – 527,9	0,6 – 0,8	6 – 12 meses	Simple [*]	78 – 90	[7], [9]
Reactor SBR	70,4 – 123,2	0,25	1 – 3 meses	Complejo	65 – 98	[5]

[#]Muy simple: bombas y desinfección; ^{*}Simple: bombas, aireación y desinfección; [&]Complejo: bombas, tanques de aireación, tratamiento de lodos y desinfección. SBR: Sequence Batch Reactor; MBBR: Moving Bed Biofilm Reactor. Fuente: [1] Saapi et al. (2024), [2] Sinha et al. (2014), [3] López et al. (2015), [4] Castellar et al. (2022), [5] Akyürek & Nuri; [6] Oliveira et al. (2021); [7] Arif et al. (2020); [8] Siatou et al. (2020); [9] Singh et al. (2016).

Considerando los contrastes técnicos y económicos, la surgencia de soluciones basada en la naturaleza como son el vermifiltro y humedales construidos ha sido fundamental para la evolución en el tratamiento de aguas servidas. Estos sistemas pueden mantener una eficiencia de eliminación de 67 a 96%, lo cual es comparable con un tratamiento convencional de lodos activados que es de >90%.

4. Consideraciones ambientales

La implementación de un tratamiento de aguas servidas tiene implicancias ambientales tanto positivas como negativas. En la Tabla 3 se analiza el vermifiltro bajo este marco, considerando aspectos e impactos ambientales.

La etapa de construcción es una fase crítica dentro de cualquier proyecto. A pesar de que no se tienen datos específicos en lo que el vermifiltro refiere, se han establecidos aspectos e impactos típicos. Los aspectos identificados son el consumo de materiales y recursos, es decir, grava, arena, tuberías, entre otros. También el consumo energético del traslado de estas materias conlleva a una emisión de CO₂ por el uso de combustibles fósiles. El uso del

suelo está dado por el área a ocupar el vermifiltro puede alterar las propiedades del suelo y tener una pérdida de hábitat y ecosistemas. Por lo general, los vermifiltros corresponden a una extensión de terreno de 0,75 m²/hab (Vidal *et al.*, 2014). Por lo tanto, la superficie para una población amplia tiende a producir más alteraciones de hábitat. Durante la operación del sistema también se hace uso de un consumo eléctrico. Sin embargo, se ha establecido que pese a utilizarse para el uso de bombas, esta es mínima a comparación a otras tecnologías como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, el uso de esta tecnología tiene un impacto positivo en la reducción de emisiones de CO₂ en el tratamiento de aguas servidas. No obstante, no es posible descartar en su totalidad que no aporta CO₂ en absoluto. De hecho, se han generado estudios que evidencian una emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en el medio filtrante del vermifiltro. Luth *et al.* (2011), Huang *et al.* (2014), Zhao *et al.* (2014) y Miito *et al.* (2022) reportaron emisiones de CO₂ en un rango de 314,0 a 21663 mg/m²h, CH₄ entre -1,7 a 1870 mg/m²h y N₂O entre valores de - 0,9 a 120,0 mg/m²h.

Tabla 3. Aspectos e impactos ambientales en diferentes etapas de un vermifiltro. Fuente: Dey Chowdhury *et al.* (2022); Miito *et al.* (2022); Saapi *et al.* (2024); Miito *et al.* (2025).

Etapa	Aspecto ambiental	Impacto ambiental
Construcción	Consumo de materiales y recursos	Agotamiento de recursos naturales no renovables.
	Uso del suelo	Alteración de propiedades del suelo y pérdida de hábitat.
	Consumo energético	Emisiones indirectas de CO ₂ en el traslado de materiales.
Operación	Bajo consumo energético	Emisiones indirectas de CO ₂ en el uso de bombas.
	Generación de subproductos	Alteración de calidad del suelo.
	Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	Aumento del calentamiento global por emisiones de GEI.
	Descarga de agua tratada.	Disminución de eutrofización y contaminación del cuerpo de agua
Cierre	Generación de residuos	Contaminación y alteración de calidad de los suelos.
	Uso de maquinarias	Emisiones indirectas de CO ₂ .

La descarga del agua servida a un cuerpo de agua genera eutrofización y contaminación de los cuerpos de agua. Por medio del vermifiltro esta contaminación se ve reducida como se mencionó anteriormente en términos de materia orgánica, amonio y patógenos del 86,5%, 90% y 99% respectivamente. Sin embargo, si la descarga no cumple con la normativa vigente, este impacto positivo cambia a un impacto negativo. En consecuencia, la gravedad de la implicancia ambiental está sujeto a cada vermifiltro. Por otra parte, la generación de subproductos, como es el caso del hummus y biomasa microbiana causa alteraciones en la calidad del suelo. Los contaminantes que son eliminados del agua servida se acumulan en el vermifiltro o son eliminados como subproducto de GEI. Saapi *et al.* (2024) mencionan que el lodo generado corresponde a valores cercanos a 0,08 kg SST/DQO eliminada en vermifiltro. Valor inferior a lo determinado en sistema de lodo activado convencional: 0,6 kg SST/DQO eliminada (Ramalho, 2016).

Abello *et al.* (2020) determinaron que el impacto de un vermifiltro en el cambio climático es de 1,2 kg CO₂ eq./kg DBO₅ y un impacto de eutrofización de $7,18 \times 10^{-4}$ kg P eq./kg DBO₅ mientras que un lodo activado tiene un impacto en el cambio climático de 1,96 kg CO₂ eq./kg DBO₅ y un impacto de eutrofización de $1,15 \times 10^{-3}$ kg P eq./kg DBO₅. El indicador de cambio climático presenta similitudes en ambas tecnologías, con un impacto menor en el vermifiltro. Esto se debe a que el sistema de lodos activados requiere de demanda energética para airear el sistema de forma mecánica, a diferencia del vermifiltro que opera en condiciones naturales. Por otro lado, el impacto de eutrofización es menor en el vermifiltro porque presenta un medio filtrante con una capacidad de adsorción y filtración que permite la eliminación de los nutrientes. Sin embargo, es importante destacar que ambas tecnologías no están diseñadas para la eliminación de nutrientes, por lo que las aguas

servidas son una fuente importante de eutrofización en los cuerpos receptores (ONU-Hábitat, 2021).

Finalmente, en la etapa de cierre y/o cambio del medio se consideran dos aspectos ambientales; generación de residuos y uso de maquinarias. El lodo generado por el vermifiltro después de 3 a 4 años debe ser renovado. Sin embargo, no se tiene información sobre el tratamiento de este residuo generado o su disposición en lugar determinado para este tipo de desechos. Estos aspectos pueden impactar en la calidad de los suelos y atmósfera por la contaminación y alteración del suelo y las emisiones de GEI.

5. Consideraciones finales

El vermifiltro es una alternativa de tratamiento de aguas servidas que ha resultado efectiva especialmente en zonas rurales. Según la recopilación de diferentes estudios la eficiencia de eliminación corresponde a un 86,5% de DQO, un 70,5% de NT, 54,8% de PT y 99% de CT. La tecnología se ha aplicado con éxito en los sectores municipales, industriales y agrícolas. No obstante, las eficiencias de eliminación e implicancias ambientales dependerán de los parámetros operacionales y del seguimiento que se realice. Aun cuando se ha demostrado la capacidad de eliminar materia orgánica, sólidos y nutrientes en el vermifiltro, esta solo atiende a una parte del tratamiento de aguas servidas. Un correcto funcionamiento debe contar con infraestructura adicional para el descarte de sólidos y la desinfección en el agua servida.

Por otra parte, el surgimiento de la preocupación por contaminantes emergentes, microplásticos y gases de efecto invernadero ha dado pie para más investigaciones que se encuentran en proceso de evaluación tanto para el vermifiltro como para otras tecnologías. En este sentido, la deposición del medio filtrante en zonas rurales pone en riesgo al medio ambiente y las personas debido a los componentes tóxicos

acumulados en el vermifiltro. En varias ocasiones, este es utilizado como compost entre los habitantes. A pesar de que algunos estudios recomiendan su uso por el contenido de nutrientes (Saapi *et al.*, 2014), hay contaminantes orgánicos sintéticos persistentes que tiene el potencial de bioacumularse y eventualmente causar daños a los humanos, vida silvestre y medio ambiente. La disposición de lodo sin tratar interviene en la comunidad microbiana del lugar depositado, la capacidad de retención del agua en el suelo y su estructura.

A pesar de sus ventajas el vermifiltro no reemplaza por completo otros tratamientos. Es decir, requiere de infraestructura y etapas complementarias para un funcionamiento efectivo. Además, se recomienda un plan de gestión de residuos sólidos por la exposición a componentes tóxicos ante una deposición insegura. Finalmente, es imperante establecer estándares de diseño, operación y monitoreo para su replicabilidad, junto con estudios de análisis de ciclo de vida que consideren las emisiones de gases de efecto invernadero y los impactos en el suelo. De esta forma, se podrá consolidar esta tecnología como una opción integral dentro de los sistemas de saneamiento sostenible.

Agradecimientos. Las autoras agradecen al Proyecto ANID/FONDAP/1523A0001

Referencias

Adugna, A., Andrianisa, H., Konate, Y. & Maiga A. 2019. Fate of filter materials and microbial communities during vermifiltration process. *Journal of Environmental Management* 242, 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.076>

Arif, A., Sorour M. & Aly, S. 2020. Cost analysis of activated sludge and membrane bioreactor WWTPs using CapdetWorks simulation program: Case study of Tikrit WWTP (middle Iraq). *Alexandria Engineering Journal* 59, 4659-4667. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.08.023>

Arora, S. & Kazmi, A. 2015. The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermifilter for wastewater treatment. *Water Research* 74, 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.001>

Arora, S., Rajpal, A., Kumar, T., Bhargava, R., & Kazmi, A. 2014. Pathogen removal during wastewater treatment by vermifiltration. *Environmental Technology* 35(19), 2493-2499. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.911358>

Arora, S., Saraswat, S., Rajpal, A., Shringi, H., Mishra, R., Sethi, J., Rajvanshi, J., Nag, A., Saxena, S., Kazmi, A.A. 2020. Effect of earthworms in removal and fate of antibiotic resistant bacteria (ARB) and antibiotic resistant genes (ARG) during clinical laboratory wastewater treatment by vermifiltration. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1101/2020.10.01.321885>

Arora, S., & Saraswat, S. 2021. Vermifiltration as a natural, sustainable, and green technology for environmental remediation: a new paradigm for wastewater treatment process. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100061>

Barrientos, A., Quezada, E., Gutiérrez, V., Gómez, G. y Vidal, G. 2024. Los vermifiltros, ¿es una alternativa para el tratamiento no convencional de las aguas residuales?. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería, ISSN 0718-6460 (versión impresa), ISSN 0719-3009 (versión en línea), número 74, 22 p. https://www.crhiam.cl/wp-content/uploads/2024/06/No74_Serie_comunicacional_CRHIAM_Los-vermifiltros-son-una-alternativa-para-el-tratamiento.pdf

Canfield, D., Kristensen, E. & Thamdrup, B. 2005. The phosphorus cycle. *Advances in Marine Biology*, 48, 419-440. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(05\)48011-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(05)48011-6)

Capowiez, Y., Gilbert, F., Vallat, A., Poggiale, J. & Bonzom, J. 2021. Depth distribution of soil organic matter and burrowing activity of earthworms—mesocosm study using X-ray tomography and luminophores. *Biology and Fertility of Soils* 57, 337-346. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01536-y>

- Castellar, J., Torrens, A., Buttiglieri, G., Monclús, H. Arias, H., Carvalho, P., Galvao, A., & Comas, J. 2022. Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for 51 decentralized water reuses in cities. *Journal of Cleaner Production* 340 130660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130660>
- Dey Chowdhury, S., & Bhunia, P. 2021. Simultaneous carbon and nitrogen removal from domestic wastewater using high rate vermifilter. *Indian Journal of Microbiology* 61(2), 218-228. <https://doi.org/10.1007/s12088-021-00936-4>
- Dey Chowdhury, S., Bhunia, P., & Surampalli, R. 2022. Sustainability assessment of vermifiltration technology for treating domestic sewage: A review. *Journal of Water Process Engineering* 50, 103266. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103266>
- Dey Chowdhury, S., Bhunia, P., Surampalli, R. & Zhang, T. 2024. Effects of bed depths and the ratio of aerobic to anaerobic zone on the performance of horizontal subsurface flow macrophyte-assisted high-rate vermifilters treating synthetic brewery wastewater. *Water Environment Research* 96, e10993. <https://doi.org/10.1002/wer.10993>
- Dey Chowdhury, S., Bhunia, P., Zhang, T., & Surampalli, R. 2023. Nitrogen transformation dynamics in macrophyte-assisted high-rate vermifilter treating domestic sewage. *Journal of Water Process Engineering* 55, 104171. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104171>
- Gerardi, M. 2007. ORP management in wastewater as an Indicator of Process Efficiency. YSI. Recuperado de <https://files.knowyourh2o.com/pdfs/ORP-YSI.pdf>
- Gutiérrez, V., Monsalves, N., Gómez, G., & Vidal, G. 2023a. Performance of a full-scale vermifilter for sewage treatment in removing organic matter, nutrients, and antibiotic-resistant bacteria. *Sustainability* 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086842>
- Gutiérrez, V., Gómez, G., Rodríguez, D., & Vidal, G. 2023b. Critical analysis of wastewater treatment using vermifilters: Operating parameters, wastewater quality, and greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11(3), 10, Article 109683. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109683>
- Huang, W., Zhao, Y., Wu, J., Zhang, J., & Zheng, Z. (2014). Effects of different influent C/N ratios on the performance of various earthworm eco-filter systems: Nutrient removal and greenhouse gas emission. *World Journal Microbiology and Biotechnology* 30(1), 109-118. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1430-1>
- Kesari, K., Soni, R., Jamal, Q., Tripathi, P., Lal, J., Jha, N., Siddiqui, M., Kumar, P., Tripathi, V., & Ruokolainen, J. 2021. Wastewater treatment and reuse: A review of its applications and health implications. *Water, Air, & Soil Pollution* 232, 208. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154>
- Kumar, T., Rajpal, A., Arora, S., Bhargava, R., Prasad, K., & Kazmi, A. (2016). A comparative study on vermifiltration using epigeic earthworm *Eisenia foetida* and *Eudrilus eugeniae*. *Desalination and Water Treatment* 57, 6347-6354. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1010230>
- Kumar, A. & Khwairakpam, M. 2024. A comparative study with vermifilter and geofilter for domestic wastewater treatment and its Phyto-toxicity efficacy. *Journal of Water Process Engineering* 60, 105245. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105245>
- López, D., Fuenzalida, D., Vera, I., Rojas, K. & Vidal, G. 2015. Relationship between the removal of organic matter and the production of methane in subsurface flow constructed wetlands designed for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 83, 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.037>
- Lourenço, N. & Nunes, L. 2017. Optimization of a vermifiltration process for treating urban wastewater. *Ecological Engineering*, 100, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.074>
- Luth, Robin, P., Germain, P., Lecomte, M., Landrain, B., Li, Y. S., & Cluzeau, D. 2011. Earthworm effects on gaseous emissions during vermifiltration of pig fresh slurry. *Bioresource*

Technology 102(4), 3679-3686.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.027>

Miito G., Alege, F., Harrison, J. & Ndegwa. 2024. Influence of earthworm population density on the performance of vermifiltration for treating liquid dairy manure. *Journal of Environmental Quality* 53, 1176-1187.
<https://doi.org/10.1002/jeq2.20626>

Miito, G., Alege, F. & Ndegwa, P. 2025. Enhancing dairy wastewater treatment: Effects of hydraulic and organic loading rates in vermifiltration systems. *Environmental Challenges* 20, 101207.
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101207>

Miito, G., Ndegwa, P., Alege, F., Coulibaly, S., & Harrison, J. 2022. Efficacy of a vermifilter at mitigating greenhouse gases and ammonia emissions from dairy wastewater. *Journal of Environmental Quality* 51(4), 644-655.
<https://doi.org/10.1002/jeq2.20367>

Nogales, R., Fernández, J., Delgado, L., Castillo, J. & Romero, E. 2020. Eco-friendly vermifiltration winery waste management: a pilot-scale study. *SN Applied Sciences* 2, 653.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2455-3>

ONU-Habitat. 2021. Progreso en el tratamiento de las aguas residuales. Estado mundial y necesidades de aceleración del indicador 6.3.1. De los ODS. Recuperado de https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/sdg6_indicator_report_631_progress-on-wastewater-treatment_2021_es.pdf

Pous, N., Barcelona, A., Sbardella, L., Gili, O., Hidalgo, M., Colomer, J., Serra, T. & Salvadó, V. 2021. Vermifilter and zooplankton-based reactor integration as a nature-based system for wastewater treatment and reuse. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 4, 100153.
<https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100153>

Rajpal, A., Arora, S., Bhatia, A., Kumar, T., Bhargava, R., Chopra, A., Kazmi, A. 2014. Co-treatment of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) and sewage by vermireactor. *Ecological Engineering*, 73, 154-161.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.012>

Ramallo, R. 2016. Tratamiento de Aguas Residuales. Editorial Reverté, Barcelona, España, 707 pp.

Saapi, S., Andrianisa, H., Zorom, M., Mounirou, L., Aurélien H., & Ahossouhe M. 2024. New developments on vermifiltration as a bio-ecological wastewater treatment technology: Mechanism, application, performance, modelling, optimization, and sustainability. *Heliyon* 10 e25795.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25795>

Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R. 2017. A mechanistic review on vermifiltration of wastewater: Design, operation and performance. *Journal of Environmental Management* 197, 656-672.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.042>

Singh, R., Bhunia, P. & Dash, R. 2018. Understanding intricacies of clogging and its alleviation by introducing earthworms in soil biofilters. *Science of The Total Environment* 633, 145-156.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.156>

Singh, R., D'Alessio, M., Jahangeer, Meneses, Y., Bartelt-Hunt, S., & Ray, C. 2021. Nitrogen removal in vermifiltration: Mechanisms, influencing factors, and future research needs. *Journal of Environmental Management* 281, 111868.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111868>

Singh, R., Ray, C., Miller, D., Durso, L., Meneses, Y., Bartelt-Hunt, S. & D'Alessio, M. 2022. Effects of feeding mode on the performance, life span and greenhouse gas emissions of a vertical flow macrophyte assisted vermifilter. *Clean Water* 5, 31.
<https://doi.org/10.1038/s41545-022-00171-4>

Sinha, R., Bharambe, G., & Chaudhari, U. 2008. Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *The Environmentalist* 28(4), 409-420. <https://doi.org/10.1007/s10669-008-9162-8>

Sinha, R., Patel, U., Soni, B., Li, Z. 2014. Earthworms for safe and useful management of solid wastes and wastewaters, remediation of contaminated soils and restoration of soil fertility, promotion of organic farming and mitigation of global warming: A review. *Journal of Environment and Waste Management*, 1(1), 11-25.

Sistema Tohá. 2024.
<https://sistematoha.cl/newSistematoha/> (último
acceso 17 /02 / 2026).

Somarriva-Reyes, R.J. & Guzman-Guillén, F.
2004. Guía de Lombricultura. Guía Técnica N°
4. Universidad Nacional Agraria, Managua
(Nicaragua), 20p. Edu.ni.
[https://repositorio.una.edu.ni/2409/1/nf04s693.
pdf](https://repositorio.una.edu.ni/2409/1/nf04s693.pdf)

SISS - Superintendencia de Servicio Sanitario
(2022). Informe de gestión del sector sanitario
2022. Recuperado de
[https://www.siss.gob.cl/586/articles-
22969_recurso_1.pdf](https://www.siss.gob.cl/586/articles-22969_recurso_1.pdf)

Thorn, J., & Kerekes, E. 2001. Health effects
among employees in sewage treatment plants: A
literature survey. *American Journal of
Industrial Medicine* 40 170-179.
<https://doi.org/10.1002/ajim.1085>

UN Habitat and WHO, 2021. Progress on
wastewater treatment – Global status and
acceleration needs for SDG indicator 6.3.1.
United Nations Human Settlements Programme
(UN-Habitat) and World Health Organization
(WHO), Geneva. Recuperado de
[https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/08/
/sdg6_indicator_report_631_progress_on_wast
ewater_treatment_2021_english_pages.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/08/sdg6_indicator_report_631_progress_on_wastewater_treatment_2021_english_pages.pdf)

UNESCO 2025. Informe Mundial de las
Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los

Recursos Hídricos 2025.
<https://doi.org/10.54679/KQSF1046>

Vidal, G., & Araya, F. 2014. Las aguas servidas
y su depuración en zonas rurales: situación
actual y desafíos. Las aguas servidas y su
depuración en zonas rurales: situación actual y
desafíos”. Ediciones Universidad de
Concepción, ISBN 978-956-227-378-7,
Registro de Propiedad Intelectual 242.970 año
2014, 118 pp. [https://eula.udec.cl/giba/wp-
content/uploads/2017/09/las-aguas-servidas-y-
su-depuracion-en-zonas-rurales-situacion-
actual-y-desafios.pdf](https://eula.udec.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/las-aguas-servidas-y-su-depuracion-en-zonas-rurales-situacion-actual-y-desafios.pdf)

Yang, G., Xing, M., Liu, J. & Yang, J. 2017.
Optimizing vermifilter depth by process
performance collaborated with the evolutions of
microbial characteristics during sewage sludge
treatment. *Environmental Science and Pollution
Research* 24, 6688-
6697. [https://doi.org/10.1007/s11356-016-
8086-y](https://doi.org/10.1007/s11356-016-8086-y)

Zhao, Y., Zhang, Y., Ge, Z., Hu, C., & Zhang,
H. 2014. Effects of influent C/N ratios on
wastewater nutrient removal and simultaneous
greenhouse gas emission from the combinations
of vertical subsurface flow constructed
wetlands and earthworm eco-filters for treating
synthetic wastewater. *Environmental Science
Process & Impacts* 16(3), 567-575.
<https://doi.org/10.1039/c3em00655g>

TEMPORAL DEL 15 AL 20 DE JULIO DE 2026 EN CHILE: DURACIÓN CRÍTICA, PERÍODOS DE RETORNO E IMPACTOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Cristóbal Soto-Escobar¹, Mauricio Zambrano-Bigiarini²

RESUMEN

Entre el 15 y el 20 de julio de 2026, un temporal de larga duración produjo precipitaciones desde Ñuble hasta Atacama, con una señal particularmente anómala en Atacama y Coquimbo. Con datos horarios de ERA5-Land corregidos por sesgo y las curvas IDF de Soto-Escobar et al. (2026), se estimó el período de retorno (T) de máximos acumulados en ventanas móviles de 6 a 72 horas. En el valle del Limarí, las 72 horas más lluviosas acumularon cerca de 214 mm y se ubicaron en $T > 500$ años; en Punitaqui, 90 km al sur, cerca de 160 mm correspondieron a $T \approx 101$ años. La excepcionalidad depende, por tanto, de la magnitud, la duración y la climatología local.

El análisis utiliza 41 máximos anuales (1981-2021) ajustados con una distribución de Gumbel estacionaria y 1.000 remuestreos bootstrap. La fracción del área analizada con $T > 500$ años aumenta de 0 % en 6 y 12 horas a 0,8 % en 24 horas, 14,2 % en 48 horas y 20,5 % en 72 horas. Huasco concentra las mayores anomalías relativas y Coquimbo la mayor extensión espacial. Aproximadamente el 65 % de 649 reportes de emergencia de infraestructura del MOP se concentró en Coquimbo y Atacama.

Palabras clave: precipitación extrema, duración crítica, período de retorno, curvas IDF, ERA5-Land, infraestructura hidráulica.

ABSTRACT

Between 15 and 20 July 2026, a long-duration storm produced rainfall from Ñuble to Atacama, with a particularly anomalous signal in Atacama and Coquimbo. Using bias-corrected hourly ERA5-Land data and the IDF curves of Soto-Escobar et al. (2026), return periods (T) were estimated for moving windows from 6 to 72 h. In the Limarí valley, the wettest 72 h accumulated about 214 mm and fell within $T > 500$ years; in Punitaqui, 90 km farther south, about 160 mm corresponded to $T \approx 101$ years. Thus, rainfall magnitude alone does not determine rarity: duration and local climatology are equally important.

The analysis uses 41 annual maxima (1981-2021) fitted with a stationary Gumbel distribution and 1,000 bootstrap resamples. The fraction of the analysed continental area with $T > 500$ years rises from 0% at 6 and 12 h to 0.8% at 24 h, 14.2% at 48 h and 20.5% at 72 h. Inland Huasco shows the strongest relative anomalies, whereas Coquimbo has the largest spatial extent. Approximately 65% of 649 MOP infrastructure emergency reports occurred in Coquimbo and Atacama.

Keywords: extreme precipitation, critical duration, return period, IDF curves, ERA5-Land, hydraulic infrastructure.

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine, CA. cristobal.soto@uci.edu

² Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Temuco. mauricio.zambrano@ufrontera.cl

Entre el 15 y el 20 de julio de 2026, una sucesión de sistemas frontales produjo precipitaciones de larga duración entre Ñuble y Atacama. La señal fue especialmente anómala en Atacama y Coquimbo, en un contexto meteorológico caracterizado por un evento de El Niño en desarrollo y un transporte intenso de humedad desde el Pacífico tropical (CR2, 2026; Meteored, 2026). Más que un único pulso de alta intensidad, el episodio combinó desplazamiento espacial de los núcleos de precipitación y acumulaciones relevantes durante dos a tres días.

El objetivo de este trabajo es caracterizar la excepcionalidad hidrometeorológica del episodio en función de la intensidad, la acumulación, la duración y el período de retorno, y examinar su correspondencia espacio-temporal con impactos reportados por organismos públicos y sectores productivos. El énfasis se sitúa en una pregunta de interés directo para la ingeniería: qué duración de precipitación resultó más crítica respecto de la climatología local y, por tanto, qué escalas temporales deben considerarse al interpretar el riesgo para distintos tipos de infraestructura.

1. Excepcionalidad de las precipitaciones en distintos sectores de Chile

El contraste entre dos puntos de la Región de Coquimbo ilustra la diferencia entre magnitud y excepcionalidad. En las 72 horas más lluviosas, ERA5-Land estimó cerca de 214 mm en un punto del valle del Limarí y aproximadamente 160 mm en Punitaqui, unos 90 km al sur. Aunque ambas acumulaciones son elevadas, el análisis de frecuencias basado en Soto-Escobar et al. (2026) asigna $T \approx 101$ años a Punitaqui, mientras que el valor del Limarí se ubica en la categoría $T > 500$ años. Un período de retorno elevado no representa un intervalo determinista entre eventos, sino el inverso de la probabilidad anual de excedencia bajo el modelo probabilístico adoptado; esta distinción es esencial para evitar una interpretación calendárica de T (Serinaldi, 2015).

Este contraste resume la hipótesis central del estudio: una misma acumulación no tiene la misma rareza estadística en todos los climas. El grado de excepcionalidad depende de la magnitud y duración de la precipitación, pero también de la distribución local de extremos. En consecuencia, valores absolutos relativamente modestos pueden representar eventos muy raros en sectores áridos, mientras acumulaciones mayores pueden ser menos excepcionales en zonas con una climatología de precipitación más intensa.

El análisis meteorológico del CR2 (2026) describió la configuración sinóptica del temporal. Sobre esa base, este trabajo aborda tres preguntas hidrológicas complementarias:

- ¿cómo varió la excepcionalidad de la precipitación entre Atacama y Ñuble?;
- ¿qué duraciones —desde 6 hasta 72 horas— concentraron la señal estadísticamente más extrema?; y
- ¿cuánto dependen los períodos de retorno más elevados de la extrapolación más allá del registro 1981-2021?

2. Datos y metodología para estimar la excepcionalidad

Se utilizaron datos horarios de la versión preliminar de ERA5-Land, reanálisis terrestre de Copernicus derivado de ERA5 y diseñado para proporcionar campos horarios espacialmente continuos de variables de superficie (Muñoz-Sabater et al., 2021). Para cada celda se calcularon los máximos acumulados mediante ventanas móviles de 6, 12, 24, 48 y 72 horas. El uso de ventanas móviles evita que un máximo sea dividido artificialmente por límites horarios o diarios fijos, aspecto relevante en el análisis de extremos subdiarios y en la construcción de relaciones IDF (Morbideilli et al., 2017, 2020).

Para una duración d , la precipitación acumulada P_d corresponde a la lámina total registrada dentro de la ventana móvil más lluviosa y se expresa en milímetros. La intensidad media asociada se calculó

como $i_d = P_d/d$ y se expresa en mm/h. Esta distinción permite separar dos comportamientos hidrológicamente diferentes: pulsos breves de alta intensidad y episodios de intensidad moderada cuya duración prolongada produce acumulaciones elevadas.

Las intensidades máximas de cada duración se compararon con las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de cada celda, construidas a partir de máximos anuales de ERA5-Land para 1981-2021 mediante una distribución de Gumbel estacionaria, siguiendo Soto-Escobar et al. (2026). Ese trabajo desarrolló curvas IDF para Chile a partir de productos grillados subdiarios y 161 estaciones con control de calidad, y evaluó explícitamente el desempeño y los sesgos de los productos grillados. El uso de datos espaciales para derivar curvas IDF amplía la cobertura regional, pero exige cautela frente al suavizado de máximos y a los sesgos dependientes de la fuente y de la duración (Marra et al., 2017; Ombadi et al., 2018).

La rareza estadística se expresa mediante el período de retorno T . Bajo el modelo estacionario ajustado, $T = 100$ años equivale a una probabilidad anual de excedencia de aproximadamente 1 %. No implica que el evento ocurra regularmente una vez cada cien años ni que su ocurrencia reinicie un período de espera. La interpretación debe ser especialmente prudente cuando T supera ampliamente la longitud de la muestra, porque la estimación pasa a depender en forma creciente de la estructura de la distribución y de su cola extrema (Serinaldi, 2015; Haruna et al., 2023).

Los cálculos se realizaron sobre el producto ERA5-Land corregido por sesgo, con resolución de $0,1^\circ$ (aproximadamente 10 km sobre Chile). Esta resolución es adecuada para caracterizar patrones regionales y comparar espacialmente la severidad del episodio, pero una celda representa un promedio espacial y no una observación pluviográfica puntual. Gradientes orográficos, núcleos convectivos y otros procesos de escala subgrilla pueden quedar

suavizados (Muñoz-Sabater et al., 2021; Marra et al., 2017).

Por tanto, los resultados deben interpretarse como estimaciones espacialmente consistentes para diagnóstico regional, no como sustitutos de observaciones in situ en una localización específica. Esta limitación es particularmente relevante al trasladar los resultados a diseño: la selección de una lluvia de proyecto requiere considerar la escala de la obra, la disponibilidad de registros locales y la incertidumbre asociada al producto grillado.

3. Distribución espacial de la intensidad y la precipitación acumulada

La Figura 1 muestra que la duración del temporal estuvo acompañada por un cambio espacial de los máximos. En la ventana de 6 horas, el mayor acumulado del área de estudio se localizó en el valle del Limarí, cerca de Ovalle, con aproximadamente 61 mm, equivalentes a una intensidad media de 10,2 mm/h. Al ampliar la ventana, los máximos acumulados se desplazaron progresivamente hacia sectores cordilleranos: alrededor de 143 mm en 24 horas y cerca de 288 mm en 72 horas.

Cada panel de la Figura 1 representa, para cada celda, la ventana continua con mayor acumulación dentro de la duración indicada, expresada como intensidad media. La escala común permite comparar directamente la magnitud de las intensidades entre duraciones y distinguir el efecto de promediar pulsos intensos dentro de intervalos cada vez más largos.

Como es esperable, la intensidad media máxima disminuye al aumentar la duración, mientras la precipitación acumulada máxima aumenta. Esta dependencia es relevante para ingeniería porque distintos sistemas integran la lluvia sobre escalas temporales diferentes: drenajes urbanos y alcantarillas suelen responder a duraciones cortas, mientras cuencas de mayor tamaño, sistemas fluviales, laderas y embalses pueden responder a acumulaciones de varias horas o días.

Un resultado clave es que los sectores con mayor intensidad o acumulación absoluta no coinciden necesariamente con aquellos de mayor período de retorno. En sectores interiores de Atacama, intensidades relativamente bajas pueden ser

estadísticamente muy raras debido a la climatología local. Por ello, la severidad hidrometeorológica debe evaluarse simultáneamente en términos absolutos y relativos.

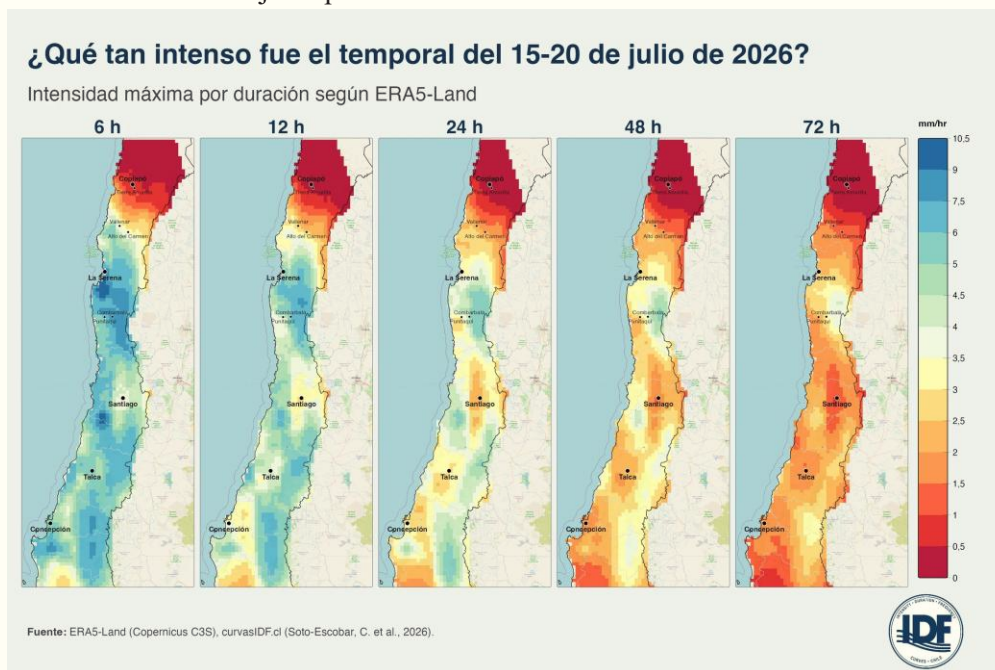


Figura 1. Intensidad media máxima estimada, para ventanas móviles de 6, 12, 24, 48 y 72 horas. Cada panel muestra, para cada celda de la grilla, la ventana continua de su respectiva duración con la mayor precipitación acumulada durante el episodio. La escala es común a los cinco paneles. Datos horarios de la versión preliminar de ERA5-Land (Copernicus C3S), corregidos por sesgo.

La Figura 2 amplía el campo de intensidades medias máximas en Atacama y Coquimbo. Para 6 horas se observa el mayor contraste espacial: el interior de Atacama, especialmente entre Copiapó y Tierra Amarilla, presenta valores inferiores a 0,5 mm/h, mientras sectores costeros e interiores de Coquimbo, entre La Serena y el valle del Limarí, alcanzan aproximadamente 10,5 mm/h.

Al aumentar la duración, el contraste espacial de la intensidad media disminuye. En 72 horas, el interior de Atacama permanece por debajo de 0,5 mm/h y el entorno de Vallenar se sitúa en torno a 1-2 mm/h. Sectores próximos a La Serena y Combarbalá, entre los máximos a 6 horas, presentan intensidades medias inferiores a aproximadamente 4 mm/h a 72 horas. Esta reducción refleja el promedio temporal; no una disminución de la precipitación acumulada. La Figura 3 presenta la precipitación máxima

acumulada asociada a cada duración, obtenida como el producto entre la intensidad media máxima y la duración de la ventana. Así, cada panel representa el mayor acumulado registrado en cualquier intervalo continuo de 6, 12, 24, 48 o 72 horas dentro del episodio. El rango de acumulaciones aumenta desde aproximadamente 61 mm en 6 horas hasta cerca de 288 mm en 72 horas. La escala categórica se amplía con la duración para preservar contraste espacial en las ventanas cortas y evitar que los valores queden comprimidos por el mayor rango de las ventanas largas. La evolución espacial confirma que la severidad del episodio no estuvo determinada únicamente por pulsos breves de alta intensidad. Al aumentar la duración, es mayor la superficie con acumulaciones elevadas y el núcleo de máximos se desplaza hacia sectores cordilleranos, mostrando la importancia de precipitaciones durante 48-72 horas.

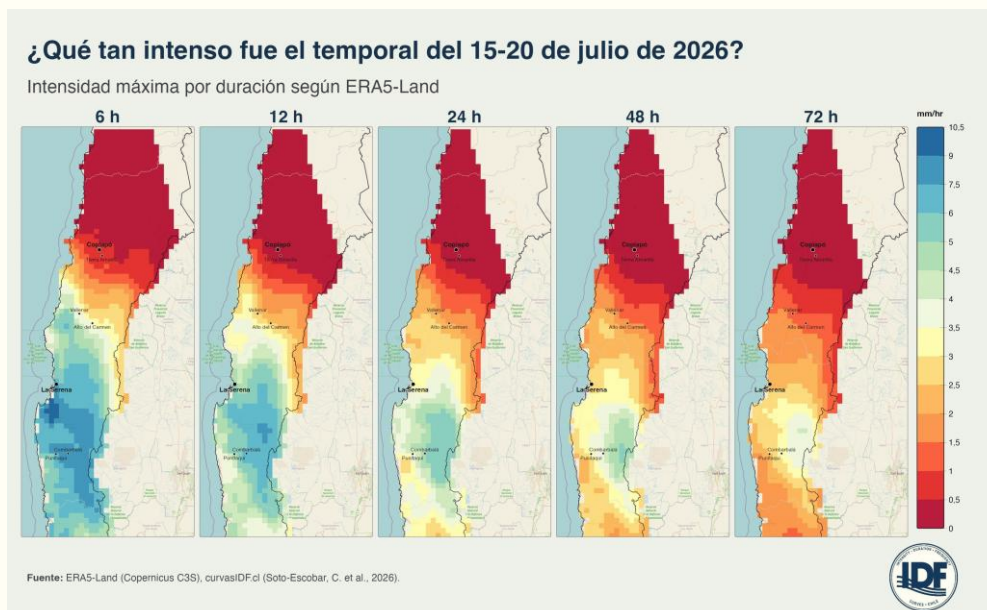


Figura 2. Intensidad media máxima estimada, en milímetros por hora, para ventanas móviles de 6, 12, 24, 48 y 72 horas, con foco en Atacama y Coquimbo. La escala, la paleta de colores y la fuente de datos son las mismas que en la Figura 1. Datos horarios de la versión preliminar de ERA5-Land (Copernicus C3S), corregidos por sesgo.

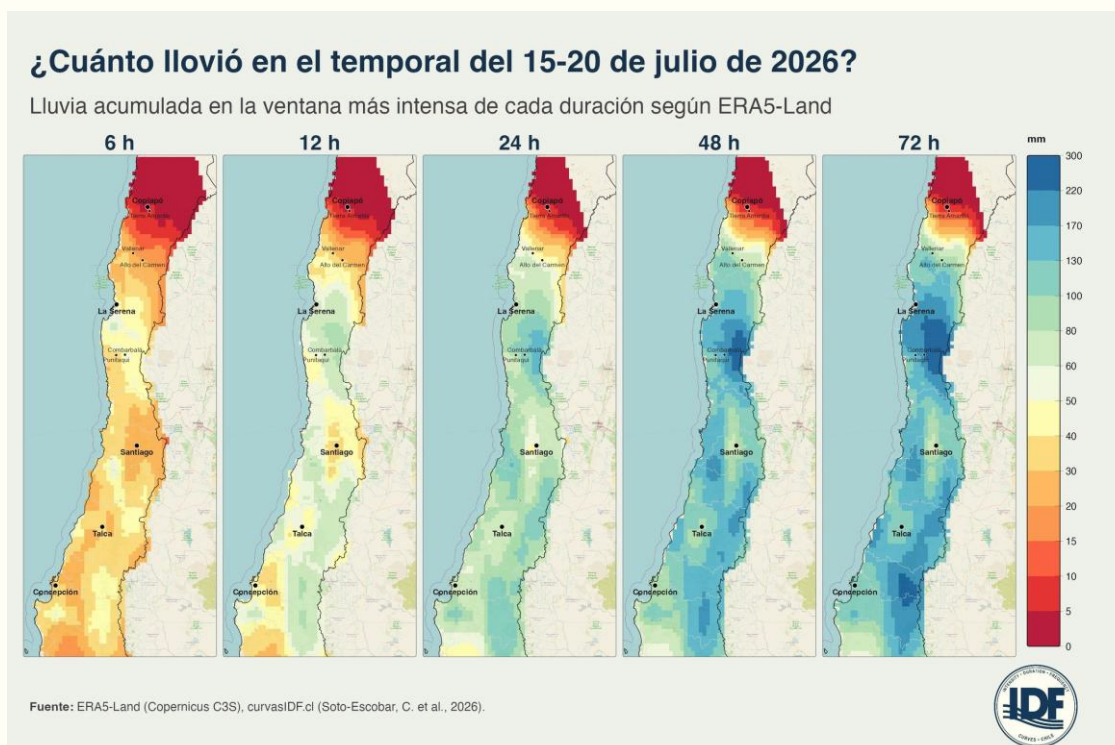


Figura 3. Precipitación máxima acumulada, dentro de la ventana más lluviosa de cada duración. Los valores se obtienen multiplicando la intensidad media máxima de la Figura 1 por la duración correspondiente. Los valores mostrados no representan la precipitación total de los seis días del evento, sino el máximo acumulado en cualquier ventana continua de 6, 12, 24, 48 o 72 horas de duración dentro de la tormenta. Datos horarios de la versión preliminar de ERA5-Land (Copernicus C3S), corregidos por sesgo.

La Figura 4 muestra estos acumulados con foco en Atacama y Coquimbo. El interior de Atacama permanece por debajo de aproximadamente 5 mm en las cinco duraciones, mientras hacia el sur los acumulados aumentan de forma marcada. Para 24

horas, sectores próximos a La Serena y el valle del Limarí alcanzan aproximadamente 60-100 mm; en 72 horas, amplios sectores entre La Serena, Combarbalá y Punitaqui alcanzan del orden de 220-300 mm.

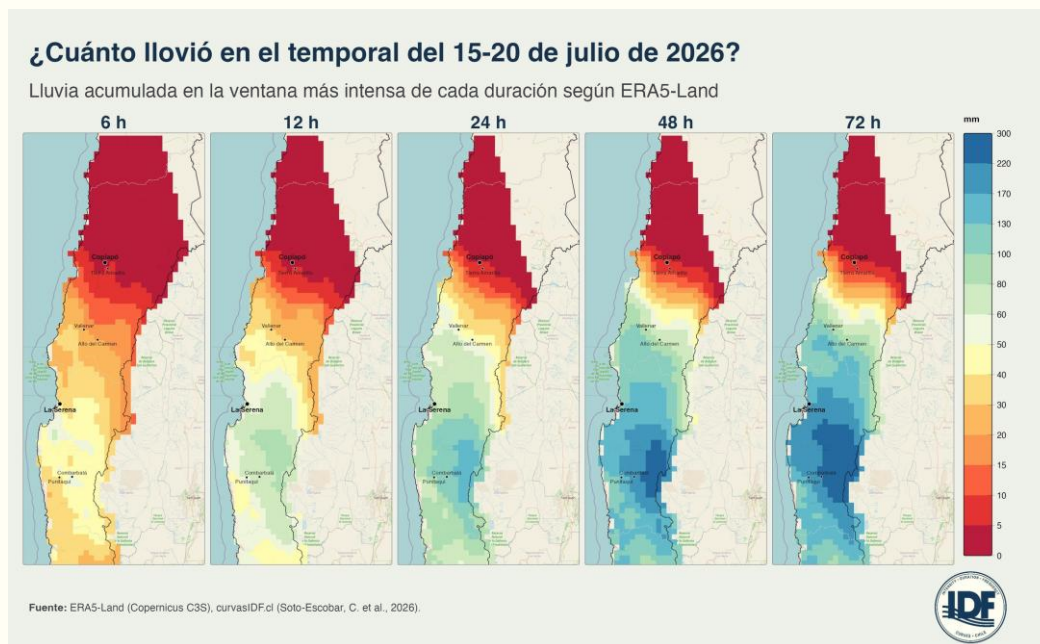


Figura 4. Precipitación máxima acumulada, en milímetros, dentro de la ventana temporal más lluviosa de cada duración, con un foco espacial en las regiones de Atacama y Coquimbo. La escala, paleta de colores y fuente de datos son las mismas que en la Figura 3.

Las Figuras 3 y 4 no representan la precipitación total de los seis días. Cada celda contiene el máximo acumulado dentro de una ventana móvil de duración fija, cuyo instante de inicio puede variar espacialmente. Por ello, los máximos de dos celdas vecinas no necesariamente corresponden al mismo intervalo temporal.

La precipitación total del episodio se presenta en el panel izquierdo de la Figura 9. Mantener esta distinción es fundamental: los máximos móviles responden a la pregunta de qué acumulación fue crítica para una duración determinada, mientras el total del evento describe el volumen precipitado durante el período completo.

4. Distribución espacial de los períodos de retorno

Al expresar la precipitación respecto de la climatología local de extremos, el patrón espacial

cambia sustancialmente. La mayor excepcionalidad se concentra en el interior de la provincia de Huasco, cerca de 28° S, donde se estiman los mayores períodos de retorno para 24, 48 y 72 horas. Esta zona no coincide con los máximos absolutos de intensidad o acumulación, sino con aquella donde el episodio se separó con mayor magnitud de la distribución histórica de máximos.

Coquimbo constituye la segunda zona más excepcional y aquella donde la señal extrema alcanza mayor extensión espacial: 47 % de la superficie regional se ubica en $T > 500$ años para 48 horas y 64 % para 72 horas. Entre Valparaíso, la Región Metropolitana y O'Higgins predominan valores más moderados y localizados, y en varios sectores la ventana de 48 horas es más extrema que la de 72 horas. Esto es consistente con que cada duración posee su propia distribución de máximos

anuales; por tanto, T no tiene por qué aumentar monótonamente con la duración.

La Figura 5 sintetiza los períodos de retorno para las cinco duraciones. La escala culmina en una categoría abierta $T > 500$ años, que agrupa todas las estimaciones superiores. Esta decisión evita atribuir precisión espuria a valores muy alejados de los 41 años de información utilizados para el ajuste. El

resultado relevante es la expansión de las áreas con excepcionalidad extrema en 48 y 72 horas: 14,2 % y 20,5 % del área continental analizada, respectivamente, frente a 0 % en 6 y 12 horas y 0,8 % en 24 horas. En Atacama y Coquimbo, por tanto, la señal más excepcional estuvo asociada a acumulaciones de dos a tres días, no a intensidades horarias extraordinarias.

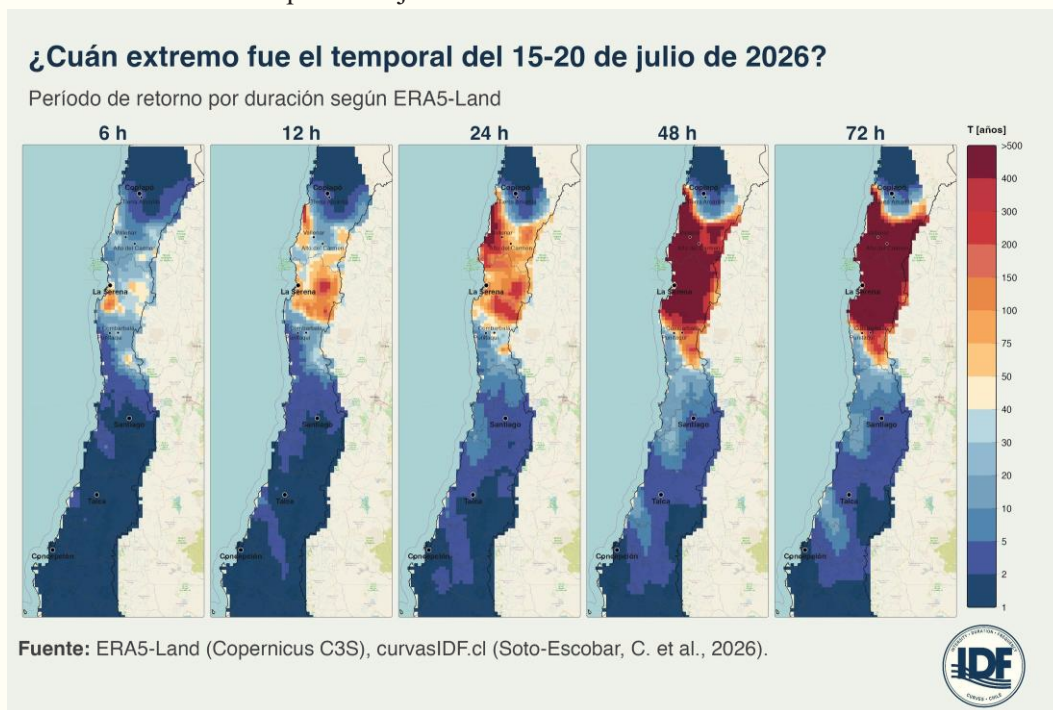


Figura 5. Período de retorno estimado del temporal para ventanas móviles de 6, 12, 24, 48 y 72 horas. La escala se extiende desde 1 año hasta una categoría abierta de «más de 500 años», que agrupa todas las estimaciones superiores a ese umbral. Los períodos de retorno se obtuvieron mediante el ajuste de una distribución de Gumbel estacionaria a máximos anuales de 1981-2021, siguiendo Soto-Escobar et al. (2026).

La Figura 6 muestra esta evolución con mayor detalle en Atacama y Coquimbo. A 24 horas, $T > 500$ años aparece en focos relativamente aislados, principalmente en el interior de Huasco y sectores próximos a La Serena. A 48 horas, estos focos se expanden y conforman una franja de valores extremos entre Copiapó y el valle del Limarí. A 72 horas, la categoría superior ocupa gran parte del interior de ambas regiones y se prolonga hacia Combarbalá y Punitaqui, donde se aprecia una transición hacia valores del orden de 100-400 años. Este patrón confirma que los mayores períodos de retorno no coinciden necesariamente con los

mayores montos absolutos. En el norte árido, acumulaciones comparativamente moderadas pueden ubicarse muy lejos de la climatología local de extremos. La evaluación de rareza requiere, por tanto, contextualizar cada acumulación en su distribución local y para su duración específica.

5. Incertidumbre, extrapolación y supuestos del análisis

Los períodos de retorno más elevados no deben interpretarse como frecuencias directamente observadas ni como estimaciones de igual precisión

en todo su rango. Vallenar (Figura 7) ilustra esta diferencia: para 24 horas, el temporal alcanzó una intensidad media de 2,3 mm/h y fue el segundo mayor valor entre los 41 máximos anuales, solo por debajo de 1997. Una posición de trazado empírica sitúa el segundo máximo de una muestra de 41 años

en torno a $T \approx 21$ años, mientras la distribución de Gumbel ajustada asigna aproximadamente $T \approx 235$ años. La diferencia refleja dos conceptos distintos: posición dentro de la muestra observada frente a probabilidad de excedencia inferida mediante un modelo paramétrico.

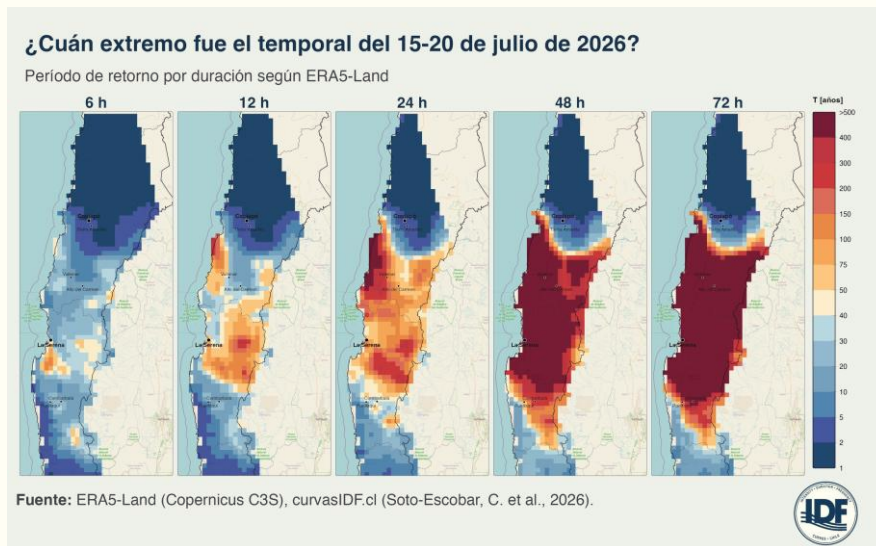


Figura 6. Período de retorno estimado del temporal, en años, para ventanas móviles de 6, 12, 24, 48 y 72 horas, con foco en Atacama y Coquimbo. Se utiliza la misma escala y metodología de la Figura 5; la categoría «más de 500 años» debe interpretarse como una clase abierta de excepcionalidad extrema, no como una recurrencia precisa.

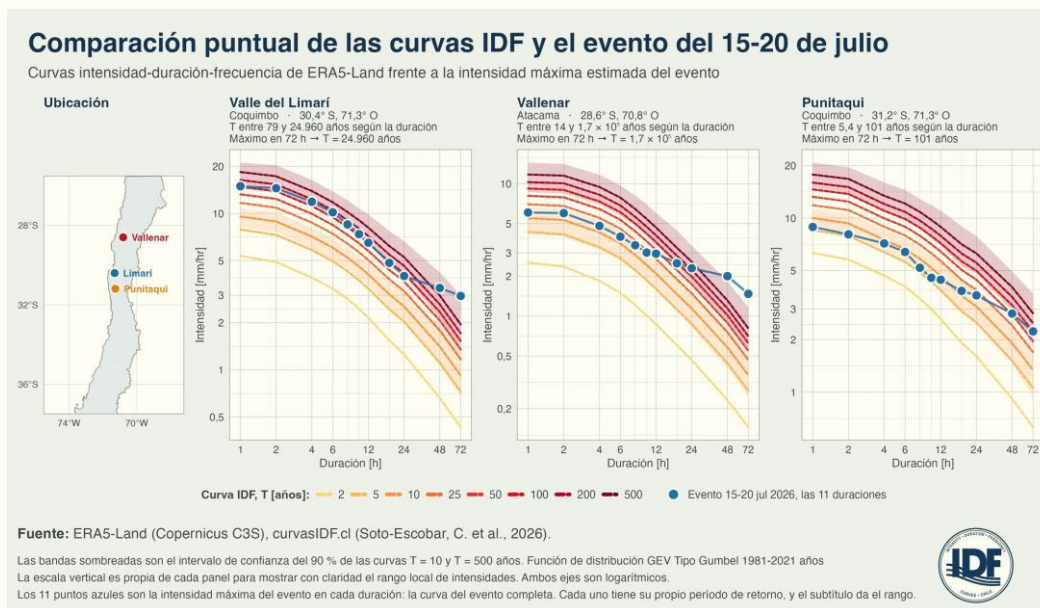


Figura 7. Curvas intensidad-duración-frecuencia de ERA5-Land frente a las intensidades medias máximas estimadas durante el temporal en Vallenar, valle del Limarí y Punitaqui. Las líneas de colores cálidos corresponden a curvas IDF para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. Los once puntos azules unidos representan las intensidades máximas del evento para once duraciones entre 1 y 72 horas. Las bandas sombreadas muestran intervalos bootstrap del 90 % para las curvas de $T = 10$ y $T = 500$ años. Ambos ejes se representan en escala logarítmica y cada panel utiliza su propia escala vertical.

La discrepancia puede amplificarse en regiones áridas, donde numerosos años presentan máximos pequeños y unos pocos episodios son mucho mayores. En ese contexto, pequeños cambios en la intensidad o en los parámetros de la distribución pueden traducirse en grandes variaciones de T . El valor del período de retorno debe interpretarse conjuntamente con la posición del evento respecto del registro, la incertidumbre de los parámetros y la incertidumbre estructural asociada a la elección del modelo de extremos (Serinaldi, 2015; Haruna et al., 2023).

Para cuantificar la incertidumbre de muestreo, la distribución de Gumbel se reestimó 1.000 veces mediante remuestreo con reemplazo de los 41 máximos anuales. El procedimiento bootstrap cuantifica la sensibilidad de las estimaciones a la longitud limitada de la serie. La incertidumbre aumenta rápidamente cuando la intensidad del evento se aproxima o supera el extremo superior del rango observado. En Vallenar, para 48 horas, incluso el límite inferior del intervalo bootstrap del 90 % corresponde a $T \approx 963$ años, lo que indica que, bajo el modelo adoptado, el evento queda muy alejado de la climatología de máximos utilizada para el ajuste.

Este resultado no implica que el período de retorno «real» sea, como mínimo, 963 años. Cuando toda la distribución bootstrap se sitúa muy por encima de la longitud del registro, la extrapolación domina la inferencia. En ese régimen es más robusto concluir que el evento fue extraordinariamente infrecuente respecto de 1981-2021 que asignarle una recurrencia numérica precisa. La categoría $T > 500$ años debe interpretarse precisamente de ese modo: como un indicador de excepcionalidad extrema y elevada

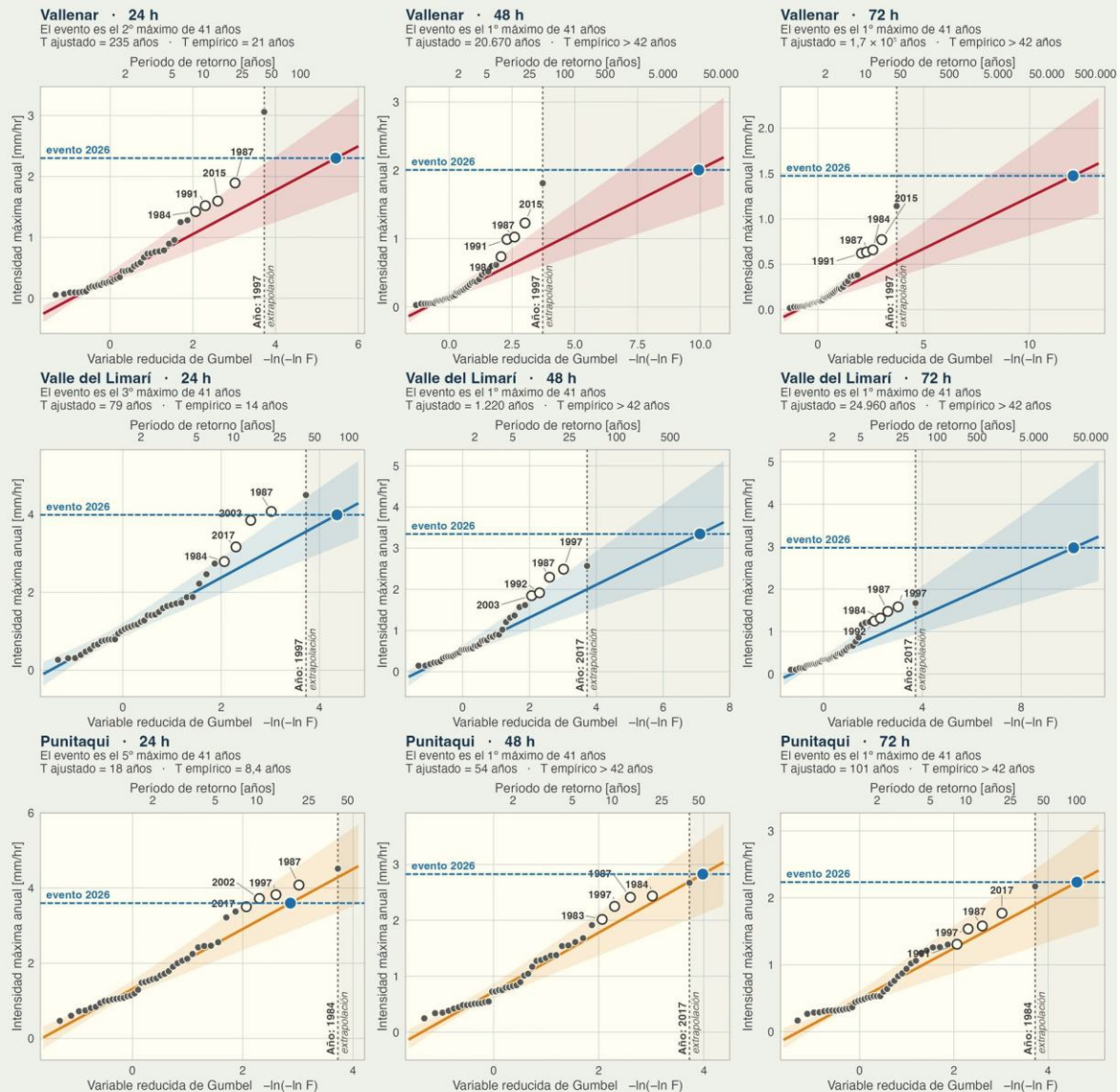
dependencia del modelo, no como un calendario de recurrencia.

Además de la incertidumbre de muestreo, existe una incertidumbre estructural asociada al supuesto de estacionariedad. Las curvas utilizadas describen una climatología de referencia 1981-2021 mediante una distribución estacionaria; este supuesto es operativo para comparar el episodio, pero no implica que la distribución de extremos sea invariante en el tiempo. La no estacionariedad inducida por variabilidad y cambio climático es un problema reconocido en el análisis de frecuencias hidrológicas y en la actualización de curvas IDF (Milly et al., 2008; Schlef et al., 2023). Soto-Escobar et al. (2026) evaluaron formulaciones estacionarias y no estacionarias para Chile y encontraron diferencias generalmente pequeñas en las intensidades estimadas, especialmente para duraciones largas; aun así, el supuesto debe explicitarse al interpretar períodos de retorno extremos.

La Figura 8 permite visualizar este problema. Sus nueve paneles comparan los 41 máximos anuales, la distribución de Gumbel, el intervalo de incertidumbre y la posición del temporal de 2026 en Vallenar, valle del Limarí y Punitaqui para 24, 48 y 72 horas. La línea vertical marca el máximo observado en 1981-2021; a su derecha, toda estimación requiere extrapolación. Punitaqui permanece relativamente próximo al rango histórico, mientras Vallenar se separa claramente de los máximos observados para las duraciones largas. La figura permite distinguir entre períodos de retorno respaldados por observaciones cercanas y aquellos controlados principalmente por el comportamiento asumido de la cola.

Tres regímenes, tres ajustes: la incertidumbre del período de retorno del temporal del 15-20 de julio de 2026

Gráfico de Función de distribución Gumbel (EV1) para ERA5-Land. Puntos grises: los 41 máximos anuales 1981-2021. Recta: el ajuste. Banda: IC 90 %



Fuente: ERA5-Land (Copernicus C3S), curvas IDF.cl (Soto-Escobar, C. et al., 2026).

Cada fila es una ubicación y cada columna una duración. La escala vertical es propia de cada panel: los tres lugares difieren en su rango de intensidad.

El punto azul marca dónde el ajuste sitúa al evento; la línea azul, su intensidad estimada. La distancia horizontal entre el punto azul y la nube de datos es la magnitud de la extrapolación.

La línea gris vertical marca el límite del registro: a su derecha ya no hay observaciones. Sobre esa misma línea cae el máximo anual más alto del registro, y el rótulo indica el año en que ocurrió.

Los 4 puntos blancos rotulados son los 4 máximos anuales que siguen al evento de mayor magnitud.



Figura 8. Gráficos de probabilidad del ajuste de Gumbel. Las filas corresponden a Vallenar, el valle del Limari y Punitaqui, mientras que las columnas corresponden a duraciones de 24, 48 y 72 horas. Los puntos grises representan los 41 máximos anuales de ERA5-Land durante 1981-2021. Los cuatro puntos blancos rotulados corresponden a los años de mayor magnitud después del máximo histórico, mientras que el punto azul representa el temporal de 2026. La línea corresponde al ajuste de Gumbel y la banda sombreada a su intervalo de confianza del 90%, estimado mediante remuestreo “bootstrap”. La línea vertical gris indica el máximo observado durante 1981-2021, identificado por su año de ocurrencia; los valores situados a su derecha se encuentran fuera del rango observado y, por tanto, corresponden a extrapolaciones del modelo probabilístico. Cada panel utiliza su propia escala vertical.

6. Evolución espacio-temporal de la precipitación y las emergencias

El episodio presentó un desplazamiento marcado de sur a norte. La precipitación se concentró inicialmente en Maule y Biobío durante el 15 y 16 de julio, alcanzó la zona central el día 17 y se intensificó posteriormente sobre Coquimbo y Atacama durante el 19 y 20 de julio. El máximo horario estimado en el área analizada se localizó cerca de 30,6° S el 19 de julio alrededor de las 21:00, con aproximadamente 11,2 mm/h.

Durante los seis días, el MOP registró 649 reportes de emergencia de infraestructura: 240 leves, 255 moderados, 135 graves y 19 muy graves. La Dirección de Vialidad concentró 461 registros (71 %). Coquimbo acumuló 311 reportes y Atacama 110; en conjunto, ambas regiones reunieron aproximadamente el 65 % del total. El máximo diario se produjo el 20 de julio, con 238 reportes, cuando la banda principal de precipitación se había desplazado hacia el norte.

La Figura 9 integra tres perspectivas: precipitación total del evento, distribución espacial y severidad de los reportes del MOP, y evolución horaria conjunta de lluvia y emergencias en función de la latitud. En el panel derecho, el color representa la intensidad horaria máxima estimada en cada franja latitudinal y los puntos muestran los reportes de emergencia.

Para preservar la señal de los núcleos de precipitación más intensos, en cada franja latitudinal y hora se utilizó la máxima intensidad entre las longitudes continentales, no el promedio zonal. La representación reproduce el desplazamiento de la banda de precipitación de sur a norte y permite comparar su paso con la secuencia temporal de impactos.

La evolución espacio-temporal muestra una correspondencia notable entre el desplazamiento de la precipitación y la secuencia de emergencias. Los reportes se concentran en franjas y períodos próximos al paso de los principales núcleos de

lluvia, mientras los eventos graves y muy graves se agrupan especialmente en Coquimbo y Atacama, regiones donde las duraciones de 48-72 horas fueron también las más excepcionales.

Esta correspondencia no demuestra causalidad para cada emergencia. La respuesta de una obra depende de la precipitación antecedente y acumulada, del tamaño y tiempo de concentración de la cuenca, de la humedad previa del suelo, de la geomorfología y capacidad de drenaje, del estado de conservación de la infraestructura y de la exposición territorial. Además, la hora de registro puede diferir del instante físico en que se inició el daño.

En la franja entre 31° y 30° S, la mediana de la hora de reporte ocurrió 9,2 horas después del máximo horario de precipitación. Ese desfase combina procesos hidrológicos con tiempos operacionales de detección, verificación, catastro y comunicación; por tanto, no debe interpretarse directamente como el tiempo de respuesta de las cuencas.

La comparación con los períodos de retorno aporta una dimensión adicional: en Coquimbo y Atacama, las acumulaciones de 48 y 72 horas fueron climatológicamente mucho más excepcionales que las intensidades de corta duración. Para sistemas cuya respuesta integra precipitación durante varias horas o días, la duración del aporte puede ser tan relevante como el máximo horario. La duración crítica específica, sin embargo, depende de la escala de la cuenca y del mecanismo de falla de cada obra.

El balance humano y material confirma la severidad del episodio. Según el balance de SENAPRED reportado por CNN Chile, se registraron 13 personas fallecidas, 18 desaparecidas, 18.254 damnificadas, más de 1.700 albergadas y 45.108 aisladas, principalmente en Coquimbo y Atacama. En viviendas se informaron 1.679 destruidas, 8.492 con daño mayor, 34.741 con daño menor y 552 en evaluación. Estas cifras describen exposición e impacto; no constituyen por sí solas una relación causal con un determinado umbral de precipitación.

Evolución de la Lluvia y emergencias MOP en el tiempo durante el evento

Lluvia acumulada del evento y evolución temporal de la lluvia y las emergencias reportadas por el MOP

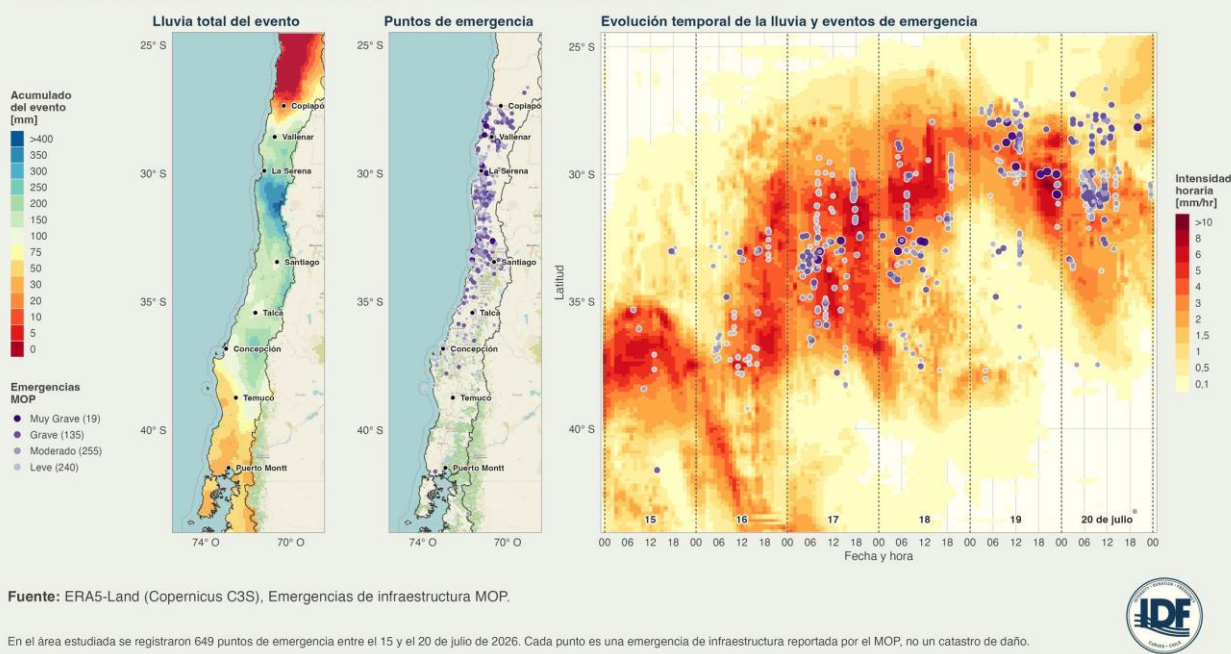


Figura 9. Evolución de la precipitación y de las emergencias de infraestructura durante el temporal, representada mediante tres vistas complementarias. A la izquierda, precipitación total acumulada durante el evento, en milímetros. Al centro, localización de los 649 reportes de emergencia de infraestructura registrados por el MOP entre el 15 y el 20 de julio de 2026, con tamaño y color de los símbolos según su nivel de gravedad. A la derecha, evolución conjunta de ambas variables: el eje horizontal representa la fecha y hora en horario continental de Chile, el eje vertical la latitud y el color la máxima intensidad horaria estimada dentro de cada franja latitudinal, calculada sobre todas las longitudes continentales y no como un promedio zonal. Los puntos corresponden a los mismos reportes de emergencia, localizados según su hora y latitud. Fuentes: ERA5-Land (Copernicus C3S) y registros de emergencias de infraestructura del MOP.

En infraestructura pública, el MOP estimó al 27 de julio un requerimiento de US\$400-500 millones para recuperar daños en Coquimbo y la provincia de Huasco, cifra que podría alcanzar US\$700 millones al incorporar pasivos previamente acumulados en caminos, recursos hídricos y telecomunicaciones. Se trata de una estimación preliminar de necesidades de reconstrucción, no de una cuantificación atribuible exclusivamente al temporal.

En minería, la CTMIN estimó un impacto económico agregado de US\$120-235 millones para el período 13-26 de julio en cinco regiones, integrando pérdidas de producción, sobrecostos operacionales, logística de emergencia y efectos indirectos. La cifra depende de supuestos productivos y del precio del cobre, por lo que debe interpretarse como una estimación sectorial

preliminar y no como una medición directa de pérdidas atribuibles únicamente al episodio del 15-20 de julio.

7. Efectos hidrológicos y sectoriales

El temporal modificó de manera importante las reservas superficiales. Entre los boletines hidrológicos de la DGA del 13 y del 27 de julio, el volumen almacenado en los 25 embalses monitoreados aumentó de 3.713 a 5.215 millones de metros cúbicos. Según los valores consignados en dichos boletines, el conjunto se encontraba 21,1 % por debajo del volumen de 2025 antes del episodio y quedó 10,8 % por encima después de este.

El aumento fue especialmente marcado en Coquimbo: La Paloma pasó de 35,9 a 202,2 millones de metros cúbicos, Cogotí de 15,2 a 123,1 millones

de metros cúbicos y Recoleta alcanzó su capacidad de almacenamiento. Estas variaciones muestran que un mismo extremo puede producir simultáneamente daños y aumentos de disponibilidad hídrica. Sin embargo, el cambio entre boletines no equivale a una conversión directa de la lluvia en almacenamiento: incorpora aportes de cuenca, tiempos de tránsito, extracciones, condiciones antecedentes y reglas de operación.

En agricultura, la SNA informó el 20 de julio que no observaba hasta ese momento impactos generalizados sobre la producción, aunque sí daños importantes en caminos, puentes, sistemas de riego, redes eléctricas y conectividad rural. La cifra de hasta US\$200 millones difundida durante esos días correspondía a estimaciones preliminares de terceros y no a una evaluación económica elaborada directamente por la SNA.

Los efectos fueron, por tanto, espacial y sectorialmente heterogéneos. El aumento del almacenamiento y la continuidad de parte de la producción agrícola coexistieron con daños severos en infraestructura, conectividad, sistemas de riego y viviendas. Beneficios y pérdidas ocurrieron en lugares, escalas temporales y sistemas distintos y no deben compensarse entre sí en la evaluación del riesgo.

8. Discusión: duración crítica, climatología local e impactos

El resultado más robusto es que la excepcionalidad del temporal estuvo asociada principalmente a la duración de las precipitaciones y a las acumulaciones en ventanas de 48-72 horas, más que a intensidades horarias extraordinarias. La fracción del área continental analizada con $T > 500$ años es 0 % para 6 y 12 horas, 0,8 % para 24 horas, 14,2 % para 48 horas y 20,5 % para 72 horas. Esto no implica lluvia continua durante todo el intervalo: indica que los máximos acumulados evaluados sobre dos y tres días se alejaron mucho más de la climatología de extremos que las duraciones cortas.

La duración crítica no es uniforme espacialmente. En Atacama y Coquimbo, la mayor excepcionalidad se concentra en 72 horas; entre Valparaíso, la Región Metropolitana y O'Higgins, en varios sectores la señal máxima ocurre a 48 horas y disminuye a 72 horas. La razón es estadística e hidrológica: cada duración posee una distribución distinta de máximos anuales y cada sistema integra la lluvia sobre una escala temporal propia.

Desde la perspectiva de ingeniería, la selección de una lluvia de diseño no debería basarse automáticamente en la mayor duración disponible. La duración relevante debe ser consistente con el tiempo de concentración, el almacenamiento y los procesos dominantes del sistema analizado. Redes urbanas y alcantarillas pueden estar controladas por minutos u horas; cuencas mayores, sistemas fluviales, laderas y embalses pueden responder a acumulaciones de varias decenas de horas o días.

El análisis confirma además que magnitud absoluta y excepcionalidad climatológica no son equivalentes. El máximo de 6 horas se localizó en el valle del Limarí, con aproximadamente 61 mm (10,2 mm/h de intensidad media), mientras los mayores períodos de retorno se localizaron varios grados de latitud más al norte, principalmente en el interior de Huasco, con intensidades absolutas considerablemente menores.

Esta diferencia es crítica en un país con gradientes climáticos tan marcados como Chile. Una misma acumulación puede ocupar posiciones muy distintas dentro de las distribuciones locales de extremos. En 72 horas, por ejemplo, el valle del Limarí acumuló cerca de 214 mm y Punitaqui aproximadamente 160 mm, pero sus períodos de retorno se ubicaron en categorías sustancialmente diferentes.

La distribución espacial de la excepcionalidad también coincide, en términos generales, con la concentración de emergencias de infraestructura: Coquimbo y Atacama reunieron cerca del 65 % de los reportes del MOP y fueron las regiones donde las precipitaciones de larga duración alcanzaron los mayores períodos de retorno. El máximo diario de

reportes ocurrió el 20 de julio, cuando la banda principal de precipitación ya se había desplazado al norte.

La coincidencia espacio-temporal es consistente con una relación entre acumulaciones prolongadas e impactos, pero no permite atribuir cada falla exclusivamente a la lluvia. La respuesta depende de la hidrología de cada cuenca, las condiciones antecedentes, la exposición, la vulnerabilidad y el estado previo de la infraestructura. Para establecer mecanismos causales se requieren datos homogéneos sobre condición de las obras, umbrales hidráulicos y procesos de falla.

9. Implicancias para el diseño y conclusiones

El temporal no presentó una única firma estadística en todo el territorio. En Atacama y Coquimbo, la singularidad principal fueron las acumulaciones de 48 y 72 horas; entre Valparaíso y O'Higgins, la señal más excepcional se concentró preferentemente en 48 horas; y en Maule y Ñuble predominaron períodos de retorno menores. Por ello, el episodio no puede caracterizarse adecuadamente mediante una sola cifra de intensidad, acumulación o período de retorno.

La misma conclusión aplica al diseño y evaluación de infraestructura hidráulica: no existe una duración crítica universal. Cada obra debe analizarse con precipitaciones consistentes con su ubicación, escala espacial y tiempo de respuesta. La duración de diseño de una alcantarilla urbana puede ser muy distinta de la que controla el caudal de un río, la estabilidad de una ladera o el funcionamiento de un vertedero.

curvasIDF.cl proporciona una plataforma abierta para explorar curvas intensidad-duración-frecuencia en Chile y comparar duraciones y períodos de retorno de forma espacialmente consistente. Su uso resulta especialmente valioso para diagnóstico regional, pero no reemplaza la revisión de

observaciones locales ni el análisis hidráulico específico requerido por cada proyecto.

Las curvas IDF relacionan intensidad, duración y frecuencia de la precipitación extrema, pero su uso en diseño debe considerar explícitamente la resolución de los datos, la incertidumbre de muestreo y de modelo, y el supuesto de estacionariedad. La literatura hidrológica ha mostrado que la estacionariedad no puede asumirse de manera automática en un clima cambiante (Milly et al., 2008; Schlef et al., 2023). El análisis presentado aquí caracteriza la rareza del evento respecto de 1981-2021 y no constituye un estudio de atribución climática; cuantificar la contribución del calentamiento antropogénico requeriría experimentos específicos de atribución (Neelin et al., 2022; Martínez-Villalobos y Neelin, 2023).

Herramienta: curvasidf.cl

Artículo: Soto-Escobar, C., Zambrano-Bigiarini, M., Tolorza, V., and Garreaud, R.: Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves using sub-daily gridded and in situ datasets: characterising precipitation extremes in a drying climate, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 30, 91–117, <https://doi.org/10.5194/hess-30-91-2026>

Referencias

- [1] Soto-Escobar, C., Zambrano-Bigiarini, M., Tolorza, V. y Garreaud, R. (2026). Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves using sub-daily gridded and in situ datasets: characterising precipitation extremes in a drying climate. *Hydrology and Earth System Sciences*, 30, 91-117. <https://doi.org/10.5194/hess-30-91-2026>
- [2] SENAPRED, nuevo balance del sistema frontal reportado por CNN Chile. <https://www.cnnchile.com/pais/nuevo-balance-de-senapred-por-sistema-frontal-se-mantienen-13-fallecidos-y-aumentan-a-18-los-desaparecidos/>
- [3] MOP, estimación de reconstrucción al 27 de julio de 2026 (La Tercera). <https://www.latercera.com/nacional/noticia/mop-estima-hasta-us-700-millones-para-reconstruccion-en-atacama-y-coquimbo-tras-temporal/>
- [4] Dirección General de Aguas, boletines hidrológicos. <https://dga.mop.gob.cl/servicios-de-informacion/boletines/>

- [5] SNA, balance del sistema frontal del 20 de julio de 2026. <https://www.sna.cl/2026/07/20/balance-sistema-frontal/>
- [6] CTMIN, impacto en minería (Acero y Roca). <https://aceroyroca.com/2026/07/30/noticias-ctmin-informe-impacto-temporales-mineria-chile/>
- [7] CR2 (2026). El evento extremo 15-20 de julio de 2026 en el marco de El Niño en desarrollo. <https://www.cr2.cl/el-evento-extremo-15-20-de-julio-2026-en-el-marco-de-el-nino-en-desarrollo/>
- [8] Meteored (2026). El Niño y un río atmosférico categoría 4: las claves del histórico temporal que golpeó a Chile. <https://www.meteored.cl/noticias/actualidad/el-nino-y-un-rio-atmosferico-categoria-4-las-claves-del-historico-temporal-que-golpeo-a-chile.html>
- [9] MINVU (2026). Capítulo 5. Diseño de aguas lluvias urbanas. Manual de Pavimentación y Aguas Lluvias. <https://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/doc/MPALL/mpall3docs/Cap%205%20Diseño%20elementos%20Urbanos%20de%20Infraestructura%20de%20Aguas%20Lluvia.s.pdf>
- [10] MOP (2025). Manual de Carreteras, edición 2025.
- [11] Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., et al. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- [12] Marra, F., Morin, E., Peleg, N., Mei, Y. y Anagnostou, E. N. (2017). Intensity-duration-frequency curves from remote sensing rainfall estimates: comparing satellite and weather radar over the eastern Mediterranean. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 2389-2404. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2389-2017>
- [13] Morbidelli, R., Saltalippi, C., Flammini, A. y Govindaraju, R. S. (2017). Effect of temporal aggregation on the estimate of annual maximum rainfall depths for the design of hydraulic infrastructure systems. *Journal of Hydrology*, 554, 710-720. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.050>
- [14] Morbidelli, R., García-Marín, A. P., Mamun, A. A., et al. (2020). The history of rainfall data time-resolution in a wide variety of geographical areas. *Journal of Hydrology*, 590, 125258. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125258>
- [15] Ombadi, M., Nguyen, P., Sorooshian, S. y Hsu, K.-I. (2018). Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves from satellite-based precipitation: methodology and evaluation. *Water Resources Research*, 54, 7752-7766. <https://doi.org/10.1029/2018WR022929>
- [16] Serinaldi, F. (2015). Dismissing return periods! *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29, 1179-1189. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0916-1>
- [17] Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., et al. (2008). Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 319, 573-574. <https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- [18] Schlef, K. E., Kunkel, K. E. y Brown, C. (2023). Incorporating non-stationarity from climate change into rainfall frequency and intensity-duration-frequency (IDF) curves. *Journal of Hydrology*, 616, 128757. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128757>
- [19] Neelin, J. D., Martínez-Villalobos, C., Stechmann, S. N., et al. (2022). Precipitation extremes and water vapor: relationships in current climate and implications for climate change. *Current Climate Change Reports*, 8, 17-33. <https://doi.org/10.1007/s40641-021-00177-z>
- [20] Martínez-Villalobos, C. y Neelin, J. D. (2023). Regionally high risk increase for precipitation extreme events under global warming. *Scientific Reports*, 13, 5579. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32372-3>
- [21] Haruna, A., Blanchet, J. y Favre, A.-C. (2023). Modeling intensity-duration-frequency curves for the whole range of non-zero precipitation: a comparison of models. *Water Resources Research*, 59, e2022WR033362. <https://doi.org/10.1029/2022WR033362>

VALDIVIA 1960, Mw 9.5 A TESTIMONY OF MY OWN

Raúl Labbé ¹

RESUMEN

El 22 de mayo de 1960, la ciudad de Valdivia (Chile) fue azotada por un terremoto de magnitud Mw 9,5, considerado el evento sísmico de mayor magnitud jamás registrado. El autor fue testigo presencial de este suceso en el centro de Valdivia. Ante la falta de datos provenientes de registros locales o de campo cercano para este evento de gran relevancia en la literatura sismológica, el autor describe las características observables del terremoto y el contexto urbano —en cuanto a las edificaciones existentes en aquel entonces—, ofreciendo una visión general de los fallos y los comportamientos más favorables observados en dichas estructuras. Se analiza brevemente el comportamiento satisfactorio de los edificios que eran nuevos en el momento del sismo, y se describen los efectos inmediatos del hundimiento del terreno en la zona a través de un caso particular de daños severos.

Palabras clave: Valdivia, Terremoto 1960, colapso, subsidencia, inundación.

ABSTRACT

On May 22, 1960, the city of Valdivia, Chile, was hit by an Mw 9.5 earthquake, which has been assessed as the largest seismic event ever recorded. The author is a living witness of this event, in downtown Valdivia. In the absence of data from local or near field records for this significant event in seismic literature, the author provides an account of the observable features of the earthquake, the background of the city in terms of the existing buildings at the time and a general view of some of their failures and best performances. Satisfactory behavior of the new buildings, existing at the time of the earthquake, is briefly rationalized. The immediate effects of subsidence in the area are described through a particular damaging case.

Keywords: Valdivia, 1960 Earthquake, collapse, subsidence, flooding.

¹ Senior Structural Engineer, Independent Consultant labberaul@hotmail.com

1 Introduction

In the afternoon of May 22, 1960, the city of Valdivia was hit hard by a major earthquake. This event was later assessed $M_w = 9.5$, being considered the largest ever recorded [1]. However, no instrumental records are available from local sources for this earthquake. Therefore, accounts from direct observations on the earthquake itself, may play an important role, for providing further insight about.

Historical predecessors of this earthquake, from 16th century onwards, have been greatly assessed in their magnitudes, through the accounts in prints and manuscripts of the time [2]. This presentation is due also to be helpful in providing useful information to the seismic literature of the 1960 earthquake in Valdivia.

This text is limited to report observations in the city of Valdivia and primarily by the downtown area and its surroundings. The overview provided for the buildings was mainly performed on the basis of direct knowledge of these buildings before and after the earthquake, observations of collapses and observations of remains and demolition works. No drawings, nor documents were available for this report.

To allow for a better understanding of the effects of the earthquake, it has been considered appropriate to outline the sort of buildings existing at the time. Following a brief presentation of these building categories, the damage & no-damage situations are exemplified through comments and available pictures of the time. Some thoughts are raised in terms of the good performance exhibited in some of these buildings. These situations are compared with a specific case of structural damage as produced in an existing building, new at the onset of the earthquake.

Subsidence produced by the earthquake was very damaging in the countryside and in waterfronts. A

description is provided where the subsidence resulted in direct impact on population and dwellings.

2. Valdivia, May 22, 1960. The Earthquake

The account of the earthquake should have started the day before, since on the May 21 holiday, early in the morning, a tremor was felt in Valdivia. This is not remembered as a significant nor a worrying quake at home. Later that day, the big news of an earthquake in Concepción, reached out, pointing at this early tremor.

Sunday 22, the Big Shaking:

- Place: At home, some blocks away from Plaza de la República (main square), in downtown. Some minutes before 3:00 p.m. a sudden tremor is felt: a violent but brief quake.

- Place: At Plaza de la República, in front of Prales building (Figure 1).

Some minutes after 3:00 p.m. the movement starts with visible undulations in the surrounding pavement. Cars parked around start to shake with noise. The building in front is shaken violently.

- Place: Now, at the center of the square, on a green lawn (= full free field condition).

Very violent and extremely high frequency waves on the lawn surface. Keeping standing is very difficult. Some buildings or building components start crashing down. A cloud of dusting concrete powder from this crash invades the square. The roar intensifies with the collapses in the surrounding streets.

The shaking is prolonging too much, rising to an intensity peak, then it starts diminishing somewhat. However, this decrease is small and very brief, just seconds for the shaking to start increasing again and reaching a second peak. The second peak was perceived to be higher than the first one.



Figure 1 – Around Plaza de la República, after the earthquake. R.Schild photo.

The main shaking is over and there was no chance (no way) of verifying the duration of the movement. Presumably, it should have been not less than 5 min.

- Place: The walkway in Picarte street.

The huge shaking is over, some minutes ago. However, once some tranquility is regained, later and with detail close attention, a ground oscillation could still be perceived. This lasting slow rocking was interpreted, as a natural outcome of the huge ground shaking experienced moments before. In this moment, the clock was showing 40 minutes after 3:00 p.m. i.e. nearly half an hour from the start of the earthquake and certainly, this time was not a cut-off for that hardly perceived non-stopping rocking movement.

In view of my experience² in four earthquakes in Chile the observed most relevant features, distinguishing this 1960 earthquake, may be ranked as follows:

- The extremely high frequency surface waves.
- The long duration.

- The two distinctive peaks of intensity.
- The lasting rocking ground movement was perceived several minutes after the main shaking.

Aftermath of the Earthquake:

After the earthquake, during frequent aftershocks, direct news came regarding the tsunami that struck the port of Corral, around 20 Km down river away from Valdivia. Also, a couple of days later, the news revealed that volcanic eruptions have been triggered. This was the Puyehue-Caulle volcano system, some 120 Km SW from Valdivia. At the same time, worrying information indicated that Lake Riñihue was blocked. In fact, massive landslides had produced the blockage of the lake, located some 80 Km upstream from Valdivia. This situation endangered the city, since a sudden failure of this new basin lock would cause large flooding and destruction downstream. Precedents of this scenario were documented, regarding an historic sixteenth century earthquake This context added to public concern about the direct consequences of the earthquake, victims, destruction, lack of energy, lack of water and supplies, etc. etc.

² Three other earthquakes, as I had experienced not in epicentral area and some of them, not in free field

Aftershocks lasted a long time, some of them being very strong.

3. Valdivia Buildings in 1960 and their performance

3.1 Wood Construction

The buildings existing at the time of the 1960 earthquake, result from various developments of the town. However, wood construction has existed throughout every time period, being considered the natural way of building at this zone of Chile.

From old times, wood construction provided private houses, industrial warehouses, schools, hotels, etc., many of which were existing during the earthquake. Likewise, two- or three-story wooden multi-family dwellings were common in the historic setting of Valdivia. They used to be protected with exterior metal sheets for better preservation (Figure 2).

These buildings, when well preserved and well prepared for the southern windy storms, have been proven to be seismic proof by themselves. Condition that was also observed during the 1960 earthquake.



This common and widespread practice of wood construction had an important role in the resulting lesser rate of failures and victims, throughout the area affected by the earthquake.

3.2 Masonry-Wood Combinations

There were good construction systems for small dwellings involving masonry and wood. When well organized e.g. with properly confined masonry at base levels and top wood stories, these systems had a good performance, during the quake.

On the other hand, there was a widespread mixture in wood-masonry or wood-concrete construction, lacking the essential integrity for lateral strength. This non-engineering scheme resulted from the addition of fire-protection concrete walls, in wooden buildings. Also, the incorporation of concrete ornate facades over wood constructions, resulted in these non-natural combinations. Almost all these non-engineering hybrid systems suffered complete failures during the earthquake. (Figure 3)



Figure 2 – An hybrid construction at the left (UACH photo) (heavy ornate façade over wood building). Right: Total destruction after the quake in a rear view. Note the great deal of contrast with the background undamaged constructions, made out solely of wood



Figure 3 –Main Fire Station, at the nearby of Plaza de la República. Reinforced Concrete construction (1936). Before and after the earthquake, with the reinforced concrete tower collapsed over the street.

3.3 Building from the beginning of XX Century

At the beginning of XX century, the city of Valdivia was coming out of a huge fire that devastated all downtown and the main commercial and business quarter close to the riverside (Figure 4). The reconstruction after this event involved new buildings in reinforced concrete and some composite steel-concrete constructions. Buildings for offices, corporations and commercials, were renovating the river front and downtown with these construction types.

These buildings exhibited varying degrees of performance during the earthquake (Figure 5). Major failures were found in the composite buildings. After the failures, it became evident that in some cases, these buildings included composite steel-brick, instead of concrete, with disastrous results.

There are not many samples of reinforced concrete (RC) buildings from that time. In general, they performed well with some notable cases, still standing nowadays (Figure 6).



Figure 4 – Buildings from the beginning of XX century, at the riverside. Left: before (photo LIFE) and Right: after the earthquake



Figure 5 – Same buildings as above, showing also destruction of the quay after the earthquake. Both buildings on the corner were composite steel-concrete construction. They suffered severe damage and were demolished. Despite they were settled in very bad soil [3], the pattern of damage seemingly did not reflect a governing foundation failure. In fact, after demolition, their supporting piles came into sight in good standing, including steel ties, in between.



Figure 6 – A good example of endurance in a building from the beginning of XX century. On the left, after the earthquake, in the foreground are the remains of a composite steel-concrete construction. Apparently, some demolition works would have started, since that degree of destruction was not common for that type of building. At the corner in the background, an undamaged RC building from 1926. This building has been preserved in good shape up to the present day (color picture on the right). It is provided with sound concrete walls all along the back sides and all the rest is made up of RC frames. Certainly, the good result is showing also construction quality and remarkable workmanship.

3.4 Building from the 40s and 50s

Following the trend of the previous years, the construction during the 1940's and 50's, was mainly developed in reinforced concrete. Now, besides offices and hotels, also some apartment buildings were developed.

A couple of constructions completed by the end of the 30s are to be included in this group also. These are Cervantes Building and the Regional Hospital, both in reinforced concrete, with quite different performance, one from another, during the earthquake.

The Cervantes Building, completed in 1935, with a good arrangement of abundant walls is practically a reinforced concrete fortress. In general, it performed well during the earthquake. Conversely, the Hospital building opened in 1939 resulted with significant damage that led to demolition. The building was a reinforced concrete structure eight stories high. (Figure 7 and Figure 8).

All in all, at this time, the totality of the constructions in question in the city happened to be low-rise buildings, no more than six or eight stories high, at most. By that time, Valdivia was a city on a human scale (Figure 9).



Figure 7 – Two different buildings from the late 30s. Left: Cervantes Building, built by 1935. Right: the building of Regional Hospital (postcard). This hospital was fully occupied during the earthquake and suffered serious structural damage that led to demolition. Soil conditions were fairly good in both cases, somewhat better at the site of Cervantes Building [3].



Figure 8 – The damaged Hospital, at the background, in a rear view (Photo K. Steinbrugge Slides)



Figure 9 – The good downtown buildings of the 50s. Those in the pictures exhibited very good performance during the earthquake. All of them are settled in good soil conditions. At the lower right corner Hotel Pedro de Valdivia. (See comments in point 4).

4 The good performance of RC buildings from the 50s.

As pointed out before, in Valdivia up to 1960, urban fabric was defined solely by low-rise buildings, no more than six or eight stories high. Several of these buildings, settled in good soil condition, exhibited very good performance during the earthquake. Most of them were standing fully functional, just after the quake. They were rather squat buildings with abundant shear walls. Anyway, they should have borne very high seismic forces, as reflected in the violent shaking witnessed at the Prales building. The rationale underlying this good performance does not entail nothing new in seismic-resistant design. Herein, only the main features as observed in these buildings are listed below, in terms that they are judged to contribute in their good standing:

- Widespread foot-print area, as compared with height of building.
- Structural regularity throughout the building height
- Plan Symmetry
- Lots of redundancy
- Absence of non-structural partitions.
- Mainly buildings with shear walls. (In Hotel Pedro de Valdivia, there was a combination with frames). In some cases, a well provided system of spandrel beams with piers, practically emulates the role of a shear wall. All these buildings were later informed, as standing in good soil conditions [2].

5. The Trauma Hospital Case

Before the earthquake, the building for the Hospital Traumatológico (HT), had recently been finished,

but it had not been put into use at the time. In Figure 10, a partial elevation still shows signs and the fence of the construction works. Upon [2], this RC building is settled in fairly good soil conditions, but it suffered significant damage during the earthquake. For a building with the functionality of a hospital, certainly, it was not easy to produce a development for the optimal structural conditions set out before, in point 4. This resulted in various deviations from that pattern of good buildings from the 50s. In fact, plan asymmetries and less density of walls, added to



Figure10 - Hospital Traumatológico Partial Elevation. (photo K. Steinbrugge).

6. The subsidence

Subsidence caused by the earthquake at the area of Valdivia was very damaging in the countryside and to the industries located by the riverside. Several sources have assessed around 2 m, for the land level sinking in the city [5]. In times before the earthquake, there was a vigorous commercial and industrial activity along the riverside, in front of the downtown area. Because of this, this sinking drew more attention in this area, where the collapse of the quays added more disruption to the riverside.

constructions deficiencies [4], produced failures and the building was pronounced not habitable. However, it is proper to note that in this scenario of a deficient construction facing such a severe earthquake, the structure was quite far from a tendency to collapse. Moreover, the building was recoverable and after structural retrofit works [4], it was set into service up to the present day (Figure 11 shows some structural additions through one elevation).



Figure - 11 The recovered building nowadays

The subsidence, being quite evident by the riverside, could be ignored by people experiencing the earthquake away from the waterfront. Conversely, the inhabitants of “Islote Haverbeck” (small island located downstream away of the quays of downtown area. Before the earthquake, the place provided housing for numbers of workers and families of the shipping company with headquarters in front of the island) went through a tough time, when their homes were abruptly flooded, by the ground sinking produced by the earthquake.

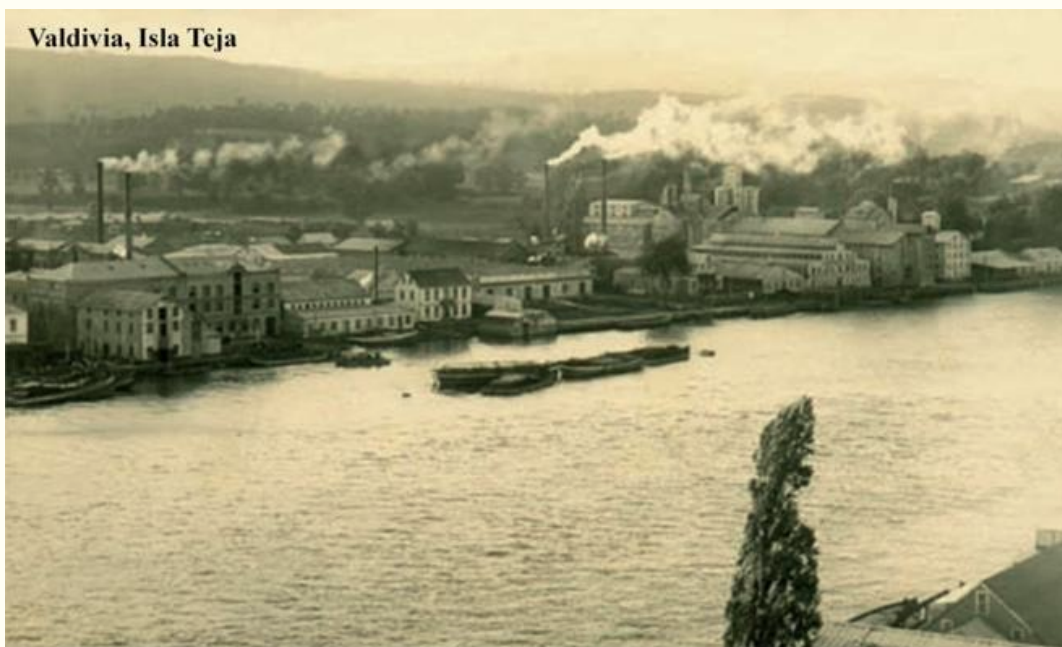


Figure 12 - Industrial area by the riverside, before the earthquake (photo G. Saelzer).



Figure 13 – Some of the industrial area shown above, flooded after the earthquake. A partial view from another side of the river.



Figure 14 – Left: Frontal view of the old quay, before the earthquake, showing some 3 m from water level to top of quay. Right: After the earthquake, the collapsed quay and the apparent raised water level.

The presence of a cargo ship moored nearby was the savior means to rescue and lodging the families onboard. This event is underlined, because usually the subsidence is not addressed as a factor in the assessment of the direct impacts that the earthquake produces in dwellings and people.

In essence, the situation shown herein calls for a wider view when qualifying the severity of this earthquake.



Figure 15 – Left: The houses at Islote Haverbeck flooded after the earthquake. Right: the cargo ship that participated in the rescue and provided lodging to the evacuees. In that picture, seemingly the flooding is being increased after releasing the blockage in lake Riñihue (in point 2, see Aftermath of the Earthquake)

7. Conclusions

The 1960 earthquake severely struck the city of Valdivia, on May 22. Being considered the largest earthquake ever recorded, in fact, the violent and long-lasting shaking experienced downtown and several other immediate consequences, may attest the category assigned to this event.

An account of the earthquake main shaking, as experienced in free field conditions, reveals unique issues. Including the very long duration, extremely high frequency in surface waves, which are quite difficult to describe, the two maxima in intensity and the lasting ground rocking perceived several minutes after the main shaking.

The magnitude of the event is also reflected in direct outcomes which produced additional disruption in the life of the city. The massive landslides in Lake Riñihue, followed by the emptying worked out later, increased the flooding effects resulting from subsidence. The latter was a damaging event, with direct impact on people, dwellings and industries.

The city setting in Valdivia, by the end of the 50s, showed a human scale development, with low rise buildings and abundant wood construction. This scenario greatly helped in reducing the possibility of failures and damages in building.

In fact, the most contributing factors to failures were poor soil conditions in specific areas and the hybrid constructions (non-engineering systems including concrete and/or masonry fire walls or ornate heavy facades, incorporated on wooden assemblies). Almost all these types of buildings collapsed, even when settled in good soil conditions.

Conversely, most constructions made out solely of wood, were undamaged, when settled in good soil conditions.

Also, old buildings from the beginning of XX century, which used to be composite steel-concrete constructions, were badly damaged. This situation occurred, both in office and industrial buildings. Reinforced concrete buildings of that time

performed better and those from the 40s and 50s, with few exceptions, exhibited good performance during the earthquake.

This well performance in the RC low-rise buildings of the 50s, for some of them, even reached the objective of standing fully functional after the earthquake. Besides construction quality, they also benefited from some of the widely known main commandments of seismic resistance for buildings, redundancy, regularity and symmetry.

The description on the subsidence issue provides an insight on the impact and the degree of damage that this direct outcome of the earthquake, produced in some dwellings and people, besides the effects in the countryside and riverside industries.

8. Disclaimer

Efforts have been made to identify as much as possible the authors or sources of the pictures included in this text. Because of the long time elapsed from 1960, a comprehensive recollection was not possible. Therefore, the pictures with sources not identified in the text, are original from the author, or constitute unknown source.

References

- [1] Kanamori H. Revisiting the 1960 Chilean Earthquake – For the 50th anniversary.
- [2] Cisternas M. Atwater B. et al. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. 2005
- [3] Barozzi R. y Lemke R. Mapa del Suelo de Fundación de Valdivia. 1961-1962
- [4] Flores R, 4th World Conference on Earthquake Engineering. Presentation. 1969.
- [5] Villalobos F. Crustal Deformation Associated with the 1960 Earthquake Events in the South of Chile. 2011.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

EMPRESA CONSTRUCTORA GUZMÁN Y LARRAÍN SpA

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

Empresas de Ingeniería Colaboradoras

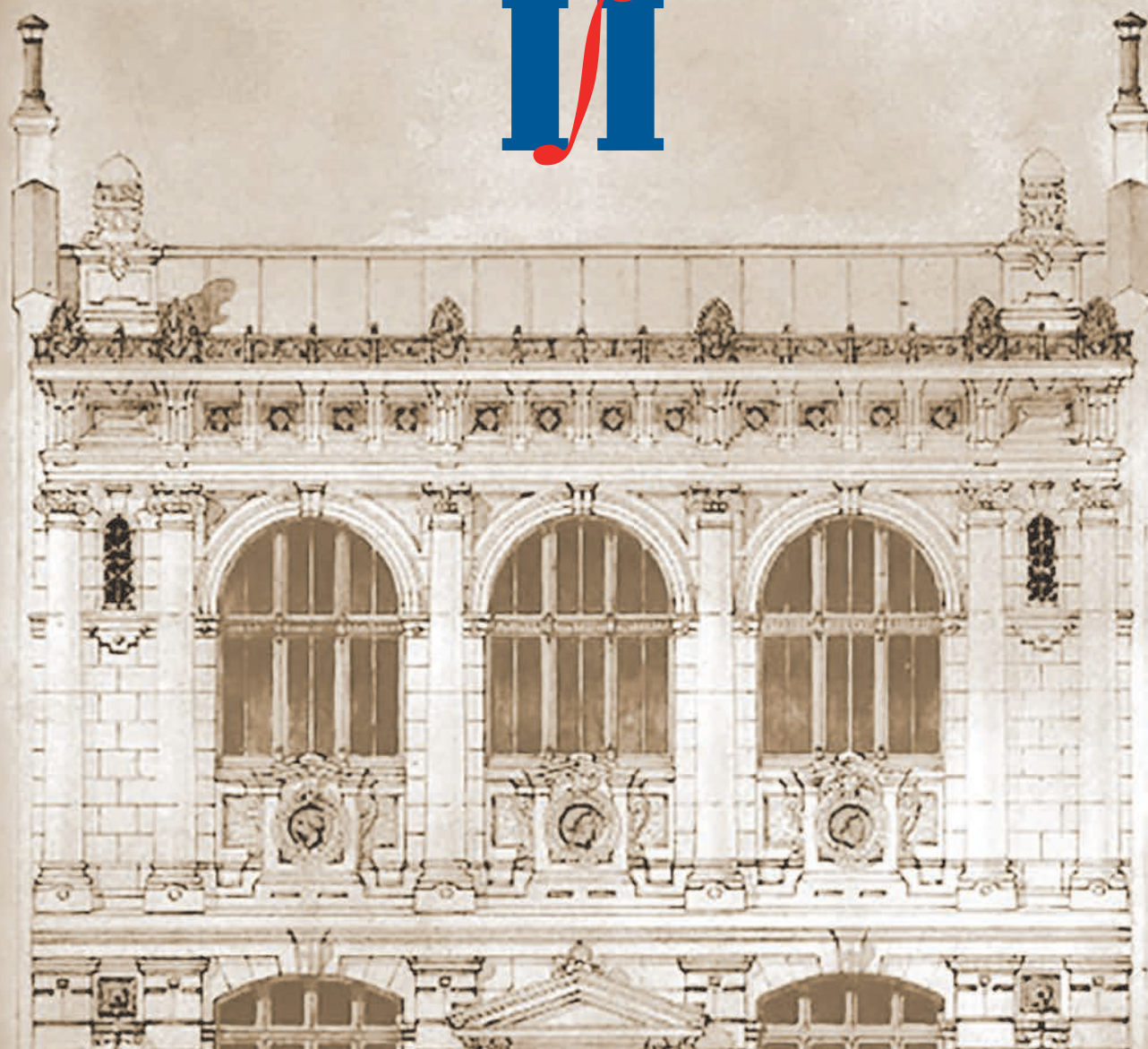
ACTIC CONSULTORES LTDA.

ARCADIS CHILE S.A.

IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.



Nuestros canales digitales:

Sitio web: www.iing.cl

Linkedin: <https://www.linkedin.com/company/64274333/admin/>

E-mail: iing@iing.cl · secretaria@institutodeingenierosdechile.cl

Nuestros teléfonos:

(+56) 22696 8647 · (+56) 93736 0656