

Revista Chilena de INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 / N° 506 / Diciembre 2025



Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 137, N° 3 / ISSN 0716 - 2340

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

Juan Carlos Barros Monge

Primer Vicepresidente

Ricardo Nicolau del Roure G.

Segunda Vicepresidenta

Ximena Vargas Mesa

Secretario

Germán Millán Valdés

Prosecretario

Mauro Grossi Pasche

Tesorero

Jorge Pedrals Guerrero

Protesorero

Javier García Monge

DIRECTORIO 2025

Alejandra Acuña Villalobos

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Pablo Daud Miranda

Rodrigo Fernández Aguilera

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Javier García Monge

Jorge Gironás León

Mauro Grossi Pasche

Cristian Hermansen Rebolledo

Viviana Meruane Naranjo

Germán Millán Valdés

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Verónica Patiño Sánchez

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Ximena Vargas Mesa

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: Paulo Oróstegui T.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
DE TRANSPORTE, SOCHITRAN.
Presidenta: Camila Balbontín T.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN
EN INGENIERÍA, SOCHEDI.
Presidente: Rodrigo Herrera V.

COMISIONES DEL INSTITUTO

Seguridad Hídrica.

Presidenta: Ximena Vargas M.

Infraestructura Digital para el Siglo XXI
Presidente: José Orlandini R.

**Encadenamientos Productivos en torno
al Hidrógeno Verde en Chile**

Presidente: Cristian Hermansen R.

**Desafíos para la Ingeniería en relación
con la Seguridad Alimentaria**

Presidente: Javier García M.

Ingenieros en la Historia Presente

Presidente: Miguel Ropert D.

Convergencia Biológica Digital

Presidente: Alejandro Steiner T.

Ingeniería y Seguridad (Ad-Hoc)

Presidente: Raúl Manásevich T.

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

Para los Premios que el Instituto confiere anualmente, nuestra Corporación desarrolla numerosas actividades a las que otorga suma importancia y dedicación. Los premios honran a quienes los reciben y, al mismo tiempo, al propio Instituto. Nuestra portada muestra un collage con fotografías de los premiados en 2025, felicitaciones a todos ellos.

REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA

Nº 506, diciembre de 2025

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

Juan Carlos Barros Monge

SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

EDITORIAL

Pág. 2

TENDENCIAS EN REGULACIÓN AMBIENTAL APLICABLES A INVERSIONES. NUEVOS DESAFÍOS QUE DEBEN ENFRENTAR LOS PROYECTOS

Conferencia de Sr. Pablo Daud, Consultor Senior en Asuntos Ambientales

Pág. 4

DESAFÍOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

Conferencia de Sr. Rodrigo Espinoza, Gerente de Operación del Coordinador Eléctrico Nacional

Pág. 18

CONVERGENCIA BIODIGITAL: APLICACIONES A LA SALUD, ROBÓTICA, NEUROPRÓTESIS Y AGRICULTURA.

Conferencia de Sr. Adrián Palacios, Presidente del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso

Pág. 34

PREMIO “MEDALLA DE ORO – AÑO 2025”

Al Ingeniero Sr. Eduardo Frei Ruiz-Tagle

Pág. 54

PREMIO “AL INGENIERO O INGENIERA POR ACCIONES DISTINGUIDAS – AÑO 2025”

A los Ingenieros Sr. José Francisco Muñoz Pardo y Sr. Francisco Suárez Poch

Pág. 60

PREMIO “JULIO RAÚL DEVÉS JULLIAN – AÑO 2025”

A la Ingeniera Sra. Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Pág. 68

PREMIO “AL DESARROLLO CIENTÍFICO TECNOLÓGICO RAMÓN SALAS EDWARDS – AÑO 2025”

“Agricultura de Precisión” a los ingenieros Sres. Rodrigo Verschae, Cristóbal Quiñinao, Luis Cossío y Jaime Varas

Pág. 74

PREMIO A LOS INGENIEROS E INGENIERAS RECIÉN EGRESADOS DE INGENIERÍA CIVIL – AÑO 2025

Pág. 80

- Premio “Marcos Orrego Puelma”
- Premio “Ismael Valdés Valdés”
- Premio “Roberto Ovalle Aguirre”

RECONOCIMIENTO A NUESTROS SOCIOS

Pág. 88

EDITORIAL

Durante el segundo semestre de cada año se disciernen los premios que entrega el Instituto de Ingenieros de Chile. Por su importancia y trascendencia, no se incluye una síntesis en esta página Editorial, dejando que el lector de la Revista los encuentre de manera amplia y detallada en su interior.

En materias técnicas, destacan tres importantes conferencias, dictadas por los señores Pablo Daud, Rodrigo Espinoza y Adrián Palacios, cuyos detallados textos se encuentran también en la Revista, sumados a las respectivas síntesis que se presentan a continuación.

El señor Pablo Daud, Ingeniero Civil Industrial de la Universidad de Chile y Consultor Senior en asuntos ambientales en DAES Consultores, que otorga asesoramiento a empresas y organizaciones dedicadas al desarrollo de proyectos en los diferentes sectores productivos, dictó la conferencia titulada “**Tendencias en Regulación Ambiental Aplicables a Inversiones: Nuevos desafíos que deben enfrentar los proyectos**”. El experto, con amplia trayectoria en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de Chile, expuso que la aplicación de estas regulaciones está incidiendo significativamente en el desarrollo de las iniciativas de inversión. Argumentó que la gestión ambiental opera en un mundo mayoritariamente discrecional, donde las reglas del juego no son objetivas. Su principal reflexión es que el país avanza hacia una vorágine de regulaciones y complejidades, haciendo que la obtención de permisos y la ejecución de proyectos sea cada vez más difícil, rígida y, en ocasiones, desincentivadora.

La tendencia actual, en su opinión, no es ni desregular ni simplificar, sino transitar hacia una mayor regulación y complejidad. A pesar de existir iniciativas positivas como la Ley de Permisos Sectoriales y la modificación al Reglamento del SEIA para elevar umbrales, estas no abordan el problema de fondo. Los proyectos se enfrentan a un contexto de una institucionalidad ambiental que ha completado su instrumental, con la instalación del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP). A ello se añade un fortalecimiento de la función de fiscalización por parte de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), y sanciones más duras, incluyendo la reciente figura del delito ambiental con penas de cárcel efectiva. Además, la eclosión de mociones parlamentarias y la inclusión de nuevas variables como cambio climático, el Acuerdo de Escazú (participación ciudadana) y el concepto de ganancia neta de biodiversidad, aumentan las exigencias para los proyectos que se evalúan.

Concluyó destacando que la constante y rápida velocidad de cambios regulatorios y precedentes genera una gran incertidumbre para los inversionistas.

El Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Chile y Magíster en Ciencias, Rodrigo Espinoza, Gerente de Operación del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), presentó una conferencia sobre los desafíos del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) tras el apagón del 25 de febrero de 2025. El SEN, que se extiende por 3.100 km, es operado por el CEN, un organismo técnico que vela por la seguridad, mínimo costo y acceso abierto. Señaló que el origen del apagón fue la incorrecta operación y manipulación no autorizada de las protecciones en la línea 2x500kV Nueva Maitencillo - Nueva Pan de Azúcar por parte de la empresa INTERCHILE. Este evento, a las 15:15 horas, desconectó ambos circuitos, dividiendo el SEN en dos islas inestables.

La propagación de la falla se debió al desempeño deficiente de los mecanismos automáticos de defensa, como los esquemas de desconexión de carga y generación en la isla centro-sur, que colapsó al no poder compensar la pérdida de 1.800 MW que venían desde el norte, donde la inestabilidad de tensión y frecuencia provocó la pérdida total del suministro. La recuperación del servicio fue lenta debido a problemas técnicos en las centrales de partida autónoma y, críticamente, la indisponibilidad de los sistemas SCADA y telecontrol de TRANSELEC, empresa a cargo de la función de Centro de Operación para la Recuperación (COR) por cerca de tres horas. El CEN ha identificado incumplimientos clave, tales como: operación incorrecta de protecciones, intervención no informada, indisponibilidad del SCADA, y ha definido un Plan de Medidas en cuatro ejes: prevención ex-ante, contención de la propagación, recuperación rápida del servicio y aprendizaje continuo.

La principal conclusión es la necesidad de un compromiso de la industria para elevar los estándares de seguridad y confiabilidad del SEN frente a la acelerada transición energética.

El señor Adrián Palacios, presidente del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso y Doctorado en Ciencias, mención Neurociencia de la Universidad Pierre et Marie Curie, París VI, Francia, dictó la conferencia **“Convergencia Biodigital y Visión Artificial Bioinspirada”** en la que abordó la convergencia biodigital, la integración de la biología con las tecnologías digitales, impulsando avances disruptivos en salud, robótica, neuroprótesis y agricultura. Esta integración, fundamentada en disciplinas como la bioinformática y la biología sintética, redefine la relación humana con la biología y acelera áreas como la salud digital, mejorando el diagnóstico y tratamiento mediante el uso de inteligencia artificial. El señor Palacios enfatizó cómo la biología sensorial, específicamente el sistema visual, sirve como modelo y fuente de innovación.

La naturaleza inspira tecnologías, como la captura de carbono con microbios o la simulación de propiedades musculares. El estudio del sistema visual se centra en cómo los fotorreceptores captan la energía lumínica y la transforman en señales biológicas mediante procesos como la fototransducción. La investigación, desde el descubrimiento del pigmento fotosensible por Franz Boll hasta la técnica de pipetas de succión de Baylor, ha revelado que la retina es una red neuronal compleja que procesa la información y la codifica en patrones de actividad temporal, no en imágenes píxel por píxel.

Este conocimiento biológico se traslada al mundo digital siguiendo el marco de David Marr (niveles computacionales, algorítmicos y de implementación). La retina, actuando como un procesador de Big Data natural, inspira soluciones en interfaces cerebro-computador, vehículos autónomos y robótica. La visión artificial bioinspirada potencia la imagería médica y el diagnóstico temprano, debido a que la retina funciona como un biomarcador sistémico para enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas.

Finalmente, tecnologías como las cámaras basadas en spiking y los robots autónomos ejemplifican cómo la eficiencia y los principios de la biología son transferidos a la tecnología, generando innovaciones en telemedicina y agricultura de precisión.

TENDENCIAS EN REGULACIÓN AMBIENTAL APLICABLES A INVERSIONES

NUEVOS DESAFÍOS QUE DEBEN ENFRENTAR LOS PROYECTOS

Sr. Pablo Daud, Consultor Senior en Asuntos Ambientales.



Sr. Pablo Daud.

La conferencia “Tendencias en Regulación Ambiental Aplicables a Inversiones. Nuevos desafíos que deben enfrentar los proyectos” del Sr. Pablo Daud, se realizó el jueves 19 de junio de 2025 con la asistencia de variados invitados del mundo académico y empresarial.

El Sr. Pablo Daud es Ingeniero Civil Industrial de la Universidad de Chile; Consultor Senior en asuntos ambientales en DAES Consultores, que otorga asesoramiento a empresas y organizaciones dedicadas al desarrollo de proyectos en los diferentes sectores productivos.

El señor Daud fue Jefe del Departamento de Evaluación y Seguimiento Ambiental de la Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile. Estuvo a cargo, entre otros temas, de la evaluación de impacto ambiental y del diseño e implementación de mecanismos de seguimiento y fiscalización. Por más de diez años dedicado al desarrollo y funcionamiento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental a nivel nacional, le correspondió la implementación inicial de dicho sistema y la redacción y desarrollo de varios reglamentos, regulaciones y normativas ambientales.

Pablo Daud ha sido académico y profesor en diversas materias de gestión ambiental en las Universidades de Chile, Católica, Católica del Norte, del Desarrollo, Finisterre, Mayor, Católica de la Santísima Concepción y Adolfo Ibáñez. Es miembro de la Comisión de Medio Ambiente del Consejo Minero y formó parte del Comité de Medio Ambiente de la Sociedad de Fomento Fabril, SOFOFA. Fue miembro de la Comisión Presidencial para el Estudio de la Reforma al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Es director del Instituto de Ingenieros de Chile y miembro de la Comisión de Cambio Climático y Aguas del Instituto.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente.

—Muy buenos días a todos y todas. Como presidente del Instituto doy la más cordial bienvenida a nuestro invitado, el Sr. Pablo Daud, como también a todos nuestros asistentes.

En esta conferencia el Sr. Daud se referirá a un tema que se ha discutido poco y que tiene que ver con las nuevas regulaciones que se encuentran en elaboración y que podrían agravar aún más la oportunidad y certidumbre que requiere la ejecución de las inversiones.

Muchas gracias. Los dejo entonces con nuestro invitado.

Sr. Pablo Daud.

—Muchas gracias, presidente.

Tengan todos ustedes muy buenos días. Es un verdadero agrado y privilegio a la vez poder compartir con ustedes uno de los temas que está bastante expuesto en los últimos meses o años, que se ha convertido en una preocupación nacional y que incluso, aparece como parte de las preocupaciones ciudadanas. Un tema que, por cierto, en el pasado no era un asunto de interés en la opinión pública y que no tenía la relevancia que hoy día ha tomado: se trata sobre las distintas regulaciones ambientales y cuya aplicación ha estado incidiendo en el desarrollo de los proyectos de inversión.

Gracias por permitirme estos minutos para presentarles una reflexión que parte, obviamente, desde la propia experiencia. Y digo esto porque si aquí estuviese exponiendo este mismo tema una autoridad del sector público, obviamente tendría una mirada algo distinta a la que yo voy a presentar. Si la estuviese exponiendo alguien a cargo o partícipe de una organización de protección del medioambiente, también es muy probable que tuviera una visión distinta y si la expusiera un académico o un científico, obviamente habría atisbos distintos de aproximación al tema.

Expondré desde mi rol que hoy me toca emprender, desarrollar y colaborar a que los proyectos de inversión puedan diseñarse de tal forma que sean factibles desde el punto de vista ambiental y que puedan obtener los permisos que corresponde para su debida ejecución. Es decir, cómo lograr que nuestros proyectos de inversión

sean ambientalmente sustentables y cumplan todas las reglas del juego que les permitan un desempeño ambiental óptimo e idóneo con las reglas y con los criterios y políticas que el país se ha dado.

Para nadie es novedoso decir que cuando uno habla de medio ambiente se trata de un mundo discrecional. Y este aspecto es un punto de partida de cualquier reflexión que aborde los temas de gestión ambiental, pues estamos en presencia de un espacio donde las reglas del juego no son precisas ni objetivas; no se reglan por ecuaciones que logran definir el comportamiento o el buen desempeño en la gestión ambiental o las exigencias que una autoridad pudiese imponerle a un determinado proyecto de inversión.

Estamos hablando de un mundo que es mayoritariamente discrecional; un espacio donde las apreciaciones valen, donde las percepciones valen, donde las emociones, incluso a veces valen. Y, por lo tanto, los que trabajamos en este espacio de la gestión ambiental sabemos que no existe una verdad absoluta ni una forma determinística de establecer cuando algo es apropiado o inapropiado.

De hecho, por eso existen ciertos instrumentos de gestión ambiental basados en autorizaciones; es para tratar que la autoridad, a través de distintas reglas o criterios, pueda determinar la mejor decisión para la sociedad en el sentido de dirimir qué es lo mejor desde el punto de vista ambiental, atendiendo a que estamos en un mundo, repito, discrecional y subjetivo.

Ahora, sin perjuicio de que se esté en un espacio discrecional y subjetivo, eso no quiere decir que no se deba de disponer de reglas del juego que respetar y que el desarrollo de dichas reglas obedezca a una cierta razonabilidad y proporcionalidad.

Lo que pretendo mostrarles en esta reflexión, es que el país ha ido avanzando en una vorágine de regulaciones y complejidades, que ha hecho que a los proyectos de inversión les sea cada vez más difícil no sólo obtener sus autorizaciones, que ya es una cuestión que hoy día que se ha convertido en muchos casos casi en un trauma en algunos casos, sino que también en la ejecución de esos proyectos, porque quedan sometidos a un conjunto de exigencias, obligaciones a veces tan innecesariamente precisas, que le restan flexibilidad a su desarrollo.

Los proyectos son cuestiones vivas, son cuestiones dinámicas, que van cambiando en el tiempo, que van avanzando en función de su ingeniería y de sus contextos, pero no sólo en ingeniería, sino que en su ejecución propiamente tal. No obstante, tenemos instrumentos de gestión ambiental o regulaciones que son rígidas y no responden a esa realidad que muestran los proyectos, que son dinámicos y cambiantes. Así, cada vez que un proyecto quiera emprender, desarrollarse o quiera modificarse posteriormente o ampliarse, adecuarse, ajustarse a nuevas condiciones o circunstancias, las reglas del juego son tan complejas de cumplir que, me atrevería a decir que, sin tener un dato preciso, muchas veces hay desincentivos a desarrollar, a emprender, a ampliar, a ejecutar nuevos proyectos.

Permitanme entonces avanzar (Figura 1) y me voy a apoyar en una presentación que va a orientar la reflexión que pretendo exponerles sobre lo que está ocurriendo en materia de regulación ambiental. Lo primero que me permito plantear es algo que, en cierta forma en el preámbulo ya lo dije, y que, en el último tiempo -todos lo sabemos, no hay ningún misterio-, se ha puesto de relieve y se han elevado las dificultades a las cuales se han enfrentado los proyectos de inversión.



Figura 1

Es cosa de mirar los medios de comunicación, los casos, los expedientes públicos que muestran situaciones de procesos de aprobación de proyectos y de regulaciones aplicables que aletargan a veces demasiado la posibilidad de que un proyecto tenga la certeza de que pueda ser ejecutado. Y ello se ve acrecentado en particular con los permisos que se deben obtener para el desarrollo de los proyectos.

Hay una palabra que a muchos no les gusta, que se ha venido instalando; yo voy a tratar de evitar usarla, pero está ya en el vocabulario nacional: "permisología". Más de alguno de los presentes, con seguridad, la ha escuchado o la ha usado. A algunos no les gusta esa palabra porque tiene una connotación algo peyorativa, como que los permisos son algo negativo e innecesario. Y claro, efectivamente, cuando uno lo mira así, como que los permisos son algo negativo, adverso, no deseado, puede tener esa connotación.

Los permisos en algunos casos son necesarios y no hay país en el mundo que, para una iniciativa relevante o para alguna circunstancia, no requiera permisos. La pregunta es si en nuestro país nos hemos "pasado de revoluciones" y hemos hecho que los permisos se hayan convertido en una cuestión, en algunos casos, insalvable. O que no hayamos reflexionado sobre la necesidad o agregación de valor de algunos permisos. Y parece ser que en algunos casos así ha sido.

Entonces, sabiendo que hay un problema ahí, que no es ningún misterio, poco se discute respecto a si las nuevas regulaciones que se están elaborando podrían agravar más la oportunidad y certidumbre o certeza respecto a la ejecución de las inversiones. Siempre estamos hablando de los permisos y las regulaciones actuales, las que hoy día se nos aplican o se aplican a los proyectos, pero poco se mencionan las nuevas, las que vienen.

Por eso, me permito indicar que existen en curso nuevas regulaciones, nuevas exigencias, nuevos cambios, que van a ser, en mi opinión, incluso más difícil la posibilidad o la facilidad de obtener ciertos permisos y la factibilidad o dificultad para ejecutar proyectos.

¿Cuál es la tendencia? ¿Qué está ocurriendo? Ustedes han escuchado en el debate de este tema, propuestas de opciones. Y en la discusión más académica, incluso de política contingente, como hasta en campañas electorales, ha surgido esta discusión sobre qué es lo que hay que hacer con esta cantidad de permisos y de regulaciones que se les están imponiendo a los proyectos. ¿Hay que desregular, es decir, eliminar regulaciones?, o ¿hay que simplificar lo que tenemos? ¿Cuál de los dos caminos es el mejor? Esa es una discusión que hoy día está plenamente vigente.

¿Desregulamos o simplificamos? Es decir, desregulamos derogando normas, permisos innecesarios o que no aportan valor o que pueden ser reemplazados por instrumentos más eficientes; eliminamos derechosamente regulaciones respecto de las cuales concluimos que no son útiles. O bien, simplemente, con las mismas regulaciones que tenemos hoy, hacemos un esfuerzo político, de política pública, de simplificar las exigencias, simplificar los permisos, simplificar los plazos, simplificar todo.

Al respecto, la pregunta relevante que hoy traigo a colación es: ¿qué está ocurriendo en la práctica? ¿Estamos desregulando o estamos simplificando? En mi opinión, ni lo uno ni lo otro. Lo que estamos viendo y se los voy a mostrar a continuación, es que estamos transitando hacia una mayor regulación y complejidad o menos simplicidad, si ustedes prefieren.

Salvo excepciones, que hay que reconocerlas, efectivamente existen algunos esfuerzos desde el Estado y gobierno en particular, de simplificar las cosas, de reconocer que aquí hay un problema; ese es el primer paso, para tratar de colaborar a que ese problema disminuya. Esas excepciones, básicamente, pueden ser más de las que yo aquí he de identificar, pero hay, básicamente, dos excepciones a esta regla de que todo se está enredando más.

Primero, existe un proyecto de ley que está a punto de ser despachado desde su trámite legislativo. ¿Cuál es? La ley que se le conoce como de permisos sectoriales, que va a permitir, entre otros aspectos, simplificar y reducir plazos en lo que se conoce como autorizaciones y pronunciamientos sectoriales, entiéndase, permisos DGA, Direcciones de Obras Municipales, permisos sanitarios, entre otros. O sea, dicho en otras palabras, lo “no ambiental”. Se ha prometido que esto podría reducir del orden del 30 al 70% los plazos de tramitación de estos permisos.

El proyecto de ley posee otras características: se crea un organismo encargado de velar para que las gestiones para el otorgamiento de autorizaciones funcionen correctamente en los servicios públicos. Ahí yo tengo una opinión: es extraño o curioso que una ley que busque desburocratizar, para hacerlo genere más burocracia. Ahora esto, por cierto, es discutible, por cuanto se esperaría que, si una legislación busca simplificar las cosas, lo haga con menos aparato público a cargo de velar por la gestión, para que todo fluya de una forma más fácil.

Y la otra iniciativa que hay que reconocer, impulsada por el Ministerio del Medio Ambiente y el Servicio de Evaluación Ambiental, es una modificación al Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, SEIA, que básicamente eleva los umbrales para aquellas tipologías de proyectos que obligatoriamente deben someterse a evaluación ambiental y obtener una calificación ambiental previo a su ejecución. Esa es una modificación que también está en desarrollo, todavía no hay una fecha clara de cuando se aprobaría y entraría en vigencia; entiendo que está en etapa de elaboración. Lo que va a permitir es que ciertos proyectos de menor escala, que hoy día deben contar con permiso ambiental para poder ejecutarse, queden liberados de esta exigencia reglamentaria. Voy a dar un ejemplo bien concreto, sin perjuicio de que existen otras tipologías de proyectos que se verán favorecidos por esta modificación. Un ejemplo: hoy día deben someterse a evaluación cualquier proyecto de manejo de sustancia corrosiva cuya capacidad de almacenamiento sea de 80 toneladas, umbral que en la industria de manejo de sustancias es una cantidad realmente pequeña y que, por lo demás, se encuentra ampliamente regulada con estándares técnicos y sanitarios. Al respecto, esta propuesta de reglamento va a cambiar ese número de 80 toneladas a 2.500 toneladas, o sea órdenes de magnitud mayores a lo que hoy día actualmente proyectos de ese tipo tienen que someterse a la evaluación. Y así, sucesivamente, con un conjunto de otras tipologías.

Entonces, se debe reconocer que existen en curso algunas iniciativas que van a ayudar, pero que no van al fondo del asunto, no van a resolver lo grueso en lo cual estamos entrampados, que no estamos ni desregulando ni simplificando y al revés, como les voy a comentar a continuación, lo que se observa es que vienen más regulaciones y vienen más complejidades (Figura 2).

TENDENCIAS EN REGULACIÓN AMBIENTAL APLICABLES A INVERSIONES

1. En el último tiempo, se ha puesto de relieve las dificultades a las cuales se van enfrentando los proyectos de inversión, en relación con los permisos que se deben obtener para su desarrollo;
2. No obstante, poco se ha discutido respecto de las nuevas regulaciones que se encuentran en elaboración y que podrían **agravar aún más la oportunidad y certidumbre** que se requiere para la ejecución de las inversiones;
3. ¿Cuál es la tendencia? ¿Cuál es la mejor opción? **Desregulación o simplificación?**
4. En la práctica, lo que está ocurriendo es:
 - Mayor regulación
 - Mayor complejidad
 - **Salvo** proyecto de ley de “permisos sectoriales” (que resuelve solo una “parte” del problema) y modificación RegSEIA, no se vislumbra ninguna iniciativa adicional de desregulación o simplificación de permisos requeridos para inversiones...

Figura 2

Eso es lo que quiero exemplificar, a continuación.

¿Qué está pasando en materia de regulación? ¿Cuál es la tendencia? ¿Qué cosas nuevas están ocurriendo que hacen que uno pueda tener este panorama o esta visión no muy alentadores? Se observa que todo camina hacia la dirección que va a implantarse más regulación y más complejidad y no más desregulación y más simplicidad. Es un conjunto de situaciones que están ocurriendo, que son muy contingentes y que se las paso a detallar a continuación.

Lo primero (Figura 3), es que tenemos una institucionalidad ambiental que, es cierto, que se ha ido instalando desde principios de los 90, que fue reformada en forma significativa a principios de la década de 2010 y que está terminando su ciclo de instalación ahora recién con las cinco instituciones, que están a cargo desde el punto de vista en el aparato estatal, de la cuestión ambiental. El Ministerio del Medio Ambiente, ya instalado hace varios años, por cierto, hace más de una década. El SEA, que es el organismo especializado en la evaluación ambiental de los proyectos. La SMA, que es el músculo fiscalizador del aparato estatal; es decir, el que fiscaliza el cumplimiento de los distintos instrumentos de gestión ambiental. Y los Tribunales Ambientales que, en el ámbito jurisdiccional, es el que imparte la justicia ambiental. Todos estos aparatos, todas estas instituciones ya las conocíamos, están desde hace varios años funcionando.



Figura 3

Pero faltaba un organismo para terminar de establecer el engranaje completo de la institucionalidad ambiental, que era el órgano que se haría cargo de la administración de las áreas protegidas y la protección o manejo, o el buen

manejo de la biodiversidad. Y eso es el SBAP, el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas, que hace pocos meses atrás fue finalmente legislada y aprobada su normativa. Y hoy día está en plena etapa de instalación: ya existe como organismo, y se encuentra en la etapa de elaboración de sus reglamentos, que desde ya les adelanto que van a ser una decena de nuevos reglamentos que van a imponer nuevas condiciones, nuevas exigencias, varias de las cuales les van a ser aplicables a los proyectos de inversión.

La segunda cuestión de contexto es que hoy día impera una función específica que antes no existía. En la década de los 90 se dio mucho énfasis a generar las normas, regulaciones, pero el énfasis no estaba puesto en la fiscalización. Hoy día hay una función específica que la ejerce un organismo que es la Superintendencia del Medio Ambiente y que buena parte del peso de la gestión ambiental se pone aquí, en que se cumplan las reglas del juego. Cuestión que en mi opinión es muy razonable.

Esto obedece también a un requisito que, en su momento en las evaluaciones de desempeño ambiental del país de la OCDE, que sugirió que se tenía que fortalecer la musculatura fiscalizadora y en eso ha estado el país en el último tiempo.

Por lo tanto, en materia de fiscalización, es presumible señalar que todo se va a fortalecer. Esa es la visión que uno tiene o lo que uno observa que está ocurriendo y lo que se espera que ocurra, porque en la medida que haya más instrumentos de gestión ambiental, más proyectos aprobados, más normas de emisión, más normas de calidad, más planes de descontaminación, más normas de manejo de biodiversidad y recursos naturales, obviamente más fiscalización va a ser ejercida en el país.

Como tercera cuestión, es que además de la fiscalización, de la ampliación de la musculatura fiscalizadora, uno observa que las sanciones hoy en día son más duras. Por ejemplo, las sanciones administrativas, entiéndase las que ejerce la administración, los aparatos, del gobierno central, son las clásicas, ¿cierto? Multas, amonestaciones, revocaciones, clausuras, etcétera. Pero en materia de su entidad o cantidad, estas, obviamente, han aumentado significativamente su cuantía. Hoy día son sanciones más duras. Antes teníamos sanciones máximas, por infracción, de 500 unidades tributarias mensuales anuales y hoy día, por la misma falta, puede llegar a ser perfectamente 10.000 unidades tributarias anuales. Por ello se dice que

las sanciones ambientales son de las más altas en todo el espectro de sanciones que existen en nuestro ordenamiento jurídico.

Pero esto no terminó ahí, porque surgió una cuestión que el país había decidido en los inicios de la gestión ambiental que no correspondía a implementar, pero que finalmente terminó haciéndose, que es la figura del delito ambiental. ¿Qué es esto? Que hoy día las faltas, las infracciones a las reglas del juego, del punto de vista ambiental, no solo pueden ser sancionadas a través de la vía administrativa, entiéndase sanciones del tipo multa, clausuras, amonestaciones, sino que también hoy día pueden tener un castigo penal. Castigo penal significa privación de libertad.

Al respecto, tenemos una nueva legislación, muy recientemente promulgada, hace dos años para personas naturales y un poco menos de un año entró en vigencia para personas jurídicas, que pueden ser sancionadas penalmente. Y la sanción penal, como indiqué, puede ser privación de libertad, incluida cárcel efectiva.

Si se exploran los elementos jurídicos de las sanciones penales por razones ambientales, es posible verificar que se eliminaron eximentes que clásicamente se aplicaban. Por ejemplo, el eximiente de la irreprochable conducta anterior ya no existe en materia ambiental. Hubo otros eximentes que antes existían, pero que no aplicarían con esta nueva legislación.

Derechamente aquí existe la posibilidad de cárcel efectiva para aquellos que cometan faltas en relación con las nuevas tipologías de delito ambiental que están establecidas. Esto ya comenzó a operar: en mi conocimiento, ya existe un caso que está en etapa de investigación, ni siquiera de sanción, o sea, no están cerrados esos juicios; no obstante, es probable que, en los próximos meses o años, empecemos a ver personas e instituciones u organizaciones o personas jurídicas sancionadas penalmente.

El cuarto elemento de contexto, que no es tan nuevo, podría definirse como una eclosión de mociones parlamentarias en materia de regulación ambiental. Los parlamentarios, como ustedes saben, poseen la facultad para promover leyes, por cuanto, la fuente legal en este país surge de dos vertientes: del Poder Ejecutivo, como proyecto de ley, o desde el Poder Legislativo, que son las mociones parlamentarias. Al respecto, se ha experimentado un fuerte incremento de

mociones parlamentarias que tratan temas ambientales y, permítame, esto es una opinión personal, muchas veces la calidad de esas reglas, de esas nuevas normas, ponen en aprietos la adecuada gestión ambiental. Desde el punto de vista de las políticas públicas, a mi juicio, a veces no son las mejores normas, no son las mejores leyes.

Y hemos tenido en el último tiempo, una cantidad de casos que han surgido de mociones parlamentarias, que se han convertido en ley, y que han terminado siendo un dolor de cabeza al momento de implementarlas. El ejemplo más clásico es la ley de humedales, que hace que prácticamente no haya un filtro o una racionalidad o una proporcionalidad al momento de que un determinado sitio se declare como humedal urbano. Y al ser declarado humedal urbano, comienzan a regir un conjunto de restricciones a cualquier actividad que quiera desarrollarse, no sólo en el humedal, sino también en su entorno, en la proximidad del humedal. Entonces, ahí tenemos un ejemplo de una legislación que no quedó bien formulada, y que hoy día ya es ley y que presenta estos problemas.

Otro elemento de contexto, y esto es bueno, hay que mirarlo como un tema positivo, creo yo, y es que toda la información ambiental es pública, y esto es un valor como país, que hay que protegerlo. Nosotros somos de aquellos países en que toda la información ambiental es de carácter pública y accesible. Nosotros tenemos sistemas de información que son bastante, yo diría, envidiados en otras latitudes, por otros países. Por ejemplo, todos los expedientes de evaluación ambiental, de los proyectos de inversión, son completamente públicos. El expediente legal, válido, oficial, es el digital, no es un expediente en papel, y eso le da un valor, y al mismo tiempo eso hace que la información sea más accesible y se pueda usar adecuadamente; pero también se puede mal usar; al respecto, no hay muchos desincentivos al mal uso de la información pública, no hay muchos desincentivos, por ejemplo, a presentar recursos judiciales respecto a situaciones que, usando el tema ambiental, se están buscando otros propósitos. A veces, las reclamaciones o demandas pueden ser muy legítimas desde el punto de vista de la persona que las genera, pero desde el punto de vista del problema que le generan a ese proyecto de inversión puede ser realmente una catástrofe, porque puede haber un proyecto que, teniendo todos los permisos, se le deje en "fojas cero" respecto de sus autorizaciones debido a una inoportuna, tardía o desproporcionada decisión administrativa o judicial.

Y aquí entramos a uno de los temas más complejos del contexto actual, que es un conjunto de nuevas variables ambientales a las que los proyectos deben verse enfrentados. Y cuando yo partía esta presentación diciendo todo lo que está ocurriendo es que hay más regulaciones, bueno, aquí quiero presentarle un conjunto de ejemplos, en que voy a tomar un par de láminas más adelante para dar algunos detalles, de que los proyectos están siendo sometidos cada vez a más exigencias, más regulaciones, más condiciones, más requisitos, más requerimientos de información, más estudios, más análisis, etcétera. Ejemplo de ello, cambio climático. Tenemos una legislación de cambio climático, que voy a mostrarlo en un minuto más, que impone a los proyectos de inversión un conjunto de condiciones, varias las cuales uno puede decir son razonables, sí, pero hay otras que son difícilmente clasificables dentro de la racionalidad al momento de aplicarla a un proyecto en particular.

La pregunta que traigo a la reflexión es: ¿qué incidencia puede tener un proyecto en particular? A un proyecto pequeño se le exige un conjunto de condiciones, estudios, análisis, para demostrar que no tiene ninguna incidencia o consecuencia respecto del cambio climático, que no tiene mayor incidencia, aun cuando lo sepamos de antemano.

Lo mismo pasa con la participación ciudadana. Nosotros suscribimos el Acuerdo de Escazú, que la verdad de las cosas es que no es muy distinto a lo que teníamos como legislación ambiental, pero le dio un énfasis especial a la participación ciudadana, pasando a ser un elemento esencial en los proyectos, cuando si bien es relevante, es importante que los proyectos tengan participación ciudadana, no puede ser la variable de decisión lo que surja de la participación ciudadana. La variable de decisión debe ser si el proyecto cumple o no cumple los distintos requisitos ambientales. Entonces, esto también ha ejercido presión a que las autoridades, cuando están enfrentadas a calificar los proyectos, se vean sometidas a estas presiones legítimas, o a veces ilegítimas, pero presiones, a fin de cuentas, que surgen de la participación de la ciudadanía.

No estoy diciendo con esto que hay que restringir la participación ciudadana, al contrario, yo creo que en muchos casos ha sido un valioso aporte: los ciudadanos, a veces, conocen aspectos que los inversionistas no saben del territorio, del espacio local en el cual se emplazan los proyectos y que le dan valor al proyecto, incorporan una variable que antes no había sido considerada y se fortalece

finalmente la ejecución de ese proyecto y mejora la relación con los vecinos.

Pero me estoy refiriendo a la participación ciudadana mal usada, aquella que se aprovecha de estos espacios de participación para imponer otros anhelos, otros deseos, otros intereses.

Otro tema nuevo de contexto que muestra el incremento de la regulación y la complejidad es todo aquello que se va a regular o ya se está regulando en materia de biodiversidad y áreas protegidas. Existe toda una nueva legislación y reglamentación en materia de biodiversidad y áreas protegidas. Varias de ellas ya van a empezar a tener incidencia en los proyectos de inversión. Ejemplo de ello: se instala el concepto de ganancia neta de biodiversidad en Chile. ¿Qué es eso? Hoy día, si un proyecto de inversión tiene efecto en la biodiversidad, si genera una pérdida, por ejemplo, si un proyecto afecta una determinada superficie de vegetación o un determinado ecosistema de fauna, flora, vegetación, ese proyecto, con esta nueva regla, estará obligado no sólo a hacerse cargo de que el efecto de la biodiversidad sea proponer medidas de mitigación para reducir ese efecto, sino que las medidas de compensación que tiene que proponer tienen que generar un beneficio, es decir, un saldo positivo respecto de la biodiversidad. Es decir, cada vez que se haga un proyecto, si afecta elementos biológicos o ecosistémicos, ese proyecto tiene que generar un beneficio ambiental por biodiversidad. Se dirá que ello es razonable; que si un proyecto genera pérdida de un componente ambiental deba reponer, en un umbral superior en calidad y/o cantidad, dicho componente ambiental. El problema es que ello no siempre es posible.

Nos vemos enfrentados a situaciones en que no siempre es posible hacer esa reposición o esa compensación. Si un puerto requiere instalarse en un determinado lugar y es la única opción, porque ese puerto es una decisión país, estratégica y geopolítica, y la única opción es instalarse en ese lugar donde se tiene que afectar una playa o una porción del borde costero y se va a perder esa playa o ese borde costero, bueno, esta norma está imponiendo un problema porque significaría que las decisiones país, las decisiones de política pública, las decisiones que como sociedad estamos dispuestos tomar y asumir que ciertas pérdidas ambientales ocurran, se le está imponiendo una barrera a veces insalvable a aquellos proyectos que son estratégicamente necesarios.

No estoy diciendo que ese proyecto no tenga que compensar, por ejemplo, con la posibilidad de mejorar otra playa, pero cuando le imponen esta restricción de que esa playa si se pierde tiene que ser compensada de igual forma, puede ser un imposible; entonces, se está poniendo una norma que en algunos casos puede constituirse en una situación no factible para los proyectos.

Lo mismo tenemos con normas nuevas de protección de humedales, turberas, contaminación lumínica, regulaciones nuevas en el Código de Aguas, entre otras.

Otro elemento de contexto, y que también tiene sus cuestiones positivas en mi opinión, pero también a veces un mal uso de estas herramientas es que hay un desarrollo para el seguimiento ciudadano: lo que se ha hecho es facilitar el mecanismo de denuncias. O sea, todos nosotros ciudadanos tenemos mejores herramientas para denunciar situaciones ambientales. Y claro, naturalmente se puede decir que ello es lo correcto; que está bien, perfecto, que bueno que eso ocurra, que se tenga un canal de denuncia por algo que considere que está afectando el medio ambiente, el patrimonio ambiental. Pero lo que hemos visto también es que hay un abuso de esto y no existe un filtro. ¿Por qué? Porque la ley, por ejemplo, dice que basta con que haya una denuncia para que la autoridad esté obligada a actuar y moviliza todo el aparato público muchas veces para llegar a la conclusión de que esa denuncia era infundada.

Y finalmente, un último elemento de contexto que explica que vamos en dirección de mayor regulación y complejidad, y que al final es lo más concreto para la evaluación ambiental en el día a día de los proyectos de inversión, es que en el último tiempo ha existido una velocidad en los cambios regulatorios y de precedentes que es inusitada. O sea, permanentemente, permítanme esta expresión, se está “corriendo el cerco”. Lo que se consideraba que ayer era la regla, mañana ya no lo es. Lo que se consideraba que ayer era el precedente y la vara con la cual la autoridad te iba a aprobar un proyecto, mañana ya no lo es.

Cada proyecto que se somete a la evaluación ambiental trata, por cierto, de cumplir con las reglas, con las guías, con las instrucciones y con los precedentes. Pero se observan casos que son bastante interesantes e ilustrativos, en que en sus presentaciones a la evaluación ambiental ante

la autoridad cumplen todas esas reglas, precedentes, etc. O sea, se presentan cumpliendo todo lo que dijo la autoridad la semana anterior. Estoy caricaturizando esta situación porque no estoy diciendo textualmente la semana anterior, sino que es lo que dijo la autoridad para el caso anterior.

Pues bien, el proyecto se puede presentar de la misma forma, con los mismos estándares, cumpliendo con todas las reglas, precedentes y contenidos de información del caso anterior similar aprobado e igual se formulan cuestionamientos, preguntas y observaciones. A eso me refiero con que siempre se está “corriendo el cerco”, siempre se está exigiendo algo más, siempre se está pidiendo algo más. Y eso lo que provoca, en definitiva, es una falta de certidumbre en que los proyectos no saben a qué atenerse.

Por ejemplo, en materia de evaluación de impacto ambiental, muchos de ustedes saben que hay ciertos proyectos de inversión que obligatoriamente, para poder ser ejecutados, requieren ser sometidos a un proceso de evaluación ambiental y obtener una calificación ambiental favorable para poder ejecutarse. Así, muchas veces se sabe cuándo y cómo se entra a ese proceso, pero no se sabe cuándo ni cómo se sale, provocado básicamente por estos problemas de certidumbre jurídica.

Hay un sinnúmero de sentencias judiciales que todos los días están cambiando el panorama. Hay un montón de normativas que están cambiando permanentemente. Hay un conjunto de guías e instrucciones, 90 guías para ser exacto y 52 instrucciones del SEA, en que uno está preparando su proyecto, lo está terminando para ser presentado a evaluación ambiental, y surge una nueva guía que cambia el escenario. Y, por lo tanto, tienes que readecuarte a esa nueva realidad, a esa nueva exigencia, a esa nueva metodología. Resulta, permítanme decirlo, imposible predecir cómo va a ser la evaluación de un proyecto cuando las reglas del juego están cambiando a cada rato.

Dicho lo anterior, permítanme un rápido recorrido de ejemplos de regulaciones nuevas (Figura 4).

Por ejemplo, la que incorpora la dimensión del cambio climático en los proyectos de inversión: existe un conjunto de obligaciones que hoy en día los proyectos tienen que cumplir debido a la nueva legislación sobre cambio climático.



Figura 4

Cambio en el régimen sancionatorio. Hoy día tenemos que preocuparnos no sólo de los temas sancionatorios administrativos, las multas, las infracciones, sino que también hay una nueva preocupación, particularmente en las personas jurídicas y, bueno, hay naturales, por cierto, de la posibilidad de que ahora se impone un delito ambiental. Es decir, hoy en día es posible sancionar penalmente. Antes prácticamente esto no existía, salvo un par de artículos, uno de la ley de pesca y otro de la ley de monumentos nacionales, permitían la sanción penal. Hoy día cualquier acción tipificada como delito puede ser sancionada penalmente.

Del mismo modo, se observan nuevas regulaciones sobre diversidad y áreas protegidas. Esta es una legislación muy reciente que está recién instalándose y que todavía no tenemos claridad qué efectos va a tener en los proyectos de inversión. Lo único que sabemos es que se están dictando un conjunto de reglamentos, algunos bastante, diría, osados en materia de restricciones nuevas, que lo más probable es que le impongan alguna complicación más a los proyectos.

También es menester mencionar la reforma al Código de Agua. Ya lleva más de tres años dicha reforma, pero hay aspectos nuevos en ella que son bien interesantes y que también pueden imponer restricciones. Ejemplo, cada vez que hoy día se requiere un derecho de agua o el traslado de un derecho de agua o cualquier ejercicio en materia de uso del agua, hoy se imponen dos condiciones nuevas: que se tiene que demostrar que esa nueva extracción o el traslado de un derecho no afecta o se hace cargo de los posibles elementos o efectos del cambio climático; y que se tiene que demostrar que ese traslado o ese nuevo derecho cumple ciertos requisitos de caudal ecológico o de consideraciones ambientales. O sea, hoy día las consideraciones ambientales

son expresas en el Código de Aguas y, al tramitar cualquier autorización, son requisitos nuevos que hay que cumplir. Es más, se establece una nueva modalidad de derechos de agua. Antes estaban los derechos consuntivos y los derechos no consuntivos, los transitorios, los permanentes. Hoy día hay un nuevo derecho, el de no uso. Es decir, uno puede pedir un derecho para no usar el agua. Se supone que el no uso es para fines de preservación, etc. Sí, puede tener un fin noble, ¿cierto? Pero cuando ese fin uno lo quiere mal usar, digamos, también puede tener sus problemas.

Por su parte, el acuerdo de Escazú, que releva todos los temas de participación ciudadana y justicia ambiental, no quiero plantearlo como una traba, sino que quiero plantearlo como que algunos hacen mal uso de estas nuevas herramientas.

La ley de humedales urbanos, que ya había mencionado, la ley de turberas, que protege las turberas en el país.

Por ejemplo, la ley de sobre contaminación lumínica, muy de moda, ¿cierto? En algunos proyectos en el norte, por la posibilidad de la interacción que existe entre un proyecto en cuanto a sus efectos lumínicos sobre la calidad de los cielos nocturnos para la observación astronómica. Ahí hay toda una discusión emergente que se está generando. Es muy curioso esa interacción que se da, porque las reglas del juego están dictadas hace rato en Chile en materia de contaminación lumínica. Existe una norma, existen criterios, existen guías del SEA y, aun así, existiendo normas, criterios y guías, estamos en discusiones discrecionales o subjetivas sobre el tema.

Y bueno, lo que se activó en las últimas semanas es una norma que estaba un poco dormida, que es el proyecto de ley sobre Protección de Glaciares. Y hemos visto que a diversos sectores productivos les sería, en algunos casos, bastante relevante o fatal, por decirlo así, si se dictara la norma tal como está hoy día siendo planteada. (Figura 4)

Solo para recorrer en forma más específica y rápida algunas regulaciones, a modo de ejemplo, la ley de cambio climático establece un conjunto de reglas en que el principal obligado a cumplir la ley es el Estado de Chile. Por cierto, se fijan normas de neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050, un conjunto de normas que lo que buscan es adaptarse al cambio climático, no solo mitigarlo, pero mitigarlo en Chile no tiene mucho sentido, más bien es simbólico porque Chile no es el gran aportador de gases

de efecto invernadero, pero sí tiene una gran relevancia en materia de adaptación.

Hay que cumplir compromisos internacionales, hay que fortalecer la relación de ciencia y política y hay atrás todo un principio de equidad y justicia climática que se plantea en esta ley (Figura 5).

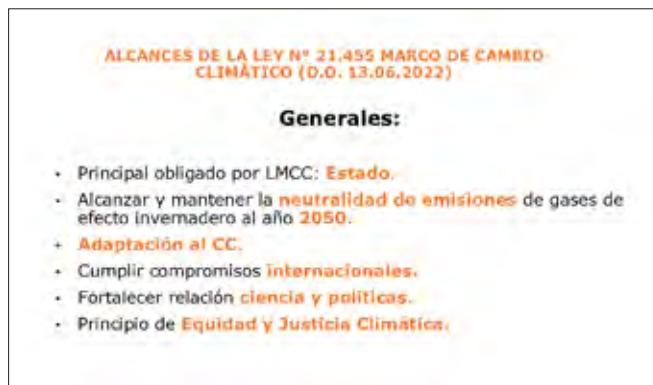


Figura 5

Solamente quiero adelantarme con algunos aspectos específicos que aparecen en esta ley y que van a tener -o ya tienen- incidencia en los proyectos de inversión. Va a haber metas de mitigación, va a haber estrategias climáticas a largo plazo, van a elaborarse planes sectoriales de adaptación, cada sector productivo del país, agroindustria, silvicultura, minería, energía, está desarrollando desde el punto de vista del aparato estatal los planes sectoriales de adaptación al cambio climático y esos van a tener incidencia en los proyectos de inversión porque van a tener que demostrar que son compatibles con estas políticas sectoriales.

Asimismo, van a elaborarse políticas a nivel regional y a nivel comunal. Fíjense en este detalle, hay varias comunas y regiones que ya están elaborando sus planes y que van a imponerle entonces a los proyectos de inversión un conjunto de restricciones de compatibilidad (Figura 6).

Y concretamente, en la evaluación de impacto ambiental, la legislación, en lo que es cambio climático, le va a imponer -o ya le está imponiendo- un conjunto de nuevas restricciones, muchas de las cuales están vigentes y que ya hay que aplicarlas. Y lo que han provocado en muchos casos es desarrollo de información, análisis y estudios que no son muy conducentes, pero hay que hacerlos igual porque

así lo ha exigido la ley y la reglamentación. Los proyectos tienen que mostrar cuáles son sus emisiones de gases de efecto invernadero, cuáles son los diseños de los proyectos para adaptarse a situaciones extremas o desastrosas, que era parte de los planes de emergencia y contingencia que todo proyecto debe contemplar, pero que hoy día se le agrega una variable más que la variable cambio climático y así sucesivamente, un conjunto de normas nuevas que los proyectos hoy día tienen que sopesar al momento de ser evaluados con relación al cambio climático (Figura 7).

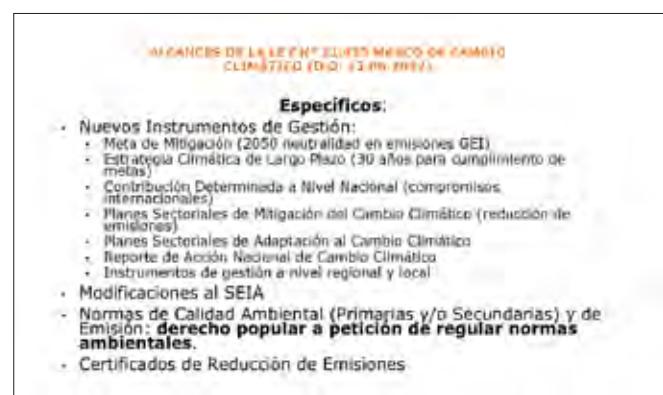


Figura 6



Figura 7

Y, finalmente, una mención al ámbito penal; les presento un ejemplo de uno de los artículos nuevos del código penal en materia de medio ambiente. Aquí hay una tipificación de delito que dice: "... será sancionado con presidio o reclusión menor en sus grados mínimos a medio el que sin haber sometido su actividad a una evaluación de impacto ambiental a sabiendas de estar obligado a ello, además vierta sustancias contaminantes traiga aguas continentales...",

etc. Es decir, dicho en palabras más simples, existe un riesgo hoy día que, por cualquier elusión, es decir, que alguien ejecute un proyecto, debiendo haberlo sometido a evaluación ambiental, caiga en la tipificación de un delito en la medida que se den las demás circunstancias establecidas en la ley, y por lo tanto entre en un proceso penal. Y se debe recordar, como se indicó, que ya no hay eximentes, como existían en nuestras antiguas reglas penales, por ejemplo, la irreprochable conducta anterior, o la incapacidad de pago. La única eximente que desliza la legislación es contar con un certificado de la autoridad que determine que ese proyecto no debía ser sometido a evaluación ambiental. ¿Qué provoca ello? Presiona al Estado de Chile en el sentido de que si se tenía dudas de ir a preguntarle a la autoridad si un proyecto debía o no debía ingresar a evaluación ambiental, esto lo único que provoca, al preguntarle a la autoridad, es incrementar el número de trámites y el número de gestiones que tiene que hacer el Estado y los titulares de proyectos.



Figura 8

Déjenme darles un número. A Evaluación Ambiental en la historia del país, desde los años 90 a la fecha, hasta anteayer, se habían sometido del orden de 29.000 proyectos a evaluación ambiental. ¿Saben ustedes cuántos se han sometido a consultas de pertinencia?; es decir, estas consultas que se formulan a la autoridad y que ahora se verían agravadas por este tema penal en que lo que se busca es obtener un pronunciamiento formal de la autoridad para que esta resuelva que el proyecto está eximido de evaluarse ambientalmente; se trata de 38.000 consultas de pertinencia que se han sometido a la fecha a petición de pronunciamiento de la autoridad. Y debido a esta norma, lo más probable que eso crezca y crezca y lo que hace eso es presionar al aparato

público a un conjunto de trámites y regulaciones y nuevas exigencias, que lo único que pueden hacer es, discúlpennme, no simplificar las cosas ni menos desregularlas (Figura 8).

Muchas gracias quedo atento por si hubiese algún comentario o alguna pregunta.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente.

—Pablo, muchas gracias por la presentación. Creo que más que más que una visión negativa es una visión muy realista, ya que es lo que está ocurriendo y creo que ha sido sumamente claro.

A continuación, el Sr. Pablo Daud responde comentarios y consultas de los asistentes.

Sr. Martín Colli.

—Plantea que, ¿si aumentando la regulación y complejidad se asegura que los proyectos sean o no más sustentables?

Sr. Pablo Daud Miranda.

—Creo que, aumentando regulación y complejidad, la respuesta es no. Déjenme dar un ejemplo: el país tenía un sistema que era mucho más simple en los años 90 y 2000; un sistema que era mucho más eficiente en cuanto a la profundidad de los estudios que exigía; en cuanto a los requisitos, en cuanto a las exigencias era más rápido, más simple, menos engorroso.

La pregunta que surge para el análisis es: ¿esos proyectos que fueron evaluados en esa época provocaron complejidades y efectos ambientales relevantes que una mayor regulación las hubiese prevenido? La respuesta es no y déjenme dar un ejemplo bien concreto: ningún área del país ha entrado en saturación o latencia producto de proyectos de inversión que hayan pasado por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. El deterioro ambiental no ha sido provocado por los proyectos que han sido sometidos a calificación ambiental; el deterioro ambiental ha sido provocado por otras actividades, por ejemplo: en el sur, el masivo consumo de leña como sistema de calefacción residencial, que lo único que ha hecho es empeorar la calidad del aire en

las ciudades. Entonces tenemos una paradoja, que por un lado hay proyectos que cumpliendo las reglas del juego han permitido mejorar nuestra calidad ambiental, pero, por otro lado, otras actividades menos reguladas, más masivas, más atomizadas, han empeorado la calidad ambiental, entonces la pregunta que uno se hace es ¿dónde uno tiene que poner los esfuerzos de regulación?

Sr. Miguel Ropert.

—*Los funcionarios públicos que deben aprobar un proyecto o parte de un proyecto tienen un incentivo perverso, ya que siempre va a ser más seguro para este funcionario rechazar, ya que aprobar puede traerle problemas a futuro, ¿es posible cambiar la institucionalidad y establecer empresas privadas calificadas que hagan el proceso de revisión y análisis para la calificación de cumplimiento de los proyectos?*

Sr. Pablo Daud Miranda.

—Gracias Miguel. Como he advertido, en los temas ambientales, por ser discretionales, todo es opinable. Yo soy de una opinión distinta; soy de la opinión que más que poner el peso de la prueba en la evaluación, es sugerible poner el peso de la prueba en la fiscalización. Así fue concebido originalmente este sistema, en que uno declaraba los impactos y juraba que iba a cumplir las distintas normas y reglas del juego. Distintos son los casos de megaproyectos, que obviamente, para ellos, se podría decir que ameritan que pasen por un proceso de evaluación más extendido, porque van a provocar impactos y cambios territoriales mayores y por lo tanto merecen un proceso más exhaustivo. Pero sobre el 90 por ciento de los proyectos que se someten a evaluación son proyectos simples, que, en la jerga ambiental, le llamamos Declaración de Impacto Ambiental, la cual es una declaración jurada, en que la lógica original era que su proponente declaraba que iba a cumplir todos los requisitos ambientales y que el peso de la prueba se ponía no en la evaluación, sino que en la fiscalización y que, si no se cumplías, debe aplicarse las sanciones correspondientes; esa era la lógica. Lamentablemente esa lógica se ha ido desvirtuando en el tiempo y se ha puesto todo el peso de la regulación ambiental en la etapa de evaluación y no en la etapa de fiscalización.

Sr. Eduardo Rubio.

—*Desde el punto de vista de los consultores que asesoran los procesos de entrada al SEIA en el caso de que hagan recomendaciones de estudios y criterios ¿qué pasa si la ejecución de los proyectos se producen fallas; ¿están afectados también dada la vertiente penal que ha surgido?*

Sr. Pablo Daud Miranda.

—La respuesta es sí, en una interpretación extendida de la legislación penal, pudieren estar todos los involucrados expuestos a la sanción penal.

La responsabilidad se puede extender a todos los que participaron en una determinada cadena de decisiones y que pudo derivar en una infracción del tipo penal. La infracción administrativa siempre recae sobre el titular, el responsable del proyecto. Pero en materia penal eso es ahora extensible a cualquier persona que, comprobadamente, se demuestre que tuvo participación en la conducta delictiva. Así que, Eduardo, tengo la noticia de decirte que todos vamos a tener que ser doblemente cuidadosos ahora respecto al ejercicio de esta labor.

Sr. Luis Medina.

—*¿Qué impacto puede tener esto en las mallas curriculares? y ¿se le ha dado a la formación profesional de los ingenieros la importancia real en la evaluación ambiental?*

Sr. Pablo Daud Miranda.

—Sí, buen punto. No es ningún misterio decir que, en las últimas dos décadas o década y media, ha surgido un boom de carreras medioambientales. A principios de los 90 no existía la carrera de medioambiente, salvo excepciones y salvo postgrados. Hoy día existen muchas carreras, incluso algunas que se llaman directamente ingeniería en medioambiente. Aquí esto es bien opinable, yo tengo la percepción y esto es percepción por favor, tómenlo así, de que hoy día se está enseñando en la malla curricular y el énfasis es muy protecciónista y no de desarrollo sustentable.

Creo que ahí, quizá, el Instituto de Ingenieros de Chile puede tener un rol de ayudar a que las mallas curriculares no contengan un rol en el que lo central es que hay que protegerlo todo, cuando lo relevante es cómo hacemos un adecuado uso de los elementos del medioambiente para proponer un desarrollo sustentable. Si hay cosas que proteger, perfecto, hay que protegerlas, pero hay otras hay otras que se debe hacer un adecuado manejo de esos componentes ambientales.

Sr. Hernán Durán.

—*¿Cuál es su opinión respecto a la calidad de los estudios ambientales que se realizan en general en el país?*

Sr. Pablo Daud Miranda.

—Gracias Hernán, tengo la impresión de que, en general, es una calidad adecuada. Lo que ocurre es lo siguiente: es que se instaló, a mi juicio, equivocadamente en el país, que los estudios ambientales tienen que resistir el escrutinio científico y yo creo que esa es una visión equivocada. Los estudios ambientales lo que buscan es predecir, sobre la base de un espacio de riesgo, cuál es el impacto que un proyecto pudiese provocar sobre la base de modelaciones, simulaciones, proyecciones, etcétera. Pero exigirles a los estudios de impacto ambiental un estándar científico es una equivocación. Lamentablemente, algunas autoridades y espacios académicos así lo plantean: que los estudios ambientales son estudios científicos y, en rigor, no lo son, porque si uno le aplicase el método científico no se podría aprobar nada. Entonces, creo que ahí hay una reflexión que abordar con algunas autoridades, no solo las actuales, sino que, siendo justos, gobiernos anteriores fueron instalando esta idea de que los estudios tienen que responder a un criterio científico, lo cual, en mi opinión es incorrecto; lo que debe responder a un criterio científico son las metodologías que se aplican para hacer esos estudios, pero no los estudios propiamente tal.

Sr. Humberto Peña.

—*Se ha planteado muchas veces que las regulaciones son razonables, pero en su uso y aplicación conducen a situaciones inconvenientes, entonces ¿el problema está en las normas o*

en los criterios de quienes resuelven en el aparato público? ¿Estima que hay un cambio en la cultura interna en los organismos públicos? ¿se debiera también actuar sobre eso, desarrollar una política orientada a revisar esa cultura?

Sr. Pablo Daud Miranda.

—Yo creo que hay una mezcla; hay malas regulaciones, lo digo con baja posibilidad de cometer un error. Hay regulaciones que en el último tiempo lo único que hacen es restringir, hay pocas regulaciones basadas en incentivos, por ejemplo. Pero, por sobre eso, también hay una mala aplicación de las reglas y a nivel reglamentario y a nivel de gestión se ha tratado de resolver el problema a mi juicio por la vía incorrecta, que es sacar instrucciones, sacar guías y lo único que han hecho esas guías y esas instrucciones es rigidizar el problema, encarecer los estudios, imponer nuevas restricciones y condiciones y dar más elementos discrecionales para hacer más preguntas, más observaciones, etcétera.

Termino con esta reflexión. Estimo oportuno hacerse esta pregunta: los servicios públicos prestan un servicio público que la sociedad le ha asignado. Entonces, refiriéndonos a la institucionalidad ambiental, es necesaria la pregunta, por ejemplo, concretamente, el organismo que está cargo de otorgar los permisos se llama SEA, Servicio de Evaluación Ambiental. Una reflexión interesante es saber ¿qué servicio presta el SEA? La respuesta, lamentable, que se escucha a veces, es que el servicio público que presta el SEA es ofrecer un procedimiento para la calificación ambiental de los proyectos. Es decir, como si el servicio a prestar fuese un trámite. En mi opinión, lo que el Servicio debe hacer es procurar que los proyectos en Chile sean ambientalmente sustentables y que cumplan todos los requisitos ambientales. Si definitivamente hay un proyecto que no logra superar esa valla de ser un proyecto sustentable, de que cumplan las reglas, se deberá rechazar, pero, a mi juicio, el rol del SEA debiese ser ayudar a los proyectos, y no una mera oferta de un procedimiento.

Si cambiásemos solo esa cultura o visión, creo que avanzaríamos. Por ejemplo, el SEA puedes abrir una división de apoyo a los inversionistas, de orientación, no de hacerles el trabajo, sino que de orientación; de indicar cuáles son las reglas del juego específicas que se deben cumplir, y respecto de las cuales el proyecto se va a evaluar. Si

viésemos una autoridad colaboradora yo creo que cambiaría radicalmente lo que estamos viendo en materia de evaluación ambiental.

Jaime Solari.

—*¿Ves alguna aplicación de la inteligencia artificial en los estudios de impacto ambiental, que permita aumentar la productividad del sistema?*

Sr. Pablo Daud Miranda.

—Sí, he visto recientemente casos en que se ha aplicado la inteligencia artificial; por ejemplo, se hizo un ejercicio de aplicación de inteligencia artificial a una Adenda en que se revisó si las respuestas estaban respondiendo efectivamente a las preguntas.

El uso de esta herramienta arrojó resultados bien interesantes: que había varias respuestas que no estaban respondiendo completamente a la pregunta.

Ahora bien, por la naturaleza eminentemente discrecional de la evaluación ambiental, no creo que exista una sustitución total del proceso mediante inteligencia artificial, al menos en el mediano plazo.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente IICH.

—*Bueno, muchas gracias, Pablo, estamos dando por terminada la conferencia, quiero agradecerte tu disposición y la claridad en todos tus planteamientos, y a todos los asistentes, gracias por participar. Nos veremos en una próxima conferencia, que tengan un muy buen día.*

Fin de la Conferencia.

DESAFÍOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

Sr. Rodrigo Espinoza, Gerente de Operación de Coordinador Eléctrico Nacional.



Sr. Rodrigo Espinoza.

El pasado 24 de julio de 2025 se realizó la conferencia del Sr. Rodrigo Espinoza, Gerente de Operación de Coordinador Eléctrico Nacional, quien expuso sobre el tema “Desafíos del Sistema Eléctrico Nacional”.

El Sr. Espinoza es Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Chile, y cursó estudios de Magíster en Ciencias, mención Geofísica, con especialización en Ciencias de la Atmósfera en la misma universidad. Cuenta con una trayectoria profesional de más de 28 años en el sector eléctrico.

Rodrigo Espinoza dará cuenta de la transformación que está experimentando el Sistema Eléctrico Nacional, la masiva integración de energías renovables variables y los desafíos que implica este proceso, especialmente tras el apagón sufrido el 25 de febrero de 2025, detallando acciones que se están impulsando desde el Coordinador Eléctrico Nacional.

A continuación, su exposición.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente.

—Muy buenos días a todos y todas. Como Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile les quiero dar la más cordial bienvenida a esta conferencia que hemos titulado “Desafíos del Sistema Eléctrico Nacional”.

Agradecemos la participación en esta conferencia de Rodrigo Espinoza, Gerente de Operaciones del Coordinador Eléctrico Nacional, quien será presentado en extenso por nuestro director Christian Hermansen.

En su presentación, Rodrigo se referirá a la transformación que está experimentando el Sistema Eléctrico Nacional con la masiva integración de energías renovables y los desafíos que implica este proceso, especialmente tras el apagón sufrido el 25 de febrero de este año. Además, detallará las acciones que se están impulsando desde el Coordinador Eléctrico Nacional.

Al final de la presentación, en la sección Preguntas y Respuestas, ustedes tendrán la posibilidad de plantear sus consultas a nuestro expositor, las que serán revisadas y seleccionadas por Christian Hermansen, director del Instituto.

Los dejo con Christian Hermansen, quien va a hacer la presentación de nuestro expositor.

Sr. Cristian Hermansen.

—Muy buenos días. Nuestro expositor de hoy es Rodrigo Espinoza, Gerente de Operación del Coordinador Eléctrico Nacional, el operador independiente del sistema eléctrico chileno. Rodrigo es Ingeniero Civil Electricista en la Universidad de Chile, con un Magíster en Ciencias, mención Geofísica, con especialización en Ciencias de la Atmósfera en la Universidad de Chile. Cuenta con una trayectoria profesional de más de 28 años en el sector eléctrico, especialmente en el Coordinador, donde ha desarrollado una destacada carrera.

En 2015 se hizo cargo de la Gerencia de Estudio del Departamento de Peajes del CDEC-SIC (Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central) y, a partir de 2017, fue Subgerente en las áreas de Aseguramiento de la Operación y en Estudio y Apoyo Operativo del Coordinador.

Desde octubre de 2022, ocupa el cargo de Gerente de Operación del Coordinador Eléctrico Nacional. Muy bienvenido, Rodrigo.

Sr. Rodrigo Espinoza.

Muchas gracias, Cristian y Juan Carlos. Les agradezco la oportunidad de compartir la visión del Coordinador respecto de la evolución del Sistema Eléctrico Nacional, enfocado principalmente en los eventos que nos tocó vivir a gran parte de los habitantes de nuestro país el 25 de febrero recién pasado.

Esta presentación está orientada a relevar los desafíos del Sistema Eléctrico Nacional enfocándonos en los aprendizajes del apagón del 25 de febrero recién pasado (Figura 1).



Figura 1

Una nota previa: esta presentación preparada por el Coordinador está basada en el Estudio de Análisis de Fallas que se presentó el 18 de marzo de este año y que fue enviado a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, y está complementada con algunos antecedentes que hemos recibido posteriormente.

Esa información se requirió a las empresas coordinadas en temas específicos como la operación de los Esquemas de Desconexión de Carga y la Desconexión de Unidades Generadoras, así como los Pequeños Medios de Generación Distribuidos.

Y bueno, estamos en curso con análisis internos y externos que eventualmente podrán aportarnos mayores antecedentes acerca de la causa raíz respecto a la propagación y

recuperación del servicio durante ese evento. Una vez que se finalicen los análisis serán publicados y compartidos con toda la industria y obviamente tendremos que actualizar esta presentación (Figura 2).

Nota

- Esta presentación contiene información del Estudio de Análisis de Falla realizado por el Coordinador Eléctrico y enviado a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, complementado con antecedentes adicionales recibidos posteriormente.
- Se requirió información adicional a los Coordinados, especialmente respecto de la operación de los Esquemas de Desconexión Automática de Carga y la desconexión de unidades generadoras y Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD).
- Están en curso análisis internos y externos que podrán aportar más antecedentes acerca de la causa raíz, propagación y recuperación de servicio. Una vez que se finalicen dichos análisis y estudios, el CEN podrá actualizar los antecedentes contenidos en esta presentación.

Figura 2

A grandes rasgos, nuestro Sistema Eléctrico Nacional se constituyó el año 2017 con la interconexión de los dos sistemas interconectados principales del país, que era el Sistema del Norte Grande y el sistema que estaba en la Zona Centro-Sur. Hoy la extensión geográfica de este sistema eléctrico es del orden de 3.100 kilómetros entre la ciudad Arica y la isla grande de Chiloé (Figura 3).



Figura 3

¿Cuáles son las principales cifras de este sector, de este sistema? Son del orden de 833 empresas coordinadas. Tenemos casi 40.000 kilómetros de línea de transmisión. Repartido en esas líneas hay 1.239 subestaciones y tenemos una capacidad de generación instalada del orden de los

36.800 megawatts, con 1.105 unidades generadoras centrales y, como contrapartida, en unidades que están ubicadas en la zona de distribución, que son los conocidos PMGD. Esos alcanzan un número que a mayo de este año era de 772 y con una capacidad instalada de 3.402 megawatts (Figura 4).



Figura 4

¿Qué es el Coordinador Eléctrico? Es un organismo técnico independiente, sin fines de lucro, que es responsable de coordinar la operación del Sistema Eléctrico Nacional de Chile. Se guía por tres principios de operación: la operación segura, a mínimo costo y el acceso abierto a los sistemas de transmisión.

No posee instalaciones que formen parte del sistema, todas ellas son responsabilidad de las empresas sujetas de coordinación. Tampoco posee facultades de regulación que están alojadas en la Comisión Nacional de Energía, ni de fiscalización, que están alojadas en la Superintendencia de Electricidad y Combustible, ni de sanción, respecto de las empresas coordinadas.

Se transan en el mercado eléctrico tanto energía, servicios complementarios como potencia, del orden de 2.000 millones de dólares. El Coordinador cuenta con 400 trabajadores, de los cuales un 21% son mujeres, y emite al año más de 2.000 informes en distintos ámbitos de su quehacer (Figura 5).

Bueno, vamos rápidamente a lo que nos interesa, la agenda de esta presentación. Primero, la situación previa y origen del apagón. Luego, sobre la propagación del evento; para referirme posteriormente a la recuperación de servicio;

los incumplimientos y las medidas que está adoptando el Coordinador sobre cómo mejorar la resiliencia y seguridad del Sistema Eléctrico Nacional (Figura 6).



Figura 5



Figura 6

Bueno, ¿cuál era la situación previa al apagón? El Sistema Eléctrico operaba de manera interconectada y estable, con una energía que fluía de manera natural de la zona norte, que tiene un gran excedente de generación solar, hacia la zona sur del país. La demanda en ese momento, la generación bruta que estaba siendo inyectada al sistema, era de 11.657 mega watts; la línea que se abre de manera intempestiva en el evento que origina el apagón, transportaba 1.800 mega watts por el tramo Nueva Maitencillo-Nueva Pan de Azúcar, que equivale a cerca del 90% de la capacidad máxima que se puede transmitir por ese corredor. Los envíos de energía eran principalmente de la zona norte, como les comentaba, por el abundante recurso solar y eólico desde esa zona del país. Y el sur dependía en parte de la energía que venía

desde la zona norte, junto con la generación solar, eólica, hidroeléctrica y térmica que estaba apostada en la zona sur de la subestación Nueva Pan de Azúcar.

La operación era estable, el sistema se operaba de manera normal y aplicando el criterio de seguridad N-1, es decir, que una contingencia simple en cualquier elemento del Sistema Eléctrico Nacional no se iba a propagar al resto de las instalaciones (Figura 7).

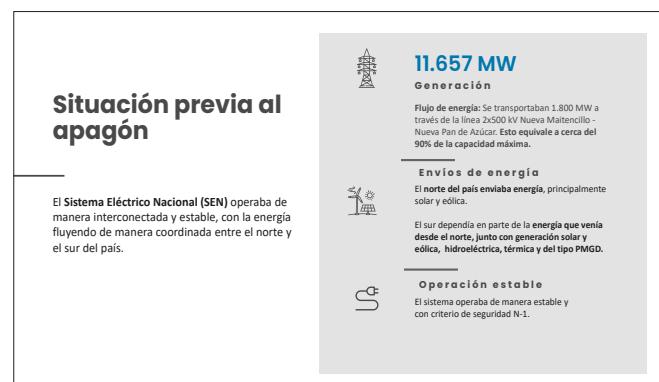


Figura 7

Este es un esquema ilustrativo de la situación justo al momento previo de la falla, es decir, a las 15:15 horas del 25 de febrero; teníamos un 73% de la generación inyectada al sistema que era proporcionada por recursos solares y eólicos, energía basada en inversores y el restante 27% estaba siendo abastecido por generación térmica e hidroeléctrica (Figura 8).

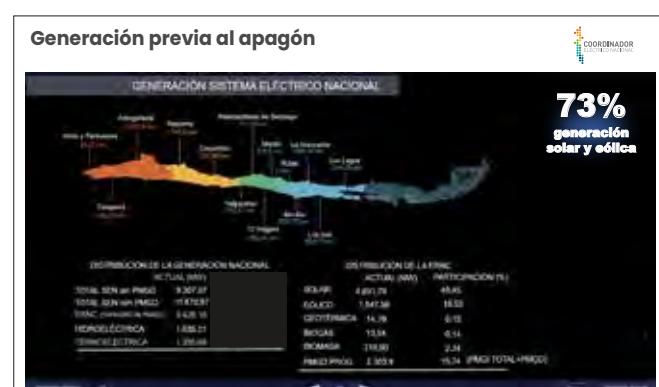


Figura 8

¿Qué pasó ese día? El sistema principal de protecciones de la línea 2x500kV Nueva Maitencillo - Nueva Pan de Azúcar, cuyo módulo de comunicaciones se había informado como inhabilitado por parte de la empresa, actuó incorrectamente al resincronizarse. Estamos hablando del corredor de 500kV que va entre estas subestaciones. Esto causó la desconexión de ambos circuitos, y el sistema eléctrico nacional quedó dividido en dos islas, una isla norte, que abastecía un 30% aproximadamente de la demanda, y la isla centro-sur, que abastecía aproximadamente el restante 70% (Figura 9).

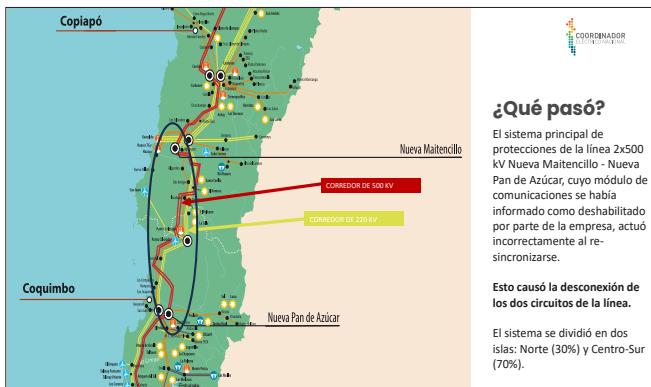


Figura 9

¿El origen? Previo a las 15:15 horas, que es cuando se produce el evento, a las 13:35, Interchile, que es el operador de este tramo de Nueva Maitencillo a Nueva Pan de Azúcar, informó al centro de control del Coordinador que había inhabilitado el módulo de comunicaciones de una de las funciones de protección de la línea. En ese momento, la línea estaba 100% con sus protecciones de respaldo operando. Interchile no informó ningún riesgo ni solicitó ningún permiso especial para intervenir este sistema de comunicaciones.

A las 15:13 horas, Interchile reinicia la controladora del sistema de comunicaciones de ese equipo en la subestación Nueva Maitencillo de tal forma de poder restablecer la comunicación. Esta acción que hizo Interchile a las 15:13 no fue informada ni contó, por lo tanto, con la utilización del Coordinador Eléctrico Nacional. Finalmente, a las 15:15 horas, la resincronización de la protección provocó la apertura de ambos circuitos de la línea.

Lo importante acá es que, en base al manual del fabricante de la protección que operó Interchile, se colige que Interchile debía aislar físicamente el equipo,

levantar los trip de la función 87L, la función diferencial de línea, lo que la empresa en esa oportunidad no realizó (Figura 10).

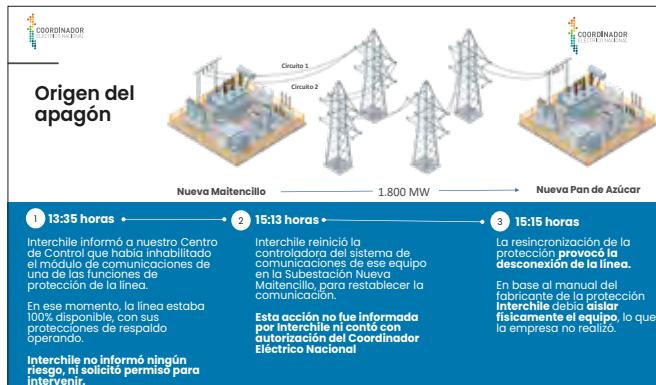


Figura 10

Veamos ahora cómo fue la propagación de la falla (Figura 11).



Figura 11

¿Por qué finalmente se llegó a un apagón total? El sistema registró una desconexión de ambos circuitos de esta línea, prácticamente de manera instantánea, y luego de 1,5 segundos, se formaron dos islas eléctricas.

En esos 1,5 segundos, como veremos en unas láminas más adelante, el sistema de 220kV que estaba en paralelo con este sistema de 500 kV experimentó fuertes oscilaciones. El estudio de análisis de falla, que es público, presenta las secuencias en las que las centrales se desconectaron del sistema y la activación de los distintos esquemas de contingencia de contingencia, en este caso, los esquemas

automáticos de desconexión de carga y generación, que buscaban restablecer el equilibrio entre oferta y demanda. Estábamos perdiendo del orden de 1,800 MW más unos 250 MW que estaban circulando por el tramo de 220 kV, o sea, del orden de 2,100 MW, se perdieron desde la zona norte.

En el norte, a raíz de la operación de los esquemas de desconexión automática de generación, porque la zona norte quedó con un excedente de generación, la isla se mantuvo operativa por aproximadamente cuatro minutos, pero finalmente se produjo la pérdida total del suministro por inestabilidad de tensión y frecuencia (Figura 12).

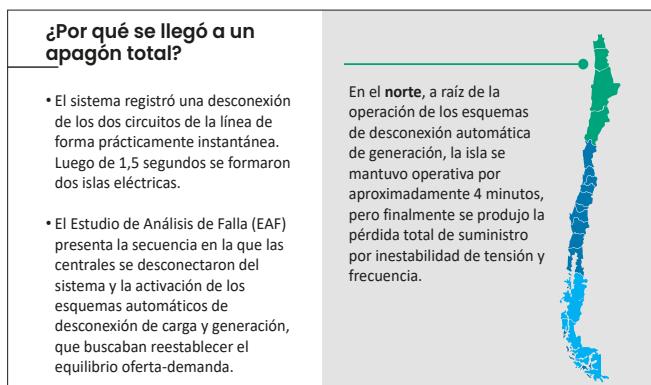


Figura 12

La isla centro-sur se volvió inestable en muy pocos segundos, a los cuatro segundos de formarse ambas islas, dada la interrupción, como comenté, de la energía que venía desde el norte que, en el caso del corredor de 500 kV, eran del orden de 1,800 MW, que provocó un desbalance del orden de un 25% de la demanda total que estaba siendo abastecida.

Gran parte de los mecanismos automáticos de defensa y control de contingencia que están a cargo de las empresas coordinadas actuaron, pero no en el tiempo y la magnitud requerida para detener la propagación del evento (Figura 13).

En esta lámina podemos ver cómo evolucionó la frecuencia el 25 de febrero en una ventana que es del orden de unos 4,5 segundos, y se ve cómo se forma la isla centro-sur, que fue una formación muy rápida, una caída abrupta de frecuencia a partir de los 4 segundos, y que tiene que ver con un desempeño deficiente de los mecanismos de control de contingencia.



Figura 13

La frecuencia, como pueden ver en la isla centro-sur, que es la que está acá abajo, se estabiliza durante los primeros 2 segundos, pero luego, como se puede apreciar, empieza a caer y de manera sostenida.

La Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicios, en el artículo 3-10, establece que, al alcanzar los 47,5 hertz, las centrales generadoras, pueden desconectarse, y eso fue lo que finalmente gatilló una caída abrupta de frecuencia y finalmente el colapso de la isla centro-sur (Figura 14).

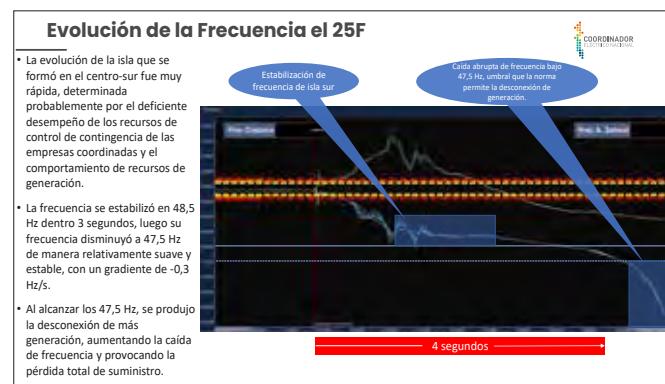


Figura 14

Estos gráficos muestran cómo evolucionó la tensión. Se experimentó una fuerte sobretensión. Esta es una barra de 220 kV en la zona norte, norte-chico, zona centro y zona sur, donde se aprecia que en la zona norte tuvimos una sobretensión marcada, superior a la tensión máxima que se puede soportar en condiciones de emergencia de acuerdo a la norma, y en la zona centro y la zona sur, esas sobretensiones estaban más atenuadas.

El aumento de voltaje en la zona norte se produjo por la falta de control de tensión de las plantas renovables variables, que fueron las que permanecieron en servicio, y la desconexión de un equipo de compensación de potencia reactiva.

En la isla centro-sur también se observó, como les comenté, un aumento de voltaje, aunque en menor medida (Figura 15).

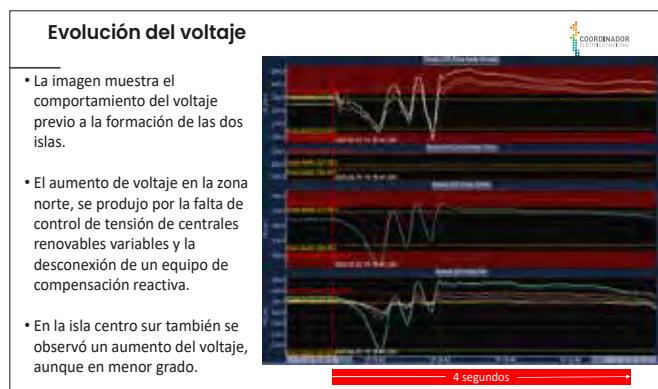


Figura 15

¿Cuál hubiese sido el comportamiento esperado de la isla centro-sur, que fue la que se inestabilizó en un momento, en un menor tiempo, del orden de 5 segundos? Acá tenemos la evolución de la frecuencia en el gráfico superior y abajo la evolución de la tensión. La línea verde muestra la simulación del comportamiento de estas dos variables, si es que los esquemas de protección y control de contingencia que estaban instruidos por el Coordinador hubiesen operado, de acuerdo con la instrucción que este Coordinador había emitido en su oportunidad.

Como pueden apreciar, se hubiese llegado a un error permanente en la frecuencia, del orden de los 49 hertz, un valor que está por sobre el umbral de cumplimiento normativo, y no a una condición como la que se vio el 25F, donde a partir de los 4 o 5 segundos ya vimos una caída sostenida en la frecuencia y posteriormente el colapso de la isla centro-sur.

Lo mismo pasa con la evolución de la tensión en esta isla. Según los estudios preliminares, esta isla entonces debió permanecer estable y la falla no debió propagarse. Tenemos algunos análisis en desarrollo con algunas universidades chilenas, que nos van a permitir afinar más las simulaciones que hemos realizado del fenómeno, porque lo que está en rojo no es una simulación, sino que es la tensión real,

medida por nuestra red de sincrofasores, y lo verde, como les comenté, es una simulación (Figura 16).

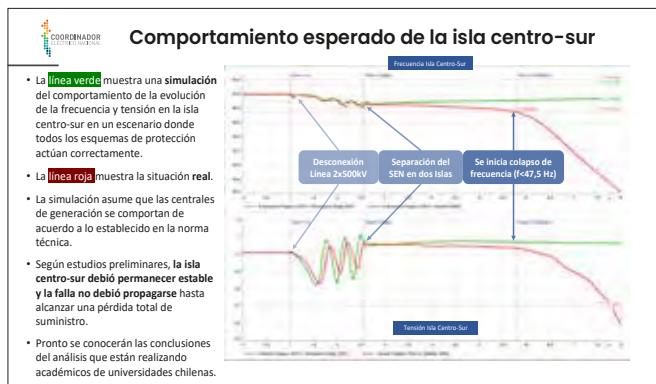


Figura 16

¿Y cómo fue, luego del colapso de ambas islas, el proceso de recuperación de servicios? (Figura 17).



Figura 17

Primero, se debe explicar bien cómo es nuestra arquitectura de SCADA y línea de voz de comunicaciones con los distintos centros de control de las empresas coordinadas.

Como comenté, el SEN no opera las instalaciones, sino que da instrucciones de coordinación y tiene un SCADA que recibe información en tiempo real de las empresas coordinadas. Esta información puede provenir directamente de un centro de control de una empresa coordinada o venir directamente de una RTU o un terminal remoto desde una subestación, donde se envían las señales de distintas variables eléctricas que deben ser monitoreadas en el SEN.

Actualmente, el SCADA recibe desde las empresas coordinadas del orden de 70.000 señales de medida y estado cada tres segundos.

Para garantizar, por otro lado, una comunicación eficiente con los distintos centros de control, se dispone de un sistema de voz Hotline, una línea punto a punto, que permite una comunicación inmediata para transmitir las instrucciones y compartir información esencial para la operación del Sistema Eléctrico Nacional (Figura 18).

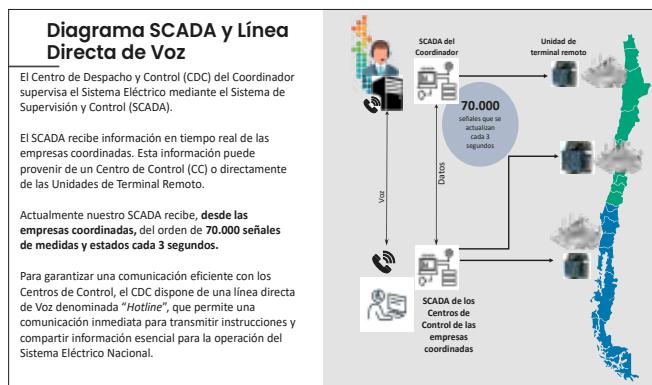


Figura 18

Cuando se produce el colapso de ambas islas, se tiene que comenzar a aplicar el Plan de Recuperación de Servicio que es un esquema descentralizado donde el sistema se recupera por áreas, a través de la formación de islas eléctricas que luego se van interconectando de manera sucesiva para poder recuperar la totalidad de los consumos. El Coordinador delega estas funciones en los Centros de Operación para la Recuperación de Servicio, o COR, y que están a cargo de las empresas coordinadas, de manera de poder tener un proceso más eficiente.

Como elemento importante, los COR están fuertemente determinados también por la propiedad o la responsabilidad de las instalaciones críticas o más relevantes en el sistema.

El Coordinador se comunica con los COR para instruir la ejecución de este plan de recuperación y, una vez formada la isla eléctrica, el centro despacho y control instruye la interconexión de esta isla y comienza a normalizar o armar nuevamente el sistema eléctrico nacional.

Los COR deben instruir la implementación de los esquemas de recuperación de servicio, que son específicos para las zonas que tienen que ser recuperadas, o donde se tienen que aplicar las respectivas partidas autónomas de centrales generadoras, que están en el área que tienen la carga.

Las áreas geográficas en que se organiza el sistema están predefinidas, tienen asignado una empresa responsable que ejerce la función de COR.

Todo esto se define en un estudio anual que publicamos generalmente en el mes de mayo. Este año lo publicamos el 30 de junio y está en etapa de observaciones de las empresas coordinadas (Figura 19).

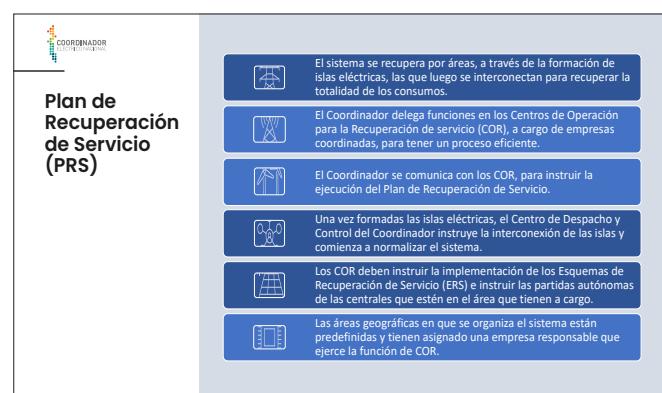


Figura 19

¿Cuáles son las áreas para recuperación del servicio? El 25 de febrero, a los 2 minutos del evento, se activa el plan de recuperación. Está la capacidad instalada que tiene el sistema de partida autónoma, es decir, de centrales que pueden inyectar energía al sistema sin apoyo externo. Estas enfrentaron distintas dificultades técnicas al intentar conectarse a la red, lo que produjo un retraso en la normalización del suministro eléctrico. No hay ningún misterio que el 25 de febrero la recuperación fue bastante lenta.

Las razones de estos retrasos se explican principalmente por la falta de visibilidad de los sistemas SCADA de algunas empresas coordinadas, indisponibilidad de telecontrol de instalaciones y de vías de comunicación punto a punto. Esto impidió que se generaran las condiciones necesarias para una ejecución eficaz de los procesos de partida y conexión de las centrales que estaban instruidas para dar el servicio

de partida autónoma. Dado el rol de Transelec, que como se puede ver, ejercía como COR en gran parte de las zonas de recuperación del país, la indisponibilidad que presentó su sistema SCADA y de los telemundos por cerca de tres horas retrasó de manera significativa el proceso de recuperación del servicio (Figura 20).



Figura 20

¿Cuáles son los elementos clave respecto de la operación a distancia? Básicamente, si esto funciona de manera efectiva, con una disponibilidad del 100%, los tiempos de ejecución de los telemundos son muy cortos. Una vez que recibe la instrucción nuestra, la empresa coordinada hace recepción y envía un telemundo a la subestación y al interruptor. Con ello, la partida autónoma se podría ejecutar en tiempo de respuesta que es del orden de los segundos (Figura 21).

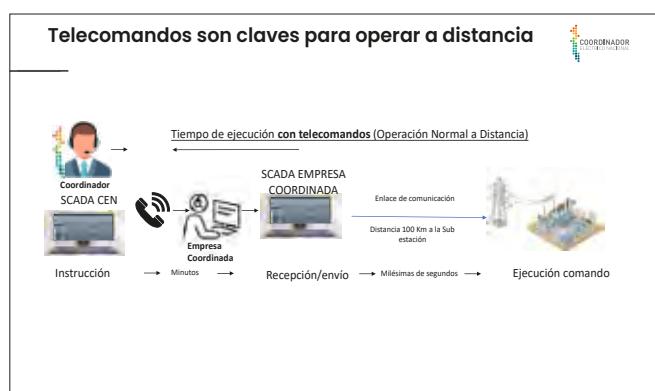


Figura 21

Sin embargo, en situaciones en que por alguna razón no tenemos disponible alguno de estos elementos y la subestación, como en el panel de arriba, es tele-atendida, no tiene personal en sitio, hay que trasladarse en vehículo y, por lo tanto, la instrucción que da el Coordinador que, eventualmente puede tomar segundos, puede llegar a tomar horas.

Y lo mismo en el caso de tener una subestación atendida, donde pasamos desde una instrucción que se ejercía en segundos a una que se va a ejercer en minutos (Figura 22).



Figura 22

¿Cuáles son los incumplimientos que a la fecha hemos levantado y que creemos que son elementos clave del resultado de la propagación del evento del 25 de febrero? Son los que voy a mencionar ahora y que también van de la mano con el conjunto de medidas que hemos levantado y que publicamos el día martes en nuestra página web. Ahí hay un documento que presenta el plan de medidas que el Coordinador al cual ha arribado luego de distintos análisis que hemos realizado (Figura 23).

A ver, los posibles incumplimientos que han sido informados a la SEC, en primer término, tienen que ver con la incorrecta operación del esquema protección de la línea 2x500 KV Nueva Maitencillo - Nueva Pan de Azúcar, así como la intervención de esos esquemas de protecciones, control y comunicaciones sin una solicitud de trabajo, ni conocimiento, ni autorización del Coordinador. En el caso del Centro de Control de Transelec y dado que presentó esta indisponibilidad de comunicación de voz operativa SCADA y telecontrol, durante alrededor de tres horas, fue un elemento clave también para contribuir a la tardanza en la recuperación del servicio post apagón.



Figura 23

Algunas empresas coordinadas tampoco entregaron información oportunamente, lo que atenta contra la posibilidad de realizar un análisis exhaustivo del fenómeno que produjo el apagón. Esto también condujo al retraso en los análisis que se están realizando.

Respecto de la propagación, se identificó un desempeño deficiente de algunos esquemas de desprendimiento automático de carga y de algunas centrales generadoras de propiedad de empresas coordinadas, incluido también a los PMGDs (Figura 24).



Figura 24

Bueno, desde ese minuto hasta ahora hemos hecho un trabajo con rigor técnico, con el profesionalismo y la entrega que caracteriza al equipo del Coordinador. La idea es adoptar acciones que le permitan al Sistema Eléctrico Nacional tener un mejor desempeño ante un evento de similares características, bajo el convencimiento de que una situación así, con una recuperación de servicio como

la que se produjo o la propagación de la causa origen de este evento, no debería volver a pasar.

Se trabajó en cuatro ejes: en gestión de los riesgos del sistema, un plan de acción integral y priorizado, en un foco estratégico y un fortalecimiento estructural del sistema.

Las medidas que vamos a mirar rápidamente requerirán cierto compromiso de la industria y son complementarias a otras que se puedan tomar en el marco de la regulación, la fiscalización y en los procesos y eventuales inversiones que deban realizar los distintos agentes (Figura 25).

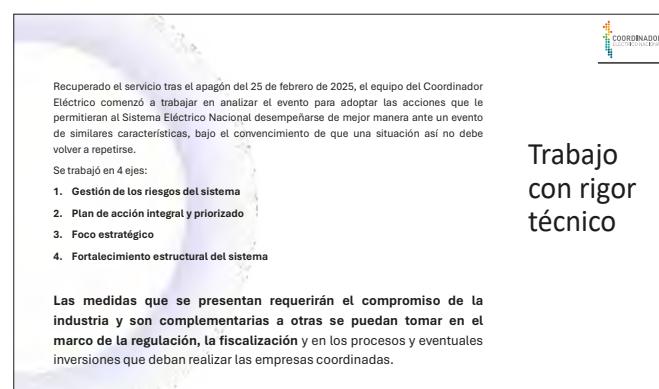


Figura 25

Tenemos básicamente cuatro ejes. Hubo una secuencia de medidas de mediano y largo plazo. Una prevención y mitigación ex-ante, que buscan evitar que vuelva a ocurrir una situación como la que pasó el 25 de febrero. Un mejoramiento de la planificación, el fortalecimiento de la infraestructura, el incentivo al cumplimiento normativo y la proposición de mejoras en la norma.

Contención de la propagación de fallas. Esto se enfoca en reducir las consecuencias cuando ya ocurre un fenómeno disruptivo, limitando la propagación y preservando la estabilidad. Incluye ajustes operacionales, mejora en la respuesta ante contingencia y, nuevamente, incentivos al cumplimiento normativo y el fortalecimiento de los sistemas de respaldo.

Una recuperación rápida del servicio. Estas medidas están diseñadas para restablecer el suministro de manera segura y en el menor tiempo posible, involucran mejora de protocolos, coordinación entre distintos actores y mejoramiento de las herramientas de monitoreo.

Y, finalmente, aprendizaje y mejora continua; donde está la mejora del proceso de registro análisis y el reporte de fallas, para obtener los aprendizajes necesarios y determinar medidas correctivas.

Estas medidas permiten aprovechar y recoger el conocimiento y toda la información que se derivan de situaciones como la que vivimos el 25 de febrero (Figura 26).



Figura 26

Dentro de las medidas de prevención y mitigación, hay un listado exhaustivo, yo me voy a centrar básicamente en las que están en negrita.

Implementación de nuevas herramientas tecnológicas que detecten en forma automática situaciones de riesgo y confiabilidad para apoyar la toma de decisiones de operación en el tiempo real. Hoy día, con la creciente inserción de energía basada en inversores, las dinámicas del sistema pasan del espectro electromecánico al espectro electromagnético, por lo tanto, los pasos de integración de las herramientas de simulación tienen que pasar desde los milisegundos hacia los microsegundos y eso requiere del desarrollo de herramientas distintas, fundamentalmente para poder hacer simulaciones de transitorios electromagnéticos.

Incorporación de la verificación del parque generador con un plan enfocado en aquellas unidades que tienen desempeño insuficiente. Hay que revisar su modelo, su estándar y su comportamiento dinámico.

Implementación de un programa de difusión y capacitación a las empresas coordinadas respecto de la aplicación del

uso de los sistemas de permiso de trabajo y la evaluación de los riesgos operacionales y procedimientos que tengan que ver con las intervenciones en instalaciones que pueden ser críticas, particularmente si es todo el sistema de 500 kV del Sistema Eléctrico Nacional (Figura 27).

Prevención y mitigación ex-ante



- Implementar nuevas herramientas tecnológicas que detecten de forma automática situaciones de riesgo y confiabilidad para apoyar la toma de decisiones en la Operación en Tiempo Real (DSA-EMT).
- Proponer nuevos requerimientos para la prestación de Servicios Complementarios de control dinámico de tensión y frecuencia por parte de las centrales solares y eólicas, así como sistemas de almacenamiento.
- Incorporar en la verificación que se realiza del parque generador un plan enfocado en aquellas unidades que tienen desempeño insuficiente, revisando sus modelos, estándares, y comportamiento dinámico.
- Implementar un programa de difusión y capacitación para empresas coordinadas respecto de la obligación del uso del sistema de permisos de trabajo y evaluación de riesgos operacionales y procedimientos críticos.
- Implementar plan de auditorías técnicas preventivas de los sistemas de protección de activos críticos de transmisión.
- Aumentar el alcance y frecuencia del Estudio de Verificación y Coordinación de Protecciones para incorporar el efecto de las nuevas instalaciones que se integran al sistema.
- Acelerar la implementación de simulaciones avanzadas de transitorios electromagnéticos (EMT) del sistema eléctrico, para modelar, analizar y anticipar situaciones de riesgo que podrían presentarse en la operación ante escenarios de baja fortaleza y alta inserción de recursos en base a inversores (IBR).
- Ampliar la exigencia de implementación del sistema de medición de variables fisiológicas en tiempo real (PMU) a todas las centrales que se conectan al sistema de transmisión, para poder aumentar la capacidad de monitoreo y registro de fallas de la red.

Figura 27

En el eje de contener la propagación de las fallas, voy a destacar dos: mejoramiento del control de tensión dinámico del sistema, especialmente en zonas de baja fortaleza y robustez. Esto es bien importante porque hoy día hay, en etapa de consulta pública, una modificación de la norma técnica de seguridad y calidad de servicio, que es nuestro código de red, donde la Comisión Nacional de Energía ya está internalizando los conceptos de fortaleza y robustez que tienen que ver con zonas del sistema donde la generación sincrónica está siendo desplazada por generación que está basada por sistemas inversores. Por lo tanto, es muy importante que las centrales renovables variables, que están basadas fundamentalmente en electrónica de potencia y los sistemas almacenamiento, tengan que ajustar sus requerimientos, de tal forma de poder hacer un control de tensión dinámico como lo haría un AVR de una máquina sincrónica.

Lo segundo es la aplicación de un nuevo enfoque para desarrollar el plan de defensa contra contingencia extrema y los recursos necesarios para contener las fallas, tanto los esquemas de desconexión de carga como en los esquemas de desconexión de generación, con foco en definir escenarios más exigentes y con alta participación de generación renovable variable, sistema almacenamiento y, por supuesto, generación de PMGD (Figura 28).

Contener la propagación de fallas

- Mejorar el control de tensión dinámico del sistema, especialmente en zonas de baja fortaleza y robustez, a través del aporte de centrales renovables variables y sistemas de almacenamiento, para lo cual se actualizará el Estudio de Control de Tensión y requerimientos de Potencia Reactiva que se realiza todos los años.
- Garantizar la eficiencia en la asignación de recursos para la prestación de Control Primario de Frecuencia, considerando criterios de distribución geográfica y desempeño.
- Aplicar un nuevo enfoque para desarrollar el Plan de Defensa ante Contingencias Extremas (PDCE), y los recursos necesarios para contener fallas (EDAC y EDAG), con foco a definir escenarios más exigentes y con alta participación de generación renovable variable, sistemas de almacenamiento y generación de PMGD.
- Implementación de una plataforma de visualización en tiempo real de los Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD) que permita su supervisión y apoyo el análisis y toma de medidas de seguridad.
- Implementación de las modificaciones actualmente en consulta pública a la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS) en temas relacionados a los Recursos Basados en Inversores (IBR): Grid Forming y Grid Following.

Figura 28

En el caso de la recuperación rápida de servicio, lo que destacamos es la introducción de un nuevo escenario de exigencia en el plan de recuperación de servicio, el que a julio 2025, como mencioné, está en etapa de recibir observaciones y estamos ávidos de poder recoger el feedback de la industria, de tal forma de fortalecer nuestro plan de recuperación de servicio.

Adicionalmente, está el diseño e implementación de un plan integral de capacitación, con perfiles, entrenamiento y certificación para operadores de la sala de control del Sistema Eléctrico Nacional, integrando las mejores prácticas internacionales en esta materia (Figura 29).

Recuperación rápida del servicio

- Introducir nuevos escenarios y exigencias en el Plan de Recuperación de Servicio (PRS) 2026, el que a julio de 2025 se encuentra en etapa de recibir observaciones de la industria.
- Revisar, y de ser necesario actualizar o rediseñar el modelo de interacción funcional entre el Centro de Despacho y Control (CDC), los Centros de Operación para la Recuperación del Servicio (COR, que actualmente asumen empresas relevantes del sistema) y los Centro de Control (CC) de empresas coordinadas.
- Diseñar e implementar un Programa Integral de Capacitación, Perfiles, Entrenamiento y Certificación para Operadores de las salas de control del Sistema Eléctrico Nacional, integrando las mejores prácticas internacionales en la materia.
- En modificaciones futuras del PRS se instruirá contar con operadores con respuesta rápida en instalaciones críticas de generación (centrales con partida autónoma) y de transmisión (COR).
- Fortalecimiento integral de requisitos, verificaciones y auditorías técnicas preventivas a los modelos dinámicos y sistemas de control y protección de las plantas renovables y sistemas de almacenamiento, así como a los sistemas de monitoreo y telemundo (SCADA) de las empresas coordinadas.

Figura 29

Finalmente, en lo que es aprendizaje y mejora continua, la realización de un procedimiento interno que tenga que ver con la estandarización de la elaboración de los informes de análisis de falla.

También está la implementación de una plataforma de gestión y control de cumplimiento normativo por parte de las empresas coordinadas, de tal forma que puedan tener una clara visibilidad, una conciencia situacional de cuál es el estado de cumplimiento de las distintas instalaciones que son de su responsabilidad (Figura 30).

Aprendizajes y mejora continua

- Realizar un Procedimiento Interno para estandarizar y automatizar la recepción masiva de información técnica asociada a la elaboración de los informes de análisis de fallas (EAF), para hacer más eficiente el proceso y permitir el análisis detallado de los eventos.
- Implementación de una plataforma de gestión y control de cumplimientos normativos por parte de empresas coordinadas.

Figura 30

Finalizando, este es el mensaje que quiero transmitirles. Este es un sistema que se debe adaptar a los desafíos de una transición energética que se vio agudizada por el evento del 25 de febrero. Este plan de medidas que presenta el Coordinador es parte de un proceso de mejora continua y que debe abordarse con toda la industria. Y más allá de la responsabilidad de cada actor, evitar una situación como la ocurrida el 25 de febrero exigirá un trabajo acucioso y exigente a todos, tanto a las empresas como a las instituciones.

Y esta exigencia responde al acelerado proceso de transición y transformación tecnológica, el cual por se, incluso hasta antes de lo ocurrido el 25 de febrero, está aumentando los desafíos operacionales, tanto en funciones que están dentro del ámbito de acción del Coordinador como en aquellas que competen a las empresas.

Esperamos que este plan permita avanzar sobre medidas concretas cuyo desarrollo se pueda monitorear y controlar, que tenga accountability y, en un escenario donde la exigencia de los usuarios del sistema crecerá, acorde a los desafíos de esta transición.

El Coordinador Eléctrico Nacional, por supuesto, invita a todos los actores del sector a contribuir en este proceso de

mejora, por lo cual reitera nuestra disposición y apertura al diálogo, así como a la colaboración para que el Sistema Eléctrico Nacional eleve sus estándares de seguridad y confiabilidad de suministro (Figura 31).

Un sistema que se adapta a los desafíos

COORDINADOR ELÉCTRICO NACIONAL

- El plan de medidas presentado por el Coordinador es parte de un proceso de mejora continua, el que debe abarcar a toda la industria eléctrica.
- Más allá de las responsabilidades de cada actor, el evitar que una situación como la ocurrida el pasado 25 de febrero se repita exigirá un trabajo acucioso y exigente a todos los actores del sector, empresas e instituciones.
- Esta exigencia responde al acelerado proceso de transición energética y transformación tecnológica, el cual está aumentando los desafíos operacionales del sistema, tanto en las funciones que están dentro del ámbito de acción del Coordinador Eléctrico Nacional, como en aquellas que compete a las empresas, al regulador y al ente fiscalizador.
- Esperamos que el este plan permita avanzar sobre medidas concretas, cuyo desarrollo pueda monitorearse y controlarse, en un escenario donde la exigencia de los usuarios y del sistema crecerá acorde a los desafíos de la transición energética.
- El Coordinador Eléctrico Nacional invita a todos los actores del sector a contribuir en este proceso de mejora continua, para lo cual reitera su disposición y apertura al diálogo, así como a la colaboración para que el Sistema Eléctrico Nacional eleve sus estándares de seguridad y confiabilidad del suministro.

Figura 31

Muchas gracias.

A continuación, el Sr. Espinoza responde preguntas y comentarios de los asistentes. Modera don Cristian Hermansen.

Sr. Sergio Bitar.

—*Consideran ustedes que el Coordinador tiene atribuciones suficientes para cumplir su propósito y qué cambios propondrían?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—Nosotros tenemos un rol que está establecido en la ley, en los reglamentos y en las normas técnicas, pero hemos hecho recomendaciones normativas.

Hay un artículo de la ley que nos permite realizar propuestas al Ministerio para hacer ajustes normativos. La hemos hecho en materia de PMGD luego del evento, sin perjuicio que ya antes habíamos enviado algunas recomendaciones y, fundamentalmente, en el caso de los PMGD estaban relacionadas con contar con una cierta visibilidad de los

recursos que están inyectando energía en las redes de distribución, porque en el momento de la falla nosotros teníamos del orden de 2.300 megawatts de generación ubicada en el sistema de distribución, del cual no teníamos ninguna visibilidad y, por lo tanto, no tuvimos ninguna noticia de qué es lo que había pasado o cuál había sido su comportamiento. Esa falta de visibilidad, efectivamente, reviste algún riesgo, del cual nos tenemos que hacer cargo. Por eso salió particularmente esta recomendación normativa para poder instruir o conseguir desde la empresa distribuidora, de forma agregada, una señal de cuál es la generación en línea que tienen estos medios de generación y que están inyectando al sistema.

Sr. Sergio Bitar.

—*Existe suficiente incentivo y sanciones para que las empresas actúen con prontitud y tomen las iniciativas responsables?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—En la medida que toda la institucionalidad funcione conforme a lo que establece la normativa, los incentivos están. Nosotros como Coordinador, si detectamos un incumplimiento, tenemos ciertos plazos para informar a la entidad fiscalizadora, que en este caso es la Superintendencia, y luego de eso la superintendencia tiene que tomar esos antecedentes, hacer traslado al Coordinado, que eventualmente está en algún incumplimiento y seguir un proceso administrativo, que eventualmente derive en alguna sanción o eventualmente, si es que el incumplimiento no es tal, lo libere de esa carga. Ahora, esto tiene dinámicas quizás muy lentas y que no contribuyen a que se haga un proceso eficiente o efectivo para poder manejar la ingente cantidad de incumplimientos que ya relevamos luego del evento del 25 de febrero.

Sr. Andrés Bastías.

—*Cuál fue el análisis respecto a la activación del sistema de protección de la línea Nueva Maitencillo - Nueva Pan de Azúcar? ¿Se trató de una falla de diseño, implementación o supervisión?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—Bueno, eso es parte de la investigación. Lo que yo sí puedo relatar son los hechos. La protección operó sin haber una falla en el sistema, por lo tanto, *per se*, ya es una condición anómala y operó en circunstancias de que el responsable de la instalación estaba interviniendo equipos que se relacionaban con la función de protección que se quería resincronizar, que fue la protección diferencial de línea. Esos son los hechos.

Ahora, si la protección operó mal por una condición muy improbable, una en un millón, eso es un tema que es parte del análisis forense que se está realizando. Yo entiendo que el responsable de la instalación está haciendo estudios para determinar cuál fue la razón de esa operación indeseada y nosotros como Coordinador instruimos una auditoría técnica que lo que quiere relevar es básicamente la situación, el estado de las protecciones de ese tramo que falló el 25 de febrero.

Adicionalmente, nosotros hicimos una instrucción al propietario, a Interchile, donde le pedimos que separara las comunicaciones de las diferenciales de línea de ambos circuitos. Estos dos circuitos por diseño tienen una condición donde comparten las comunicaciones de ambos circuitos en el mismo canal. Por lo tanto, si ese canal fallaba, la protección diferencial de ambos circuitos quedaba indisponible y fue al momento de reponerla, que finalmente fue la 87L de ambos circuitos la que abrió.

Entonces hicimos una solicitud a Interchile de modificar esa condición de diseño. Interchile no accedió, pero eso es parte de los temas que están hoy día todavía en desarrollo. Eso te puedo contestar, Cristian.

Sr. Elías Arze.

—Se cuenta ya con el Informe de Electric Power Research Institute (EPRI), el informe de la universidad, ¿en qué fecha estará?

Sr. Rodrigo Espinoza.

—El informe de EPRI está en la última etapa. El informe tenía 2 partes.

Una parte que tenía que ver con el análisis de la propagación de la falla y una segunda parte que tenía que ver con el análisis del proceso de recuperación de servicios. Esa segunda parte es la que todavía no está cerrada.

El informe asociado a las universidades ya está en la última etapa. Nosotros esperamos contar con la entrega de ese estudio. Entiendo que se esperaba para esta semana. No he tenido todavía novedades de si ya lo tenemos, pero esta semana era el compromiso de contar con él.

Así que pronto, yo diría que, en las próximas semanas, creo que ya se podrían hacer públicos y debería ser publicado en nuestra página para toda la industria.

Sr. Gonzalo Crozier.

—*El episodio fue descartado como evento relacionado a ciberseguridad?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—Sí, la verdad que tenemos muy claro que no se trató de un evento de ciberseguridad. Fue una mala operación del esquema de protecciones y que tendría como origen una intervención en esos equipos.

Sr. Daniel Ramírez.

—*Qué explicación dan las empresas y en especial Transelc por la falla del sistema SCADA?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—Bueno, eso es parte del proceso de investigación.

Lo que es público y lo que puedo señalar es que efectivamente les falló el sistema de soporte de batería y también la generación local de respaldo que tenían. Eso causó que los equipos de comunicaciones quedaran desenergizados y eso provocó la indisponibilidad tanto de su sistema de comunicaciones como de su SCADA. Y está en curso una auditoría que probablemente debería salir publicada, al igual que la de Interchile, durante el mes de agosto.

Eso es lo que estimamos preliminarmente.

Sr. Jorge Leal.

—*¿Qué deficiencias de Coordinación se detectaron con los PMGD?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—Lamentablemente yo no podría responder con propiedad esa pregunta, porque la coordinación de los PMGD es directa con la empresa distribuidora.

Nosotros nos entendemos con los Centros de Control de las empresas de distribución, cuando tenemos que aplicar, por ejemplo, alguna reducción de generación de PMGD, porque los flujos se invierten hacia el sistema zonal y podrían sobrecargar una instalación. Ahí nosotros le instruimos la reducción a la empresa distribuidora. No tenemos una coordinación directa con los PMGD.

Sr. Fernando Torres.

—*¿Han pensado en cómo realizar el monitoreo en tiempo real asociado a la futura línea Kimal - Lo Aguirre, Si las simulaciones deben pasar de RMS a EMT, ¿también se esperaría que el monitoreo sea más veloz?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—Sí. A ver, el sistema HVDC va a tener las mismas características de monitoreo que tienen actualmente las instalaciones.

Obviamente se van a disponer de medidores fasoriales que tienen una tasa de muestreo mucho más alta. Toman varias muestras por ciclo de la onda de tensión y corriente. Por lo tanto, va a haber un monitoreo de fenómenos de oscilaciones de alta frecuencia de manera adecuada.

El proyecto considera la instalación de réplicas de los controladores del sistema HVDC. Esas réplicas se van a simular en un esquema de hardware in the loop. Por lo tanto, vamos a tener capacidad de simular el comportamiento de los

controladores del HVDC, incluso previo a la materialización de la interconexión de la línea.

Sr. Renato Agurto.

—*El Coordinador ha puntualizado que, ante la creciente participación de generación renovable variable, el sistema eléctrico nacional requiere disponer de generación que aporte dos elementos, inercia rotatoria y capacidad de cortocircuito. En la condición que se encontró operando el sistema eléctrico nacional el 25 de febrero: ¿hubo algún efecto asociado a la suficiencia de estos elementos en el fenómeno ocurrido?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—La respuesta a esa pregunta es no. ¿Y por qué lo puedo afirmar con tanta seguridad? Porque nosotros en mayo del año pasado adjudicamos una licitación de condensadores síncronos. Estamos hablando de casi un gigavolt-amper de potencia de condensadores síncronos en la zona norte, y básicamente el elemento que gatilla la justificación de la instalación de esos condensadores tiene que ver con el refuerzo de la capacidad de cortocircuito en ciertas barras de referencias que se utilizaron para dimensionar el requerimiento. Y hoy día, si bien no existen esos condensadores síncronos que permiten apalancar la capacidad de cortocircuito, y en alguna medida también la inercia, porque van a contar con un volante de inercia esas instalaciones, el driver para esa decisión tiene que ver con desplazar generación síncrona, que hoy día estamos despachando durante el horario solar con una restricción de inercia con la cual resolvemos el proceso de programación diaria de la operación.

Es decir, ese día 25 de febrero estaba plenamente vigente la restricción de inercia en la zona norte, y por lo tanto el nivel de seguridad que nosotros definimos para efectos de contar con suficientes recursos de cortocircuito y control de tensión estaban cubiertos.

Sr. Alan Cáceres Delgado.

—*Si los sistemas de generación renovable hubieran tenido capacidad de gridforming, igual que los sistemas de almacenamiento, ¿habrían ayudado a evitar el tamaño de la falla?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—En la isla norte, yo creo que ese es un elemento muy relevante, de haber contado con recursos de control de tensión dinámico, como mencioné, un esquema tipo AVR de un síncrono. Si lo hubiera hecho alguna instalación con capacidad de gridforming, que lo pueden hacer, yo creo que las sobretensiones que finalmente derivaron en el colapso de la isla norte se hubiesen podido controlar.

Yo creo que efectivamente uno de los ejes de nuestras medidas es lograr que la generación renovable variable aporte esos atributos y por lo tanto contribuyan a hacer un control dinámico de tensión en zonas particularmente que tienen baja fortaleza de red.

Sr. Alan Cáceres Delgado.

—*Si hubiéramos tenido mayor capacidad de almacenamiento, ¿se habría podido evitar o disminuir la falla?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—No lo sé. Enlazándola con la respuesta anterior, yo creo que si esa capacidad de almacenamiento hubiese tenido capacidad de gridforming y hacer control de tensión, yo creo que la isla norte se hubiese salvado y eso hubiera contribuido a que el sistema se hubiese podido armar partiendo de la zona norte hacia la zona sur de manera más rápida.

Sr. Douglas Pollock.

—*¿De qué manera el Coordinador garantiza la estabilidad de la red ante una creciente penetración renovable, en particular referido a la operación continua de fuentes de respaldo basada en combustibles fósiles que mantienen la inercia?*

Sr. Rodrigo Espinoza.

—Bueno, eso lo mencioné. O sea, para poder contar con el atributo cierto de control de tensión en la zona norte,

que está dominada por generación basada en inversores del tipo no formadora de red, sino que seguidora de red, es necesario que exista una referencia y esa referencia clásica es la generación síncrona, son las masas rotatorias girando. Y nosotros tenemos hoy día, como les comenté, una restricción que es el proxy de esa condición, es decir, la forma de representarlo en el modelo de optimización es a través de un atributo de inercia de la unidad generadora, sin perjuicio de que el problema no es un problema inercial, es un problema de tensión. Pero para representarlo estamos usando como proxy la inercia. Y, por lo tanto, lo que nosotros esperamos es que una vez que estén instalados los condensadores síncronos que se licitaron exitosamente en mayo del año pasado, nosotros podamos efectivamente cumplir con la restricción sin necesidad de mantener una restricción de generación forzada en la zona.

En el caso que esté activa esa restricción, porque yo diría que, hoy por hoy, dada la condición hidrológica en el sistema, esa restricción diría que no se activa dado que tenemos muy baja generación hidráulica, por lo tanto, la generación térmica tiene que estar en servicio por esa razón, más que por la restricción de inercia.

Sr. Cristian Hermansen.

—*Muchas gracias, Rodrigo. Quedaron preguntas sin contestar y también hay sugerencias que dicen que sería muy interesante tener esta conferencia una vez que estén los estudios y con los resultados, así es que, Rodrigo te transmitimos eso para una próxima oportunidad. Y ahora dejo al presidente del Instituto de Ingenieros, Juan Carlos Barros, para que cierre el tema.*

Sr. Juan Carlos Barros.

—*Bueno, muchas gracias, Cristian por atender las consultas y muchas gracias a Rodrigo por tu presentación y desde ya te quiero invitar Rodrigo a una futura conferencia, una vez que tengamos mayor claridad sobre esta situación.*

Muchas gracias, que tengan un buen día.

Fin de la conferencia.

CONVERGENCIA BIODIGITAL: APLICACIONES A LA SALUD, ROBÓTICA, NEUROPRÓTESIS Y AGRICULTURA

VISIÓN ARTIFICIAL BIOINSPIRADA AL SERVICIO DE LA SALUD DIGITAL

Sr. Adrián Palacios, Presidente del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso.



Sr. Adrián Palacios.

El pasado 28 de agosto de 2025, nuestro expositor invitado fue el Sr. Adrián Palacios, presidente del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso y Doctorado en Ciencias, mención Neurociencia de la Universidad Pierre et Marie Curie, París VI, Francia, quien expuso sobre el tema “Convergencia Biodigital: Aplicaciones a la Salud, Robótica, Neuroprótesis y Agricultura. Visión Artificial Bioinspirada al Servicio de la Salud Digital”.

El Sr. Palacios, además, es Profesor Titular de Neurociencia de la Universidad de Valparaíso, desde el año 1996. Es investigador del Centro Interdisciplinario de Neurociencias de Valparaíso e investigador del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso. Tiene un trabajo de postdoctorado extenso en la Universidad de Yale en Estados Unidos.

Es miembro del Consejo Asesor Ministerial de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación en Chile. Ha sido miembro del Consejo Asesor en Equidad de Género del Ministerio de Ciencia y Tecnología, y del Consejo Asesor para la Red de Laboratorios Universitarios de Diagnóstico del COVID. Fue integrante y coordinador para el capítulo de América Latina de la International Brain Research Organization (IBRO).

A continuación, su exposición.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente.

—Muy buenos días a todos y todas, como Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, les quiero dar la más cordial bienvenida a esta conferencia que hemos titulado “Convergencia Biodigital: Aplicaciones a la Salud, Robótica, Neuroprótesis y Agricultura”.

Nuestra conferencia del mes de agosto está dedicada a un tema novedoso relacionado con las nuevas fronteras que se presentan para la ingeniería y la convergencia entre el mundo biológico y el mundo digital.

Agradecemos la participación en esta conferencia de Adrián Palacios, presidente del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso y profesor titular de Neurociencia en la Universidad de Valparaíso.

Él va a ser presentado en extenso por Alejandro Steiner quien es director del Instituto y presidió la Comisión llamada Convergencia Biodigital; esta comisión acaba de terminar un documento que va a ser prontamente puesto a disposición de la comunidad.

Finalmente, queremos expresar nuestro agradecimiento a REUNA que hace posible esta reunión con ustedes.

Muchas gracias, bienvenidos todos y todas.

Sr. Alejandro Steiner.

—Tengo el placer de presentar a Adrián Palacios y me voy a limitar a mencionar los muy numerosos roles que ha tenido Adrián.

Es profesor del Instituto de Neurociencia en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valparaíso desde el año 1996. Es investigador del Centro Interdisciplinario de Neurociencias de Valparaíso. Es investigador del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso. En su formación es doctor en Neurociencia en la Universidad Pierre et Marie Curie, en Francia. Y tiene un trabajo de postdoctorado extenso en la Universidad de Yale en Estados Unidos.

Su laboratorio se especializa en ecología sensorial. Se enfoca en la interacción entre la estructura y función del sistema

visual. Y cómo este sistema responde a las características lumínicas del entorno. Explora cómo los animales utilizan la luz para regular comportamientos variados. Desde la selección de parejas y el reconocimiento entre individuos para técnicas de camuflaje. Me interesa es poner en relieve que para ello aplican técnicas avanzadas en electrofisiología y bioquímica, para analizar las funciones del sistema visual.

Adicionalmente, estudia la neurobiología del aprendizaje y la memoria, realizando estudios bioquímicos y evaluando la plasticidad sináptica para comprender las causas de la neurodegeneración relacionada con el envejecimiento.

Bienvenido Adrián.

Sr. Adrián Palacios.

—Muchas gracias por la presentación y agradezco la invitación. Es un gran honor estar acá. Sobre todo, que yo no soy del área de la ingeniería, sino más bien del área de la biofísica o neurociencia. No voy a hablar aquí mucho de biología, pero sí de la interfase entre la biología y lo digital.

Aquí está el título de la conferencia que ya fue anunciado. Trata de la relación entre lo biológico, sistema visual en particular, que es mi área de trabajo; con su aplicación a diversas áreas, como la salud, robótica, neuroprótesis y algo de agricultura, como ejemplos de aplicación (Figura 1).



Figura 1

En esta área de la investigación biodigital es fundamental hacerse cargo de nuevas definiciones, como la de integración entre la biología y las tecnologías digitales. Esta convergencia está impulsando avances disruptivos en productividad, innovación y salud, al tiempo que redefine la relación entre la biología y nosotros como seres humanos y nuestra sociedad.

Un ejemplo de ello es cómo la diversificación tecnológica ha fortalecido la biología digital, incorporando disciplinas como la biología, la ingeniería y la informática. De este cruce han surgido áreas como la bioinformática, que transforma datos biológicos en software, y a su vez ha dado origen a la biología sintética.

Otro campo en plena expansión es la salud digital, que hoy acorta los tiempos de diagnóstico y tratamiento de diversas patologías. Y en esta línea, ¿por qué no aprovechar también la inteligencia artificial? Esta ya está transformando radicalmente el desarrollo de fármacos, la medicina personalizada y el seguimiento de la salud poblacional.

Por supuesto, estos avances traen consigo grandes desafíos: desde las consideraciones éticas sobre la privacidad de los datos y la seguridad biológica, hasta la desigualdad en el acceso y la necesidad de marcos regulatorios adecuados.

En lo que sigue, me gustaría focalizarme en algunos de estos aspectos y, sobre todo, mostrar cómo la biología sensorial, que es mi área de investigación, está contribuyendo activamente a esta gran revolución biodigital (Figura 2).



Figura 2

Si revisamos la página del World Economic Forum sobre las *10 tecnologías emergentes* del año 2024 (y podríamos hacerlo con cualquier otro año), observamos que muchas de ellas están directamente inspiradas en la biología.

La naturaleza funciona aquí como modelo y fuente de innovación. Por ejemplo, la captura de carbono mediante microbios, que aprovecha procesos biológicos para enfrentar el cambio climático; o el estudio de las propiedades elásticas de los músculos, simuladas artificialmente para mejorar el rendimiento energético en nuevas tecnologías.

Del mismo modo, los avances en genómica están ampliando las posibilidades de trasplantes y terapias personalizadas, mostrando cómo la biología no solo explica la vida, sino que también impulsa desarrollos tecnológicos con un impacto profundo en la sociedad (Figura 3).



Figura 3

En nuestro laboratorio estudiamos los procesos sinápticos que se originan a partir de la interacción entre la radiación electromagnética, la energía de los fotones y la biología.

La pregunta central es: ¿qué estructuras o mecanismos biológicos permiten captar esa energía y transformarla en una señal con valor biológico?

Los fotorreceptores cumplen justamente esa función. Estos elementos no solo captan la energía de los fotones, sino que la convierten en señales que alimentan un complejo sistema metabólico esencial para el funcionamiento del sistema visual.

Dicho de otra manera, el sistema visual ofrece una solución biológica a un problema físico. Y lo hace a través de diferentes vías metabólicas que aseguran su operación eficiente.

En primera instancia, cuando la energía de un fotón es absorbida por un pigmento visual, una proteína unida a un aldehído derivado de la vitamina A, este compuesto pasa de un estado de reposo a un estado de excitación, desencadenando la cascada que dará origen a la señal visual (Figura 4).

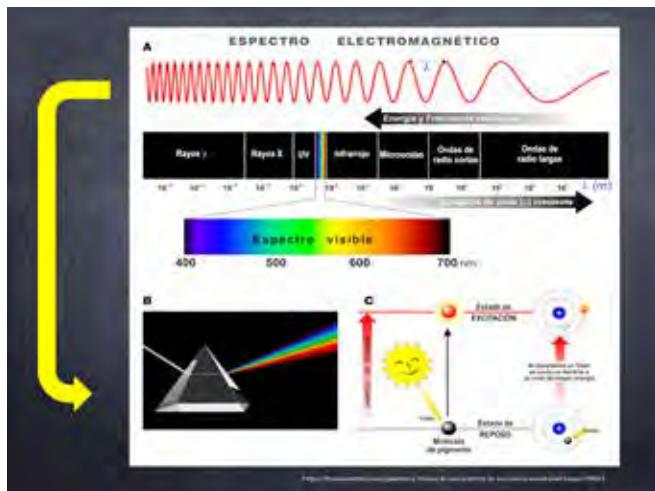


Figura 4

Ese estado de excitación desencadena la activación de múltiples vías metabólicas.

Una de ellas es la que permite la emisión de fotones de menor energía, fenómeno conocido como fluorescencia.

Otra vía fundamental es la fototransducción, proceso que ocurre en los fotorreceptores y convierte la energía lumínica en señales eléctricas.

Existen además procesos de ionización y de cambios en las estructuras energéticas estables de los sistemas biológicos, que contribuyen a la compleja respuesta del sistema visual frente a la luz (Figura 5).

Franz Boll descubrió en el ojo la existencia de una sustancia fotosensible que cambiaba al recibir luz: pasaba de un estado púrpura a otro distinto. Con este hallazgo planteó la existencia de un componente químico esencial en el

proceso de fototransducción, aunque en ese momento aún no se conocía con precisión de qué sustancia se trataba (Figura 6).



Figura 5



Figura 6

Este descubrimiento impulsó a numerosos laboratorios en todo el mundo a estudiar las vías bioquímicas implicadas en la visión, investigando la naturaleza de aquella sustancia fotoquímica que actuaba como un puente metabólico entre la energía lumínica y los procesos biológicos.

Con el tiempo, la investigación avanzó hacia nuevas etapas. A través de la psicofísica se comenzó a explorar la sensibilidad del ojo humano frente a cantidades extremadamente

pequeñas de fotones, con el objetivo de determinar la energía mínima necesaria para evocar una respuesta visual (Figura 7).



Figura 7

En el ámbito de la fisiología de la retina, el trabajo clásico de Lettin y Maturana en la década de 1960 analizó cómo la red retiniana procesa la información, desde la respuesta de los fotorreceptores hasta el funcionamiento integrado de una red neuronal completa (Figura 8).



Figura 8

A comienzos de la década de 1970, desde Stanford surgió una innovación fundamental. El equipo de Denis Baylor

introdujo la técnica de las pipetas de succión, que permitió registrar la actividad de fotorreceptores aislados en retinas de anfibios.

En la figura se muestra un fotorreceptor aislado, un bastón de retina de rana, introducido mediante succión negativa en el interior de una pipeta. Esto permitía establecer un sello eléctrico en el segmento externo, donde se concentran los pigmentos visuales responsables de la sensibilidad a la luz.

Gracias a esta técnica fue posible registrar la denominada photocorriente, es decir, la variación de la corriente de entrada como respuesta a la absorción de fotones. Con ello se abrió un campo central en la biofísica visual: el estudio de la maquinaria molecular que sustenta la extraordinaria sensibilidad del ojo (Figura 9).

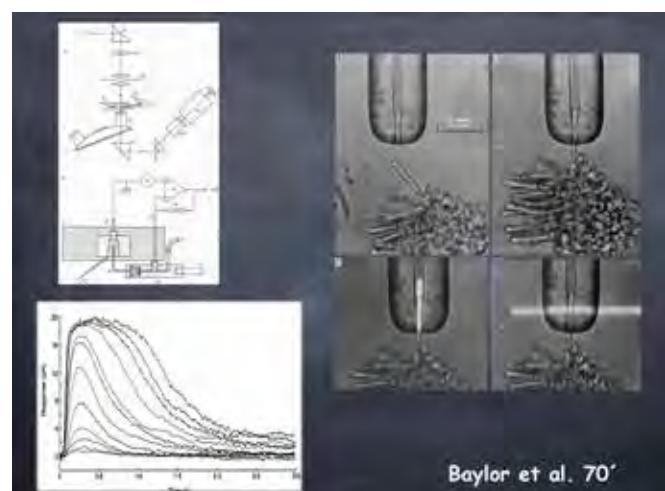


Figura 9

En la diapositiva se observa una micrografía electrónica de los fotorreceptores.

En esta etapa, la investigación comenzó a profundizar en la bioquímica interna de estas células. Los canales iónicos poseen compuertas moleculares que regulan el paso de iones: sodio hacia el interior y potasio hacia el exterior. Este flujo iónico genera cambios de potencial eléctrico que permiten la comunicación de los fotorreceptores con otras células de la retina.

La presencia o ausencia de luz modula estos flujos y produce respuestas diferenciadas.

En términos simples, la luz convierte al fotorreceptor en un interruptor molecular: de captar energía como sensor luminoso, pasa a activar un mecanismo de señalización. Este es el principio de diseño fundamental de estas células especializadas (Figura 10).

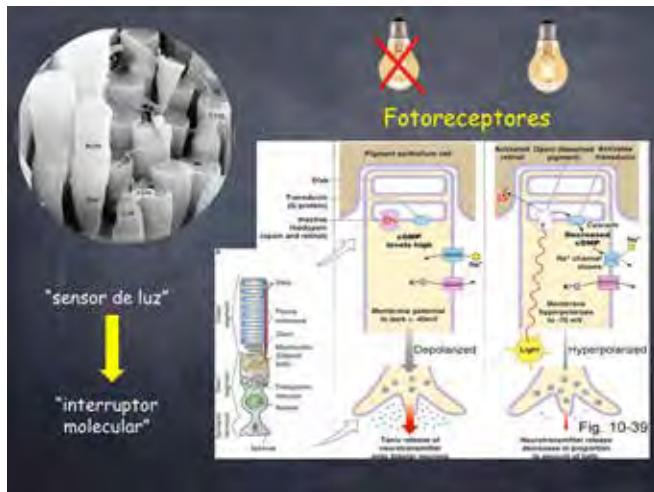


Figura 10

Con el tiempo se comprendió que la retina no era un simple receptor pasivo de luz, sino una red altamente compleja, organizada en capas: fotorreceptores, células bipolares, células ganglionares y distintos tipos de interneuronas que establecen conexiones laterales. En conjunto, conforman una sofisticada red neuronal.

La gran diversidad y densidad de estas células permite que la retina procese las señales visuales de manera especializada, generando respuestas relacionadas con el movimiento, el contraste, el color, la velocidad y muchas otras funciones (Figura 11).

También surge una pregunta fundamental: ¿cuáles son los mecanismos que permiten la visión del color? Es decir, ¿cómo pasamos de la simple captación de la energía de los fotones a la compleja experiencia perceptual del color?

La Figura 12 busca ilustrar este contraste, aunque aquí se muestra en blanco y negro.

Y acá ya con los atributos de color (Figura 13).

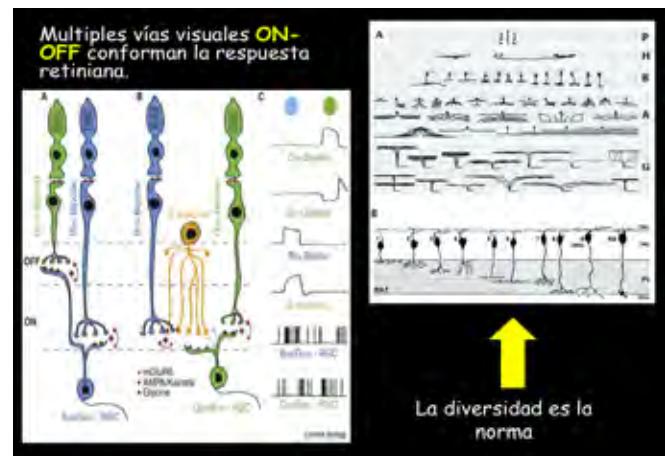


Figura 11

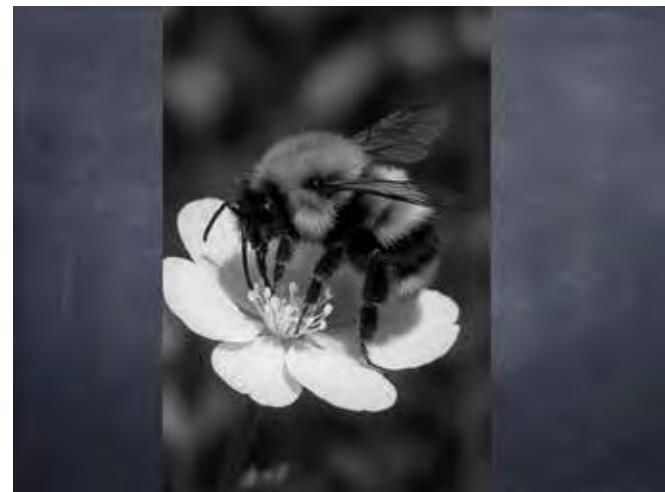


Figura 12



Figura 13

“Esto se debe, en términos simples, a que nuestro genoma contiene la información necesaria para producir diversas proteínas visuales, que conforman los pigmentos visuales. Cada uno de estos pigmentos posee un espectro de absorción particular, lo que permite comparar distintas longitudes de onda de la radiación electromagnética en el rango de 400 a 700 nanómetros.

De estas proteínas conocemos hoy no solo la secuencia de aminoácidos que las conforma, sino que en algunos casos incluso se ha logrado determinar su estructura cristalizada.

Un descubrimiento clave, realizado hace ya varias décadas, fue que para que estas proteínas funcionen efectivamente como pigmentos visuales necesitan estar acopladas a un cromóforo: una molécula derivada de la vitamina A (un aldehído de éster). Como los seres humanos no producimos vitamina A de manera endógena, debemos obtenerla a través de la alimentación¹.

Esto muestra cómo la relación entre nuestro organismo y el entorno resulta fundamental para que podamos ver (Figura 14).

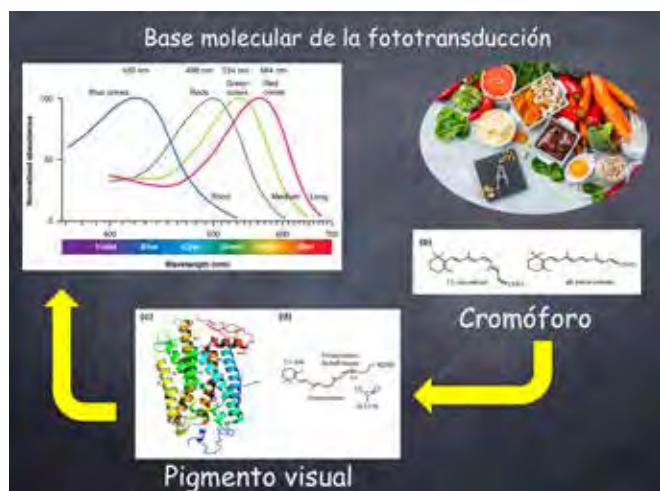


Figura 14

1 Nota del Editor. El cuerpo puede producir vitamina A a partir de precursores, conocidos como carotenoides. En cualquier caso, es mejor la ingesta directa de la vitamina.

Hoy contamos con una gran cantidad de resultados sobre el sistema visual. A modo de resumen, en lo que respecta a la arquitectura de la retina, sabemos que en los humanos existen cerca de 160 millones de fotorreceptores, encargados de iniciar los procesos de absorción de luz.

Toda esa información converge en aproximadamente 1,5 millones de células ganglionares, cuya actividad constituye la salida del ojo hacia el cerebro.

La tarea de la retina, consiste entonces en transformar la señal proveniente de 160 millones de fotorreceptores en la respuesta de 1,5 millones de células ganglionares, a través de una red de interconexiones que generan distintos códigos neurales y que son enviados al cerebro. Será luego el cerebro el encargado de decodificar estas respuestas (Figura 15).

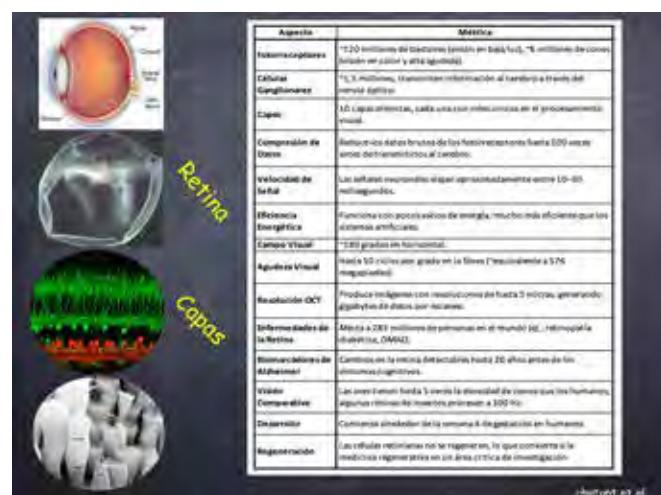


Figura 15

Un aspecto particularmente interesante, y al que me he dedicado en los últimos años, es la caracterización y comprensión de la comunicación entre el ojo y el cerebro, utilizando la metodología de las matrices de multielectrodos.

Estas consisten en placas con distintos números de electrodos: existen versiones de 60, 256 y, más recientemente, en nuestro laboratorio hemos incorporado placas de 4.200 electrodos. Esto nos da la capacidad de registrar de manera simultánea la actividad de cientos de neuronas en este tejido nervioso, a través de un área muy pequeña (aproximadamente 2 mm x 2 mm), mientras responde a diferentes estímulos visuales.

El análisis de estos registros poblacionales es clave para entender cómo el ojo transmite señales codificadas al cerebro. Luego, será el cerebro el que deba decodificar estas señales, analizarlas, generar estadísticas internas y, finalmente, tomar decisiones a partir de ellas (Figura 16).

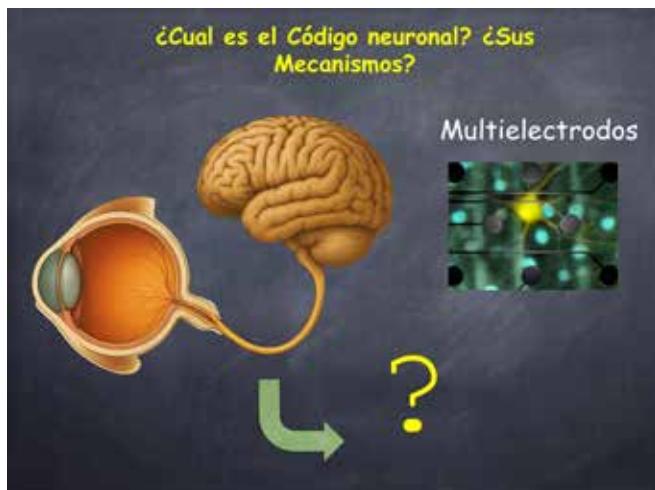


Figura 16

Ahora les muestro un ejemplo. Estas pequeñas esferas representan los campos receptivos de las células ganglionares: es decir, el área física (o ángulo sólido) de los fotorreceptores que, al ser estimulada visualmente, genera una respuesta en una célula ganglionar específica.

Cada vez que se activa, aquí señalado en rojo, corresponde a la respuesta fisiológica de esa célula, expresada como un potencial de acción. Durante un periodo prolongado de estimulación es posible caracterizar esta respuesta como una serie temporal.

Es importante destacar que el cerebro no recibe desde la retina una imagen tipo píxel por píxel, como lo haría una cámara fotográfica. Lo que recibe son patrones de actividad temporal, que debe decodificar.

La tarea del cerebro, entonces, es aprender de estas series temporales, reconocer su dinámica, detectar sus regularidades y darles significado. Este ejemplo busca precisamente desmitificar la idea de que el ojo transmite imágenes; lo que envía realmente es una actividad concertada en el tiempo, organizada en patrones dinámicos de respuesta (Figura 17).

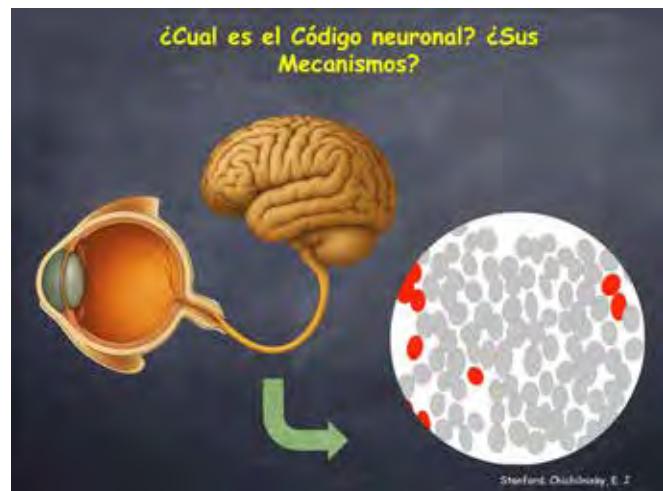


Figura 17

Ya en el siglo actual, el estudio de la visión se desarrolla en laboratorios de todo el mundo desde múltiples enfoques. Va desde la terapia génica aplicada al sistema visual, hasta sus vínculos con el arte, el diseño, la optometría y la oftalmología, además de una amplia gama de aplicaciones médicas.

Se trata de un campo profundamente interdisciplinario, que conecta la ciencia básica con las aplicaciones prácticas, abriendo nuevas posibilidades en salud y tecnología (Figura 18).

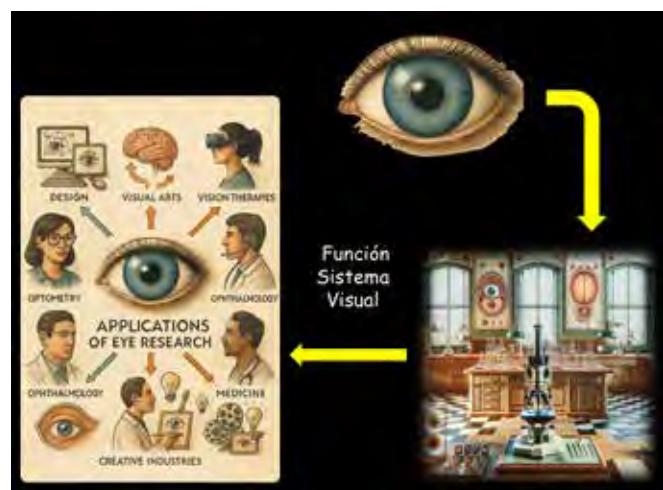


Figura 18

Entramos ahora en una nueva transición temática. David Marr, destacado investigador del MIT que falleció prematuramente, propuso un marco teórico que aún hoy constituye la base de gran parte de la neurociencia computacional. Planteó que el estudio del sistema visual debía abordarse en distintos niveles de análisis.

El primer nivel es el computacional, que formula preguntas como: ¿qué tarea realiza el sistema y con qué propósito? En biología, por ejemplo, la luz se procesa para reconocer objetos o estimar distancias. Este enfoque también inspiró a la inteligencia artificial, donde tanto los sistemas biológicos como los artificiales de visión contribuyen a comprender qué significa esta información para el organismo o el sujeto.

El segundo nivel definido por Marr es el algorítmico, que se pregunta cómo se codifican las entradas visuales: ¿cuál es el algoritmo que transforma la información luminosa en representaciones útiles? Aquí se vincula el ojo con el cerebro y, en la actualidad, este marco encuentra un paralelo en los modelos de redes neuronales artificiales que optimizan predicciones mediante procesos inspirados en la visión biológica.

Finalmente, está el nivel de implementación, que corresponde a la estructura biológica concreta. Así como los servidores y *data centers* sostienen el procesamiento digital, en biología la retina constituye el sustrato inicial del procesamiento visual. Allí, como red neuronal estructurada y determinada genéticamente, comienza la codificación de la información visual.

Nuestro genoma define esa red neuronal a través de los diferentes elementos que la componen. Esto último nos da un piso sobre el cual uno parte (Figura 19).

Hoy en día avanzamos hacia una comprensión más integrada de la retina como red neuronal estratificada, caracterizada por una gran convergencia sináptica. Como se mencionó, en el ojo humano, cerca de 160 millones de fotorreceptores convergen finalmente en alrededor de un millón de células ganglionares, que constituyen la salida principal y sobre las cuales realizamos nuestros registros.

Esto conduce a debates tanto teóricos como prácticos acerca del código neuronal más efectivo: ¿se basa en la frecuencia de disparo?, ¿en la temporalidad de los potenciales de acción?, ¿o en la separación entre ellos o en patrones más complejos como los que mostramos inicialmente?



Figura 19

Estas preguntas alimentan el desarrollo de modelos computacionales que, a su vez, generan aplicaciones e innovaciones tecnológicas en diversos ámbitos. La Figura 20 ilustra de manera sintética esta integración entre los procesos biológicos y los enfoques digitales.

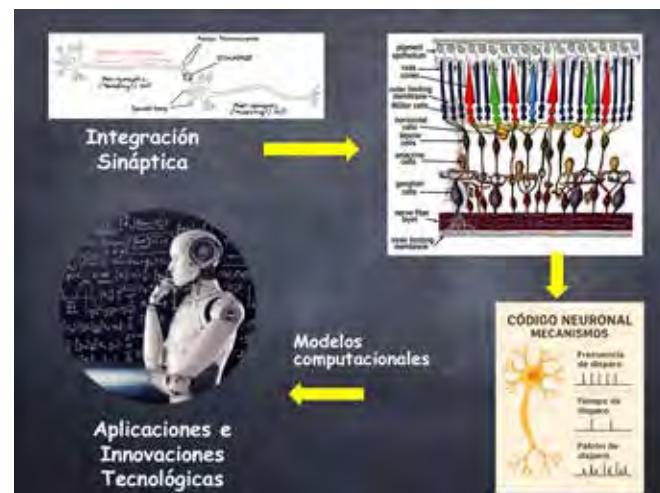


Figura 20

Hoy sabemos que la retina funciona como un auténtico procesador natural de Big Data. Maneja millones de entradas visuales, reduce redundancias y genera un código altamente eficiente, perfeccionado por la evolución y utilizado cotidianamente por los humanos durante millones de años.

Gracias a ello, nuestro sistema visual nos permite interactuar y sobrevivir en el entorno con una eficacia extraordinaria.

La retina es, en este sentido, un ejemplo único de gestión de datos complejos y de alta dimensión en tiempo real, un desafío que incluso los sistemas tecnológicos más avanzados buscan emular (Figura 21).



Figura 21

En un plano más aplicado al mundo digital, el conocimiento biológico ha inspirado soluciones como las interfaces cerebro-computador, los vehículos autónomos, la robótica y la imaginería médica. Hoy enfrentamos el desafío de analizar de forma óptima la gran cantidad de imágenes que generan los ensayos clínicos, tarea en la que los métodos bioinspirados han resultado fundamentales.

Asimismo, tecnologías como la realidad aumentada se nutren directamente de los principios del sistema visual, replicando funciones que la biología ha perfeccionado durante millones de años (Figura 22).

Volvamos un poco atrás, porque todo este conocimiento ha tenido una evolución lenta y acumulativa. No se trata de ideas que aparecen de un día para otro, sino de descubrimientos que se van sumando a lo largo del tiempo.

Si retrocedemos al año 1665, encontramos la *Micrographia* de Robert Hooke, una obra pionera en la que, mediante lupas y dibujos hechos a mano, se registraron detalles

anatómicos sorprendentes. El ojo humano, puesto al servicio de la creatividad y el buen trazo, permitió generar propuestas que aún hoy conservan vigencia. Un ejemplo es el dibujo minucioso del ojo de un insecto, realizado en aquella época, que muestra la riqueza de la observación morfológica y abrió camino al desarrollo de la anatomía comparada.



Figura 22

Ya hacia 1780, Luigi Galvani comenzó a explorar la naturaleza eléctrica de la comunicación nerviosa, dando origen al estudio de la transmisión sináptica.

A comienzos del siglo XIX, Thomas Young y, más tarde, Hermann von Helmholtz propusieron las primeras teorías fundamentales sobre la visión del color. Plantearon que el ojo debía poseer distintos tipos de fotorreceptores o mecanismos específicos para codificar la información cromática. Estas ideas, en un principio teóricas, sentaron las bases de la fisiología de la visión y guaron gran parte de las investigaciones posteriores (Figura 23).

Las propuestas del siglo XIX abrieron el camino a nuevos avances. Entre ellas destacan los trabajos de Johannes Müller, quien formuló la *Ley de las energías específicas*. Según esta idea, cada nervio sensorial transmite un tipo particular de información al cerebro: los nervios ópticos para la visión, los auditivos para el sonido, y otros para el tacto o el gusto. Cada modalidad sensorial tendría, por tanto, su propia forma de codificación.

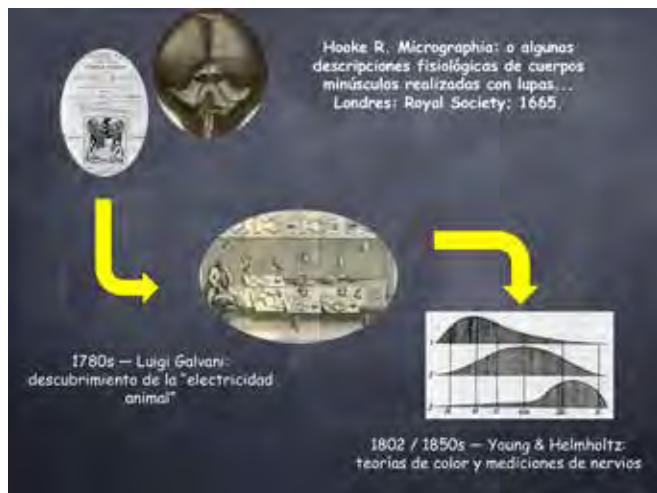


Figura 23

En esa misma época, Hermann von Helmholtz desarrolló el oftalmoscopio, un instrumento que revolucionó el estudio clínico de la visión al permitir observar directamente la morfología del fondo de ojo, técnica que aún hoy se utiliza con tecnologías de mayor resolución.

Ya hacia 1900, Santiago Ramón y Cajal recibió el Premio Nobel por sus investigaciones pioneras. Con gran destreza como observador y dibujante, describió con extraordinaria precisión la estructura de órganos sensoriales como la retina, el cerebelo y el cerebro. Sus aportes, basados en la microscopía de la época, sentaron las bases de la neurociencia moderna. En paralelo, Camillo Golgi introdujo su técnica de tinción, que junto con la doctrina neuronal contribuyó a revelar la organización fundamental del sistema nervioso (Figura 24).

En las décadas de 1920 y 1930, Hans Berger realizó las primeras mediciones de la actividad eléctrica cerebral, inaugurando el uso del electroencefalograma.

Más tarde, hacia los años 60, el Premio Nobel otorgado a David Hubel y Torsten Wiesel reconoció sus estudios pioneros sobre la organización del córtex visual. Descubrieron que el cerebro no respondía a la luz de manera uniforme, sino a través de múltiples áreas especializadas. Además, describieron la organización topográfica y la disposición en columnas de la corteza visual, hallazgos fundamentales para entender el procesamiento visual.

Ya en la década de 1970 comenzaron a surgir las primeras soluciones tecnológicas inspiradas en estos conocimientos.

Destacan los trabajos de Brindley y Dobelle, quienes desarrollaron prototipos de 'ojo biónico', conectando cámaras directamente a regiones cerebrales como una estrategia inicial para ofrecer soluciones a personas con discapacidad visual (Figura 25).



Figura 24

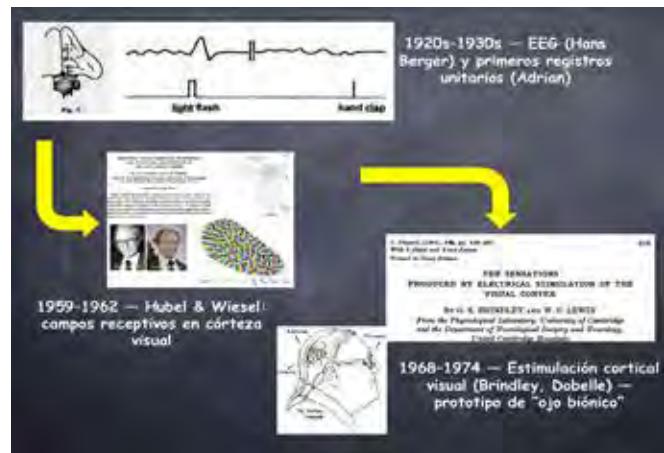


Figura 25

Hoy contamos con los avances heredados de los primeros estudios de resonancia magnética funcional (fMRI), que permiten registrar de manera indirecta la actividad cerebral a través de indicadores como el flujo sanguíneo o el consumo energético. Esta técnica transforma esas señales en mapas dinámicos que muestran qué áreas del cerebro se activan o desactivan ante distintas tareas, ya sea en condiciones de salud o en presencia de patologías, con una resolución cada vez mayor.

Otra innovación extraordinaria es la tomografía de coherencia óptica (OCT), que ha revolucionado el estudio de la estructura fina del ojo. A ello se suman las prótesis retinianas, hoy disponibles comercialmente, que representan la convergencia entre la investigación básica y las soluciones tecnológicas aplicadas a la discapacidad visual (Figura 26).

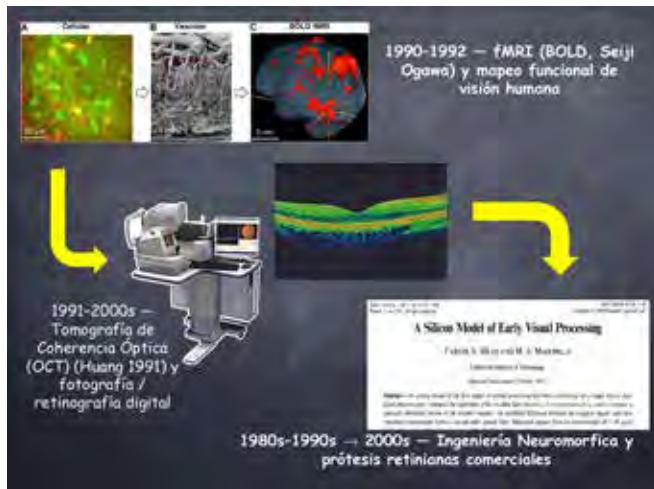


Figura 26

Hoy en día, las interfaces han permitido trasladar el conocimiento de la biología retiniana hacia soluciones tecnológicas concretas. Se han desarrollado sensores bioinspirados capaces de captar distintas propiedades visuales, como eventos, distancia o movimiento, integrando funciones propias de la retina en dispositivos electrónicos aplicados a múltiples áreas del conocimiento.

Además, estas soluciones avanzan hacia la integración de visión y movimiento. Un ejemplo destacado es el trabajo de empresas como BrainGate, que buscan restituir funciones motoras en personas con parálisis, asociando la información visual con la estimulación de áreas cerebrales motoras. Esta convergencia entre visión y acción abre nuevas posibilidades terapéuticas y tecnológicas (Figura 27).

En el ámbito de las aplicaciones, la retina se ha consolidado como un biomarcador sistémico. Mediante el análisis del fondo de ojo asistido por inteligencia artificial, es posible detectar de manera temprana signos de diversas patologías. Entre ellas se incluyen enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas como el Alzheimer y el Parkinson,

que presentan manifestaciones oculares debido a que el ojo comparte el mismo origen embrionario que el cerebro como parte del sistema nervioso central.

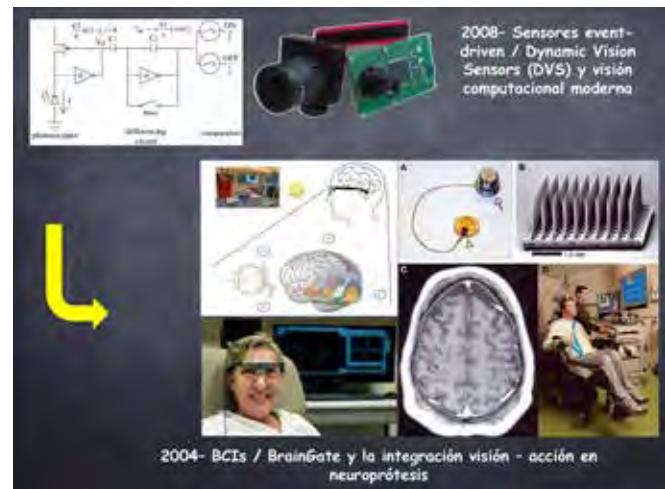


Figura 27

El monitoreo visual, accesible y no invasivo, ofrece la oportunidad de identificar alteraciones incluso antes de que se manifiesten en el cerebro. De este modo, se han desarrollado soluciones computacionales capaces de detectar retinopatías, identificar sectores afectados por glaucoma y analizar variaciones específicas en distintas regiones de la retina mediante sistemas de visión artificial potenciados por IA.

La precisión de estos modelos mejora día a día, lo que permite anticipar un futuro donde contaremos con un verdadero aliado médico digital, capaz de asistir en diagnósticos precoces y en la gestión clínica personalizada (Figura 28).

El monitoreo de señales biológicas no se limita a la visión. Hoy también es posible registrar variables como la actividad cardíaca, la respiración o la presión arterial mediante dispositivos portátiles. Los relojes inteligentes, por ejemplo, incorporan sensores capaces de registrar electrocardiogramas o monitorear parámetros fisiológicos de manera continua.

Estas soluciones provienen de los mismos principios de procesamiento de señales biológicas, trasladados ahora al ámbito digital. Constituyen un ejemplo claro de cómo lo digital ha asumido y potenciado el análisis de la biología (Figura 29).

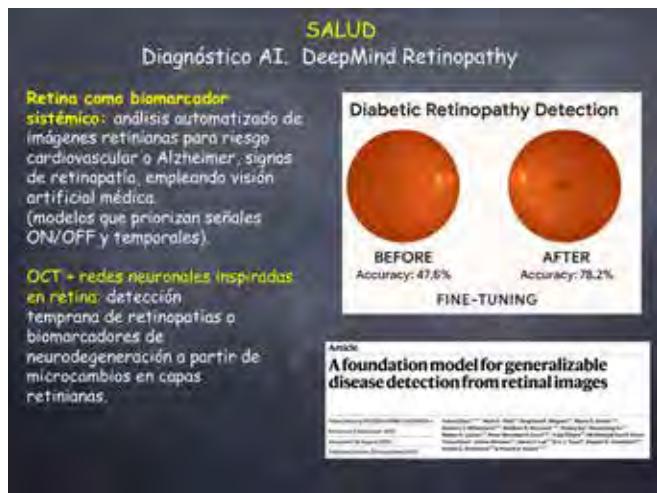


Figura 28



Figura 29

Otro ejemplo proviene de la arquitectura sensorial y la codificación retiniana, que ha inspirado el desarrollo de cámaras basadas en spiking, término que usamos para referirnos a los potenciales de acción. Estas cámaras procesan la información visual como series temporales discretizadas, siguiendo principios similares a los del sistema nervioso. En lugar de analizar la imagen completa, detectan eventos específicos, lo que las hace mucho más rápidas y eficientes en términos de costo y energía.

De este conocimiento también surge la robótica bioinspirada, que aprovecha los mecanismos retinianos de codificación de contrastes y de respuestas transitorias o sostenidas. Son tecnologías que ya se encuentran disponibles en el mercado

y que se apoyan en más de dos siglos de investigación en biología sensorial.

Finalmente, la recepción multimodal representa otro campo clave: integrar visión con tacto, posición o movimiento, de manera similar a como lo hace el ser humano, permitiendo la generación de soluciones robóticas más adaptativas y versátiles (Figura 30).



Figura 30

Un ejemplo destacado es el de Boston Dynamics, cuyos desarrollos en robótica integran cámaras avanzadas y soluciones de visión computacional que permiten a los robots desplazarse de manera autónoma. Estas máquinas son capaces de planificar trayectorias, detectar obstáculos y verificar rutas gracias a la incorporación de algoritmos inspirados en principios biológicos.

Se trata de un buen ejemplo de cómo los laboratorios de robótica trasladan funciones propias del sistema visual hacia plataformas tecnológicas, logrando robots y entes autónomos con un creciente nivel de independencia funcional (Figura 31).

Otro ejemplo notable son los RoboBee, desarrollados en el Wyss Institute de Harvard. Se trata de diminutos robots, de apenas dos centímetros y medio de tamaño, equipados con minicámaras y sensores ópticos. Estos dispositivos pueden orientar su vuelo, detectar flores y evitar obstáculos a escalas microscópicas, emulando las capacidades sensoriales de los insectos.



Figura 31

Más allá de la robótica en sí, estos sistemas ofrecen aplicaciones prácticas en áreas como la vigilancia ambiental y la agricultura de precisión, permitiendo censar campos de cultivo o monitorear ecosistemas con enjambres de microdetectores. Este tipo de soluciones muestra cómo el conocimiento biológico puede trasladarse a la tecnología en formas innovadoras y funcionales (Figura 32).

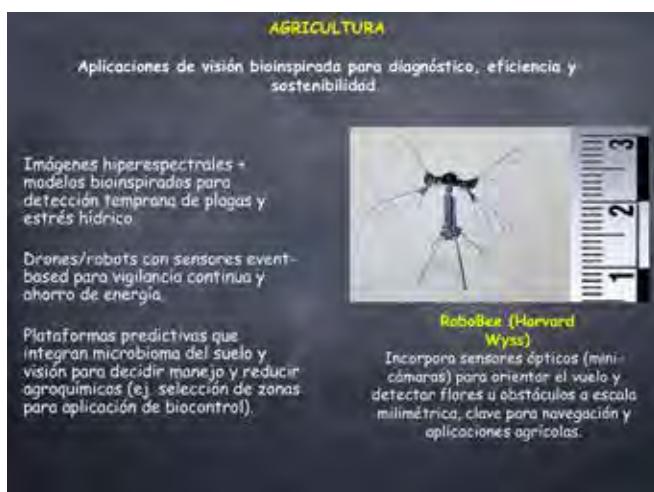


Figura 32

Un ejemplo adicional lo constituyen los drones multiespeciales, que incorporan cámaras y sensores capaces de detectar cuándo y dónde aplicar productos para controlar plagas o mejorar la salud de los cultivos.

Lo relevante es que estos sistemas operan con cierto grado de autonomía, tomando decisiones basadas en principios bioinspirados para generar mapas funcionales en tiempo real. De este modo, permiten determinar de manera selectiva qué sectores requieren tratamiento y cuáles no, optimizando así el uso de insumos y reduciendo el impacto ambiental.

La automatización inteligente aplicada a la agricultura representa, por lo tanto, una integración directa entre conocimiento biológico, visión artificial y gestión eficiente de recursos (Figura 33).



Figura 33

Otro ejemplo en esta misma línea es el sistema John Deere See & Spray, que utiliza cámaras en tiempo real para distinguir entre cultivos y malezas. Esta tecnología permite aplicar tratamientos de manera selectiva, avanzando hacia una forma de agricultura personalizada que optimiza el uso de insumos y reduce el impacto ambiental (Figura 34).

En el área de los implantes retinianos se han desarrollado soluciones dirigidas a personas con discapacidad visual. Estas prótesis, insertadas en el ojo, consisten en pequeños chips que funcionan como sensores y al mismo tiempo generan actividad eléctrica, permitiendo establecer una comunicación directa entre la entrada visual y la salida neural. De este modo, posibilitan al paciente percibir ciertos estímulos luminosos que antes no podían ser detectados.



Figura 34

Estas neuroprótesis han abierto un campo de gran interés tecnológico y médico. A partir de la señal visual, se produce un tratamiento eléctrico de impulsos codificados, que se conecta directamente al cerebro. El software asociado traduce esas señales en patrones de actividad que el sujeto puede aprender a interpretar, facilitando así la toma de decisiones motoras u otras acciones (Figura 35).



Figura 35

Por último, el sistema visual ha estado en el origen de numerosas soluciones que hoy inspiran avances en el ámbito digital y en la robótica. A lo largo de esta presentación hemos visto algunos ejemplos que muestran cómo la biología, y en particular la retina, ha servido como modelo

para innovaciones tecnológicas y aplicaciones de gran impacto (Figura 36).



Figura 36

Esta ilustración, tomada de una página web, muestra la codificación de las diferentes células de la retina, justamente lo que estudiamos en el laboratorio. Permite apreciar cómo cada tipo celular retiniano contribuye a enviar información codificada desde el sensor biológico hacia el cerebro.

En cuanto a sus implicaciones tecnológicas, hoy contamos con algoritmos de codificación neuronal aplicados a la inteligencia artificial, útiles para el reconocimiento de patrones y el procesamiento de imágenes. Asimismo, la diversidad de los fotorreceptores, unos más sensibles en condiciones de baja luz, otros especializados en la percepción del color, ha inspirado el desarrollo de cámaras especializadas, capaces de operar con distintos rangos de iluminación.

Este es solo un ejemplo de cómo los descubrimientos en biología se han trasladado al ámbito tecnológico, generando soluciones innovadoras en múltiples áreas (Figura 37).

A modo de resumen, la biología nos enseña eficiencia. Los sistemas biológicos, y en particular la retina, han alcanzado un grado de optimización extraordinario en términos de consumo energético, velocidad de respuesta y precisión, fruto de millones de años de evolución.

Estos principios inspiran hoy algoritmos más rápidos y eficientes, aplicados en áreas como la robótica o la telemedicina.

La convergencia biodigital nos plantea preguntas clave: ¿qué modelos biológicos utilizamos?, ¿cómo los trasladamos a hardware, biosensores, órganos en chip o cámaras de detección de eventos?



Modelo Biológico	Propuesta Evolutiva	Desarrollo y Aplicación Tecnológica
Retina y Procesamiento Visual	Evolución para procesar grandes cantidades de información visual de manera eficiente	Desarrollo de sensores 3D (cámara y cámara) que maximizan eficiencia de los fotodetectores
Codificación de Estímulos Ganglionares de la Retina (Rete)	Adaptación para codificar y transmitir información visual visual	Algoritmos de codificación neuronal en la retina (reconstrucción de patrones y procesamiento de imágenes) tecnologías de imágenes multiespectrales y diseños avanzados de sensor
Sensibilidad de Fotorreceptores	Células especializadas sensibles a diferentes longitudes de onda de la luz	Sistemas de fotorreceptor y comunicación de datos de alta velocidad
Transmisión de Señales por el Nervio Optico	Ley de la transmisión rápida de señales (sin tipo de retraso)	Desarrollo de fibras ópticas angulares, cámaras para ópticas y sistemas de transmisión óptica (RBO)
Ojos Compuestos en Insectos	Uso de prismas angular y otros tipos de lentes en óptica y en óptica periférica	Transmisión de información adaptativa y sistemas de visualización óptica
Control en Ortopedia	Control avanzado de la fuerza y el calor del hueso para adaptación óptimal	Transmisión de información adaptativa y sistemas de visualización óptica
Extracción en Mieloides y Estímulos	Efectividad para navegar y caer en entornos de baja probabilidad (miedos) (corrida)	Desarrollo de sensor: imágenes por ultrasonido a sistemas de navegación óptica
Resonancia en Océanos de Agua Profunda	Adaptación a entornos marinos mediante la producción de luz	Sistemas de resonancia (EPR) y tecnologías de datos complejos y avanzados
Electromigración en Peces	Capacidad de detectar cambios eléctricos en el agua para caer y navegar	Desarrollo de sensores de campo eléctrico (magnetosíntesis para robótica, electrónica y sensores)
Sistema Inmune Artificial	Evaluación de complejos mecanismos de defensa (inmuno-parafernalia)	Desarrollo de algoritmos avanzados de observación y análisis en respuesta del sistema inmune
Plasmátid Norial	Capacidad del interior para producir y almacenar en respuesta a sucesos independientes	Algoritmos de 14 niveles de memoria y adaptación dinámicamente a nuevos datos

Figura 37

Este tránsito entre biología y tecnología se acelera constantemente gracias a nuevas herramientas, generando un ecosistema muy dinámico de innovación. Además, muchas de estas soluciones actúan como multiplicadores tecnológicos: lo aprendido en un dominio, como el visual, puede transferirse a otros ámbitos, por ejemplo, diagnósticos ópticos aplicables a diversas enfermedades, mostrando que los principios fundamentales de la biología son universales y reutilizables (Figura 38).

Resultados esperables (Convergencia Biodigital)

- 1. Eficiencia Biomimética:** Los principios de procesamiento sensorial (p. ej. codificación ON-OFF de la retina) permiten algoritmos mucho más eficientes en consumo y latencia, útiles en dispositivos embebidos y telemedicina.
- 2. Traducción → aplicación:** la integración de modelos biológicos con hardware (biosensores, órganos-en-chip, event cameras) acelera el paso del descubrimiento a soluciones clínicas, robóticas y agrícolas.
- 3. Multiplicador Tecnológico:** las soluciones desarrolladas en un dominio (diagnóstico óptico) se reutilizan como plataformas en otros (robótica, agricultura), reduciendo costos y tiempo de despliegue.

Figura 38



Figura 39

Y con esto, doy por terminada mi intervención (Figura 39).

Muchas gracias.

A continuación, el Sr. Adrián Palacios responde inquietudes y preguntas de los asistentes. Hace do moderador don Alejandro Steiner.

Sr. Alejandro Steiner.

—Mencionaste en algún momento que los canales que unen la retina con el cerebro son, para una misma situación, numerosos. Esa extensión o esa sobreproducción de señales, ¿cómo se han traducido en los artefactos que se derivan de la estructura de la retina? El hecho de que tú no envías una sola imagen o solución potencial, sino que varias.

Sr. Adrián Palacios.

En cuanto a eso, lo interesante es cómo la retina ha sido entendida históricamente. Hace poco más de 100 años se pensaba que era simplemente un paso entre un sensor y una respuesta. Sin embargo, los primeros estudios anatómicos más precisos mostraron que esta red neuronal estaba organizada en múltiples capas, cada una con soluciones diversas.

Al llegar a la última capa, la de las células ganglionares, se descubrió que no eran todas iguales, sino que había alrededor de 20 tipos anatómicamente distinguibles. Más tarde,

con el uso de marcadores moleculares, esa clasificación se enriqueció, confirmando que la morfología se correspondía también con diferencias bioquímicas.

El paso siguiente vino desde la fisiología. Gracias a las mediciones masivas de actividad neuronal, se observó que funcionalmente no eran solo 20 tipos, sino hasta 30 formas distintas de codificar la información visual. Esto, porque la red no es lineal, sino que incorpora interacciones recíprocas: algunas células responden de forma rápida, otras sostenida; unas están sintonizadas con la longitud de onda, otras con el movimiento. La combinación de todas ellas permite que una misma imagen pueda ser procesada de múltiples maneras.

Ahora bien, trasladar todo esto a la tecnología sigue siendo un desafío. Este conocimiento detallado tiene apenas 15 o 20 años de desarrollo. Lo más cercano en aplicaciones actuales son las cámaras multiespectrales, o aquellas que combinan lo multiespectral con detección de movimiento o velocidad.

En definitiva, es una tarea aún en curso: estamos recién empezando a integrar esta complejidad biológica en soluciones tecnológicas.

Sr. Alejandro Steiner.

—*Entonces, ¿no es propiamente una redundancia porque no estoy mandando por distintos canales la misma información, sino que los canales mandan informaciones que son complementarias, que es distinta de una redundancia?*

Sr. Adrián Palacios.

—Exactamente. Son informaciones complementarias, aunque cierta redundancia existe. Cuando tienes 300.000 o incluso un millón de células enviando su respuesta al cerebro, no hablamos de 20 categorías aisladas. En realidad, cada categoría está representada por cientos de miles de células, 100.000, 200.000 o más por cada una de esas 20 clases, por poner un ejemplo. Eso permite que la información se distribuya de manera robusta y a la vez diferenciada.

Sr. Alejandro Steiner.

—*En las prótesis dentro de la retina. Hay algo ahí que me llama la atención porque normalmente la transmisión neuronal se produce por la frecuencia de los potenciales de acción (spikes). ¿Cómo opera en ese caso la prótesis? ¿También de la misma manera? ¿Con frecuencia?*

Sr. Adrián Palacios.

—En general, podríamos mencionar que hay dos grandes vías que se han explorado para la restauración de la visión.

La primera es de tipo biológico. Aquí la biología molecular propone que, en los casos donde los fotorreceptores están deteriorados, se utilicen terapias génicas para introducir sensores moleculares en otras partes de la red retiniana. De esta forma, esas células adquieren la capacidad de detectar luz y transmitir señales, compensando la pérdida de los fotorreceptores originales. Este enfoque está teniendo un auge muy importante en la actualidad.

La segunda vía es de tipo ingeniería electrónica, basada en pequeñas placas con múltiples sensores que captan la luz y la convierten en señales eléctricas. Pero aquí surge un desafío: la retina no transmite simplemente lo que recibe, sino que procesa esa información a través de sus diferentes vías neuronales. Por eso, estas prótesis necesitan incorporar también un software capaz de emular parte del procesamiento retiniano.

Hoy en día, las soluciones más avanzadas combinan hardware (chips y sensores) con software de procesamiento, lo que mejora los resultados. Sin embargo, la resolución espacial de estas prótesis sigue siendo limitada: permiten percibir cambios globales de luz en el entorno y, en algunos casos, incluso leer, pero con gran esfuerzo. Están todavía muy lejos de la precisión que entrega una retina normal, con sus aproximadamente 160 millones de fotorreceptores”.

Sr. Miguel Ropert.

—*¿Existe una relación entre estos, entre estas investigaciones que hemos revisado y los desarrollos tecnológicos en el equipo de observación de los observatorios de astronomía?*

Sr. Adrián Palacios.

—No es un área que conozca en detalle, pero sí veo un punto común: tanto en biología visual como en astronomía trabajamos con la radiación electromagnética en determinadas bandas. En el caso de la retina, se trata de la luz visible que interacciona con la materia biológica; mientras que en astronomía también se exploran otras longitudes de onda como rayos X o radiación cósmica, muchas de las cuales no atraviesan la atmósfera.

En ese sentido, ambos campos comparten el desafío de descomponer y procesar señales electromagnéticas para extraer información. El ojo lo hace en la banda visible, y los observatorios lo logran mediante detectores y sensores especializados.

Creo además que en el ámbito del análisis de datos existen paralelos interesantes: así como usamos algoritmos de optimización visual para procesar imágenes retinianas, en astronomía podría aplicarse un enfoque similar al tratamiento de imágenes fotográficas o registros de radiación.

Lo planteo más bien como una hipótesis abierta, y personalmente me gustaría conocer más sobre cómo se dan esas conexiones entre ambos campos.

Sr. Leandro Rodríguez.

—*¿Qué avances tecnológicos actuales como la inteligencia artificial, la neuroprótesis o la visión computacional podrían beneficiarse de una comprensión más profunda de los mecanismos de la retina y sus interacciones con el cerebro para generar herramientas innovadoras en medicina, robótica y análisis de datos visuales?*

Sr. Adrián Palacios.

—En esa área diría que todavía falta integración, y que no bastará únicamente con el conocimiento de la visión. De hecho, necesitamos justamente de la visión para incorporar otros conceptos dinámicos como el desplazamiento en el tiempo, lo que nos permite inferir distancia, tamaño o velocidad.

Por ese lado, veo un desarrollo futuro en la codificación multimodal, donde se integren varias modalidades sensoriales, tal como lo hace el cerebro: no actuamos solo a partir de la visión, sino también del tacto, el olfato, la temperatura. Creo que allí se abrirán grandes posibilidades, especialmente en áreas como la robótica, donde lo multisensorial puede ser clave.

Ahora bien, todavía quedan muchos desafíos. Una pregunta abierta es cómo trasladar al ámbito tecnológico algo parecido a cámaras multicapa o multicámara que simulen la riqueza de la retina biológica. ¿Podríamos implementar soluciones inspiradas en este modelo natural para resolver problemas físicos asociados a la energía y la información? No lo sé, pero sin duda es una dirección en la que se está avanzando y que vale la pena explorar.

Sr. Luis Reinoso.

—*¿Existen relaciones entre la emocionalidad y la retina, en buenas cuentas, entre el estado anímico del cerebro, para decirlo en términos más generales, y el funcionamiento de la retina? ¿cuáles son las implicaciones de la identificación del iris por parte de grupos económicos? ¿Hay empresas que ofrecen dinero por castrarlas?*

Sr. Adrián Palacios.

—Lo que entiendo de la pregunta tiene varios aspectos. Por un lado, está la contracción del iris y, más en general, si tanto el iris como el fondo de ojo, por sus características anatómicas y su resolución estructural, pueden funcionar como un identificador único de las personas, al igual que la huella digital o el rostro. Y efectivamente, hoy se utilizan como sistemas de biometría ocular.

Al mismo tiempo, este uso abre la posibilidad de generar soluciones personalizadas, pues cada patrón es único. Ahora bien, si esa información pasa a formar parte de una base de datos, también puede tener efectos de retorno económico y plantea interrogantes en torno a la privacidad y al uso comercial de los datos biométricos. Es un tema que despierta mucho interés en la actualidad.

Sr. Jorge González.

—Por la identificación taxonómica de maderas y especies vegetales. Tecnologías como el NIRS han aportado en este campo. ¿Qué podría aportar la visión artificial a las imágenes hiperespectrales para mejorar estas labores?

Sr. Adrián Palacios.

—Cuando hablamos de cámaras hiperespectrales, nos referimos a sistemas que van mucho más allá de una cámara convencional RGB. Una cámara normal tiene tres sensores principales, rojo, verde y azul, que imitan la condición de los humanos como tricrómatas. Pero las cámaras hiperespectrales incorporan muchos más canales, cada uno con un filtro específico, lo que permite capturar una enorme cantidad de información espectral.

En la naturaleza, por ejemplo, aves, reptiles o peces tienen sistemas tetracromáticos, incluyendo un sensor especializado en ultravioleta. Las cámaras hiperespectrales llevan esta idea al extremo, permitiendo reconstruir imágenes con un nivel de detalle espectral muy superior.

Esto abre aplicaciones prácticas. En el caso de la madera, por ejemplo, un análisis hiperespectral podría detectar hongos o parásitos biológicos que no son visibles en el espectro RGB. Algo similar ocurre con la fluorescencia producida por ciertos hongos, que se detecta mejor con filtros específicos.

Por otro lado, la tecnología NIRS (Near Infrared Spectroscopy) aprovecha la radiación infrarroja para analizar la reflectancia de la superficie de un objeto. Esto permite determinar condiciones como humedad o sequedad de un material, porque esas propiedades modifican el espectro en esa banda.

Hoy en día, estas tecnologías ya están disponibles en equipos compactos y portátiles, lo que facilita su aplicación en campo, con un procesamiento computacional suficientemente rápido como para tomar decisiones inmediatas.

Sr. Gustavo Schleyer.

—Pregunta por el reconocimiento de patrones visuales por parte del cerebro. Los patrones visuales, ¿son aprendidos en los primeros meses de vida, o son parte de la información y capacitación base que tenemos al nacer?

Sr. Adrián Palacios.

—Es una gran pregunta. Lo esencial aquí es entender que hay un proceso de aprendizaje continuo a lo largo de la vida. La retina, como ya describían Lettin y Maturana en los años 60, posee sensores con buena sensibilidad al movimiento y a la velocidad. Sin embargo, por sí solos no constituyen una representación completa de una imagen o de un objeto en movimiento.

Desde el nacimiento, lo que entra por el ojo se registra, pero todavía sin un sentido cognitivo o perceptivo elaborado. Ese paso siguiente, darle un significado, decidir si me acerco, si me alejo, si es el rostro del padre o de la madre, se establece poco a poco mediante el aprendizaje y la experiencia. Y ese proceso no se detiene nunca.

Cada movimiento ocular genera nuevas señales. A partir de ellas, el cerebro aprende a reconocer patrones, estableciendo distribuciones estadísticas de probabilidad que permiten asociar estímulos con etiquetas y significados.

Podría decirse que existe una base innata, muy primaria, puramente perceptiva, que no es conceptual ni consciente, sino un nivel elemental de detección sensorial. Y esa base, sustentada por los sensores retinianos y su red neuronal, se traduce finalmente en aprendizaje. Son detecciones muy simples, pero fundamentales, que se construyen desde lo más básico de la biología y, podríamos decir, desde la bioelectrónica natural de la retina.

Sr. Alejandro Steiner.

—No queda más que agradecerte la participación y tu presentación. Ha sido excepcionalmente clara y motivadora. Muchas gracias.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente.

—*Muchas gracias, Adrián, muchas gracias, Alejandro.*

Solo unas últimas palabras. La presentación que hizo Adrián forma parte de una de las conferencias que están recopiladas en un documento que va a salir publicado próximamente. En este documento se recopilan varias experiencias y casos como el que ha planteado Adrián.

No me queda más que agradecerles la asistencia y su interés en seguir participando e invitarlos a las próximas conferencias que realizaremos en el Instituto. Gracias.

Sr. Adrián Palacios.

—*Gracias a usted y a quienes asistieron.*

Fin de la conferencia.

PREMIO “MEDALLA DE ORO AÑO 2025”

AL SR. EDUARDO FREI RUIZ-TAGLE



Don Eduardo Frei Ruiz-Tagle en compañía de su esposa Sra. Marta Larraechea, don Andrés Navarro Haeussler, premio “Medalla de Oro – Año 2024”, don Juan Carlos Barros Monge, presidente del Instituto de Ingenieros de Chile.

El pasado martes 28 de octubre de 2025, en el Salón de Actos de la corporación se realizó la ceremonia solemne para la entrega de la Medalla de Oro a don Eduardo Frei Ruiz-Tagle, máximo galardón de la ingeniería chilena.

El Presidente, Sr. Juan Carlos Barros, inició la ceremonia refiriéndose a la naturaleza del premio, su significado dentro del Instituto y en la comunidad de los ingenieros, y al especial merecimiento de quien lo recibe en esta oportunidad.

A continuación, la presentación del galardonado estuvo a cargo del ingeniero don Andrés Navarro Haeussler, quien obtuvo esta distinción el año 2024.

El Presidente.

—Sr. Eduardo Frei Ruiz-Tagle, premio «Medalla de Oro – Año 2025». Sr. Andrés Navarro Haeussler, premio “Medalla de Oro – Año 2024”. Familiares y amigos del galardonado. Socios del Instituto. Señoras y señores:

Hoy 28 de octubre, el Instituto cumple 137 años de existencia. Esta fecha, por su relevancia para los miembros del Instituto, tradicionalmente se trata de hacerla coincidir con la entrega del premio Medalla de Oro, el galardón por excelencia de la ingeniería chilena.

Desde su fundación, en el año 1888, el Instituto de Ingenieros de Chile ha tenido presencia permanente en el desarrollo del país, contribuyendo a la discusión de temas relevantes para su progreso y el de sus habitantes.

Son conocidos sus aportes, que se inician en informes escritos con la política eléctrica chilena y el plan de electrificación del país; la propuesta de creación de ENDESA y ENTEL y, más recientemente este año, “Calidad de la Ingeniería en Proyectos de Inversión”; “Convergencia Biodigital”; “Prospectivas del Impacto de la Inteligencia Artificial en la Ingeniería Chilena” y varios otros estudios e informes que sería largo enumerar; todos ellos se encuentran a disposición del público en nuestra web.

En el contexto de sus actividades, nuestra Corporación tiene también entre sus labores más importantes la realización de seminarios, conferencias o foros mensualmente y, a la vez, las ceremonias de reconocimiento a aquellos ingenieros que se han destacado por sus contribuciones a la profesión, a la sociedad o al Instituto.

En el día de hoy se da término al proceso de elección y premiación que realizamos cada año, en el que otorgamos nuestro más importante galardón, la Medalla de Oro, que se entrega al Ingeniero que se haya destacado, a través de su trayectoria de vida profesional, por sus extraordinarios aportes y servicios a nuestro país, a la profesión o al propio Instituto. En este acto pretendemos capturar y destacar lo mejor de tantos ingenieros que han contribuido a construir, con su aporte personal y profesional, el Chile en el que hoy vivimos.

Esta es su ceremonia, tradicionalmente solemne, pero no por ello alejada de las legítimas manifestaciones de alegría en el galardonado, familiares y amigos.

El procedimiento para designar los candidatos a este premio consiste en que cada año, el Directorio del Instituto nombra una Comisión, la cual se encarga de estudiar los antecedentes de los postulantes al premio, propuestos por nuestros socios, haciendo una selección para someterla posteriormente a la consideración del Directorio y del Consejo Consultivo del Instituto que, reunidos en sesión solemne y votación secreta, disciernen la persona del premiado.

En el panel de honor que se encuentra a mis espaldas en este Salón de Actos, se consigna la lista de todos aquellos que han sido merecedores de este premio desde 1931, e incluye a algunos de los más ilustres ingenieros de nuestro país. Es una lista que, además, cada año se ve incrementada por la incorporación de otro extraordinario profesional, y de esa manera ha ido construyendo por sí misma el prestigio que este premio ha alcanzado.

Este año, al otorgar la Medalla de Oro del Instituto de Ingenieros a don **Eduardo Frei Ruiz-Tagle**, hacemos honor, por una parte, al aludido prestigio que precede a este galardón, y por otra, a su enriquecimiento, con la incorporación de tan ilustre personalidad a ese exclusivo grupo.

Una de las tradiciones más respetadas y queridas de nuestra institución es que se otorga el honor de presentar formalmente a nuestros premiados, al galardonado con la distinción el año anterior. En esta ocasión, le corresponde hacerlo a don **Andrés Navarro H.**, premio Medalla de Oro 2024.

Antes de darle la palabra al Sr. Navarro, quisiera, como presidente del Instituto, manifestarle a nuestro homenajeado, con el mayor afecto, que son muchos los presentes y otros que involuntariamente están ausentes, que por mi intermedio desean extenderle sus más calurosas y sinceras felicitaciones por el galardón que hoy le entregamos, expresando a la vez una legítima satisfacción porque sus merecimientos le están siendo reconocidos en esta ocasión por nuestro Instituto.

Estimado don Eduardo, reciba un afectuoso abrazo.

Muchas gracias.

Sr. Andrés Navarro Haeussler.

—Estimados colegas y amigos:

Es para mí un honor muy significativo presentar al galardonado con la Medalla de Oro del Instituto de Ingenieros de Chile, el expresidente Eduardo Frei Ruiz-Tagle. Esta distinción, la más alta que otorga nuestra institución, reconoce no solo la excelencia profesional, sino también el compromiso con el desarrollo del país, la ética pública y el servicio a la sociedad. En Eduardo Frei confluyen todos estos valores con una coherencia admirable.

Ingeniero, servidor público y estadista

Eduardo es ingeniero civil de la Universidad de Chile, profesión que abrazó con vocación y que ha marcado su forma de entender el país: con rigurosidad técnica, visión de largo plazo y sentido de responsabilidad. Desde sus primeros años como profesional, trabajó en el sector privado y público, participando principalmente en proyectos de infraestructura y desarrollo urbano.

Logros en ingeniería y desarrollo nacional

Como ingeniero, Eduardo Frei aplicó principios técnicos a la gestión pública, promoviendo una visión de país basada en planificación, eficiencia y sostenibilidad. Entre sus principales logros destacan:

- **Modernización de la infraestructura vial**, con la implementación del sistema de concesiones de obras públicas, que permitió la construcción de autopistas urbanas e interurbanas, túneles, puentes y mejoras en la conectividad territorial. Este modelo se convirtió en referente regional.
- **Impulso a la interconexión eléctrica nacional**, robusteciendo la infraestructura energética y promoviendo la diversificación de la matriz, con una visión de largo plazo.
- **Mejora y ampliación de la cobertura de agua potable y saneamiento**, incorporando inversionistas extranjeros que aportaran capital y experiencia a las empresas sanitarias, entonces de propiedad del Estado. Junto con ello, fomentó decididamente proyectos de agua potable rural. Todo lo anterior redundó en una mejora

significativa de la calidad de vida de millones de chilenos y posicionar al país dentro de los líderes mundiales en la materia.

- **Desarrollo de infraestructura portuaria y aeroportuaria**, ampliando y modernizando terminales clave como el Aeropuerto Internacional de Santiago y puertos estratégicos, facilitando el comercio exterior y la integración global, éxito del modelo de desarrollo del país.
- **Apertura al exterior**, mediante el fortalecimiento de vínculos y acuerdos de libre comercio con diversos países, sumando a destacados líderes para impulsar el crecimiento económico e insertar a Chile en el mundo.
- **Reforma procesal penal**, iniciando la transformación del sistema judicial chileno, reemplazando el modelo inquisitivo anterior por uno acusatorio, más transparente y eficiente.

Un par de anécdotas de su vida personal

En los inicios de su carrera, cuando su esposa Martita estaba teniendo su primera hija, nuestro homenajeado la sorprendió con un flamante Fiat 125 “0” kilómetro. Coincidientemente, ese mismo día en Siglo Koppers, donde él trabajaba, resolvieron entre varios ejecutivos adquirir las acciones de su socio extranjero. Como no disponía del capital requerido, debió retractarse del regalo efectuado y devolver el auto para financiar su parte de la inversión, decisión que resultó relevante para su futuro.

Otra anécdota que ilustra su estilo de liderazgo técnico se dio durante la planificación del sistema de concesiones. Algunos colaboradores relatan que en una reunión con ingenieros del MOP se discutía la viabilidad de un tramo complejo por su geografía. Frei, lápiz en mano, revisó los planos y cálculos personalmente. No era solo el presidente, sino el ingeniero que entendía el lenguaje técnico, que preguntaba por pendientes, radios de curvatura y costos unitarios. Esta cercanía con la ingeniería fue clave para el éxito de su gestión.

Un legado que honra a la ingeniería chilena

La Medalla de Oro que hoy se le entrega no solo reconoce su trayectoria como ingeniero, sino también su capacidad de aplicar los principios de nuestra profesión al servicio del país. Eduardo Frei ha demostrado que la ingeniería no



Sr. Eduardo Frei, recibiendo la Medalla de Oro 2025.

es solo cálculo y diseño, sino también visión, liderazgo y compromiso con el bienestar colectivo.

En una conversación informal con jóvenes estudiantes de ingeniería, se cuenta que Frei les dijo: *"Nunca olviden que detrás de cada plano hay una familia que espera agua, luz y caminos. La técnica sin humanidad no transforma nada".* Esa frase resume su legado.

Su ejemplo inspira a las nuevas generaciones de ingenieros a pensar en grande, a actuar con responsabilidad y a poner sus talentos al servicio de Chile. En tiempos donde los desafíos son complejos y globales, su trayectoria nos recuerda que el conocimiento técnico debe ir siempre acompañado de valores humanos.

Su coraje

Dentro de los múltiples atributos del expresidente Frei, quisiéra resaltar uno que me ha parecido relevante en su rol de estadista: su coraje. Durante su mandato debió enfrentar la adopción de decisiones difíciles en diversas circunstancias, resolviendo siempre con buen criterio y mucho coraje, virtud esta última que caracteriza a los grandes líderes.

Señoras y señores, estimados amigos

Con profunda admiración y respeto, invito a todos a reconocer en Eduardo Frei Ruiz-Tagle a un ingeniero ejemplar, un servidor público íntegro y un chileno que ha dejado una huella imborrable en nuestra historia.

Por todo lo anterior, y con el orgullo que nos da esta ocasión, presentamos al ingeniero y expresidente Eduardo Frei Ruiz-Tagle como merecedor de la Medalla de Oro del Instituto de Ingenieros de Chile.

Muchas gracias.

A continuación, don Juan Carlos Barros, hace entrega del Diploma de Honor y Medalla de Oro a don Eduardo Frei Ruiz-Tagle.

Enseguida, el Sr. Frei agradeció la distinción en los siguientes términos.

Sr. Eduardo Frei Ruiz-Tagle.

—Señor Juan Carlos Barros, presidente del Instituto de Ingenieros de Chile Señor; Andrés Navarro, premio Medalla de Oro año 2024, gracias.

Señoras y señores, directores, estimados familiares, colegas y amigos:

Quiero expresar mi profunda gratitud y emoción al Instituto de Ingenieros de Chile por honrarme con este premio, que recibo como un reconocimiento a mi labor tanto en el ámbito privado como público. Por eso me gustaría comenzar dando las gracias a quienes han depositado su confianza en mí y han valorado mi trayectoria profesional.

Si bien es cierto que en 1987 abandoné mi carrera en el sector privado para dedicarme al servicio público, la verdad es que la ingeniería me ha acompañado hasta el día de hoy. Mi formación de ingeniero fue clave en cada uno de los desafíos que decidí emprender en mi trayectoria política, impulsando proyectos que estimé beneficiosos para el país, tomando decisiones y formando equipos con grandes profesionales de diversos ámbitos.

Este reconocimiento no sólo representa un logro personal, sino que también simboliza el esfuerzo colectivo de tantas personas con las que he tenido el privilegio de conocer y trabajar. En la ingeniería, nadie avanza en solitario. Cada proyecto, cada idea y cada solución es el resultado de la suma de muchas voluntades, talentos y perspectivas.

Agradezco, en primer lugar, a mi familia. A mi esposa Martita, mis hijas y nietos. Su paciencia infinita y apoyo incondicional han sido la base sobre la que he construido mi vida y mi carrera. Gracias por comprender los días largos, las noches de desvelo y los momentos en que la pasión por mi profesión y mi vocación de servicio público ocuparon un lugar central en mi vida. Sin su respaldo y lealtad inquebrantable, este camino habría sido mucho más difícil y tal vez, imposible de recorrer.

La ingeniería, en particular, más que una ciencia, es una pasión que se vive en comunidad y que se fortalece en el intercambio de conocimientos. Gracias a todos aquellos que me enseñaron, me inspiraron y me recordaron que el trabajo en equipo es la clave del progreso. En este sentido, no puedo dejar de recordar a mis profesoras y profesores,



Don Eduardo Frei, durante su discurso.

quienes despertaron en mí la curiosidad por el mundo que nos rodea y me estimularon a cuestionar, a analizar y a buscar siempre una solución creativa y eficiente.

Recibir este reconocimiento me lleva inevitablemente a reflexionar sobre la responsabilidad que implica ser el Ingeniero del Año. Más allá del orgullo, entiendo que este título representa un compromiso con la excelencia, la ética y el servicio. En nuestra profesión, la toma de decisiones impacta directamente en la calidad de vida de comunidades enteras, en el bienestar de la sociedad y en el futuro del planeta.

Fueron esos valores los que después me volcaron al servicio público y los que me impulsaron en cada una de las responsabilidades que me tocó asumir. Mi compromiso con esta profesión y con Chile es permanente, y hoy ante ustedes reafirmo mi voluntad de asumir con humildad y seriedad el reto de continuar contribuyendo con pasión, integridad y dedicación a los desafíos que enfrenta nuestro país.

Esto guarda una absoluta relación con mi total convicción de que, a pesar de nuestras carencias y dificultades, Chile está ante una nueva oportunidad para ser una nación desarrollada. Y un país que se enfrenta a un desafío de esta envergadura necesita el aporte de los ingenieros porque, tal vez, nadie sabe cómo nosotros lo que cuesta sacar adelante un proyecto de esta magnitud.



Durante la celebración. Don Eduardo Frei junto a los Sres. Fernando de Mayo, José Orlandini, Mauro Grossi, Eduardo Aninat, Juan Carlos Barros y Nicolás Majluf.

Un gobierno no puede improvisar soluciones para resolver los problemas que impiden el progreso del país. Al final eso siempre termina en un desastre. Y yo pienso que un país como Chile, con tantas potencialidades, no puede postular a cualquier desarrollo.

Por eso los ingenieros no pueden estar ausentes de un reto como este. La ingeniería y la labor de un gobierno, que se haga cargo de esta posibilidad que tenemos por delante, comparten mucho más de lo que suele imaginarse: visión sistémica, planificación estratégica, solución de problemas, trabajo en equipo, innovación, ética, evaluación, comunicación y responsabilidad social. Al entender estas similitudes, se puede fomentar la colaboración y trabajo conjunto en beneficio de una sociedad más próspera, justa, eficiente y sostenible.

Por ello, se hace necesario establecer una visión acerca de cuáles son nuestras finalidades últimas como sociedad, es decir, una idea de país que nos señale claramente cuál es el desarrollo que queremos, qué tareas debemos acometer para alcanzarlo, y que fije prioridades y plazos.

En lo personal, estoy convencido de que el desarrollo debe estar estrechamente ligado a una reflexión ética sustentada en los más altos valores sobre la naturaleza humana y la

sociedad. Para ello, se requiere abrir espacios de diálogo, en los que se reconozca a otros la posibilidad de pensar distinto y expresar su opinión, donde se establezcan consensos y se pueda discernir el sentido de desarrollo.

Cuando se alcanza esa profundidad, derrotando toda aspiración de unilateralidad, tendremos una comunidad en la que sus miembros vivirán más seguros, tendrán más posibilidades de entretenimiento, accederán al conocimiento, se le facilitarán las comunicaciones, reconocerán y respetarán la diversidad y se abrirán a la innovación. En pocas palabras, esa sociedad progresará.

Detrás de estas reflexiones está el convencimiento de que la ingeniería es motor de cambio y progreso. En momentos en los que el mundo demanda más que nunca soluciones sostenibles, innovadoras y orientadas al bienestar común, quienes ejercen esta profesión tienen la oportunidad y el deber de marcar una diferencia positiva.

Debemos impulsar la transformación tecnológica, promover la equidad en el acceso al conocimiento y trabajar por un futuro en el que la ciencia y la tecnología sean herramientas de inclusión, justicia y desarrollo.

Al terminar, quiero aprovechar esta ocasión para hacer un llamado a toda la comunidad de ingenieras e ingenieros: sigan trabajando juntos por nuestra patria, compartiendo conocimientos y experiencias, apostando por la innovación y la excelencia. Recordemos siempre que detrás de cada avance hay una historia de esfuerzo, colaboración y aprendizaje constante.

Finalmente, reitero mi agradecimiento al directorio del Instituto de Ingenieros por mantener vivo el espíritu de reconocimiento y valoración de la labor profesional. Este premio es un estímulo para seguir adelante y para continuar sirviendo a Chile con humildad y pasión, entregando lo mejor de mí.

Muchas gracias.

(Aplausos).

Fin de la ceremonia.

PREMIO “AL INGENIERO O INGENIERA POR ACCIONES DISTINGUIDAS – AÑO 2025”

A LOS INGENIEROS SR. JOSÉ FRANCISCO MUÑOZ PARDO Y SR. FRANCISCO SUÁREZ POCH



Sres. José Francisco Muñoz y Francisco Suárez Poch, premio “Al Ingeniero o Ingeniera por Acciones Distinguidas – Año 2025”.

El pasado 17 de octubre de 2025 se realizó en el Salón de Actos del Instituto de Ingenieros, con la asistencia de personalidades del mundo académico y privado, la ceremonia solemne de entrega del premio “Al Ingeniero o Ingeniera por Acciones Distinguidas – Año 2025”, que este año recayó en forma conjunta en los Ingenieros Sr. José Francisco Muñoz Pardo y el Sr. Francisco Suárez Poch.

Don Juan Carlos Barros, presidente del Instituto, inició la ceremonia con una breve intervención relativa al significado de este premio, y explicó el especial merecimiento de los galardonados de este año.

En seguida, siguiendo la tradición, la Sra. Salomé Martínez, quien recibiera este Premio el año 2024, realizó una síntesis de los aspectos más destacados de estas acciones distinguidas de los galardonados que los hicieron merecedores del premio.

El Presidente.

—Sres. José Francisco Muñoz y Francisco Suárez, premio “Al Ingeniero o Ingeniera por Acciones Distinguidas – Año 2025”. Sra. Salomé Martínez, premio “Al Ingeniero o Ingeniera por Acciones Distinguidas – Año 2024”.

Directores, Autoridades, colegas, amigas, amigos:

La labor del Instituto, que este mes cumple 137 años de existencia, incluye entre sus tareas más gratas e importantes la de reconocer los méritos de algunos de nuestros colegas que se destacan en diversas etapas o aspectos de su vida.

El reconocimiento de los méritos profesionales y personales por parte de sus pares ha constituido siempre un importante acto social, presente ya en las civilizaciones más antiguas. Lamentablemente en nuestro país, al parecer como consecuencia de nuestra particular idiosincrasia, este reconocimiento de los méritos por parte de los pares no ha sido una costumbre muy difundida. Conscientes de este hecho, el Instituto de Ingenieros, transcurridos pocos años desde su fundación, tomó la iniciativa de distinguir a algunos de los ingenieros que se han destacado en determinados aspectos de su ejercicio profesional, instituyendo diversos premios cuyo alcance se ha ido ampliando con el tiempo.

Así, el premio “Al Ingeniero o Ingeniera por Acciones Distinguidas”, que se otorga desde 1984, ha recaído este año en los Sres. José Francisco Muñoz Pardo y Francisco Suárez Poch, y como es nuestra tradición, los atributos personales y profesionales de nuestros homenajeados serán dados a conocer por quien lo antecedió en este galardón el año 2024, **doña Salomé Martínez**.

Sin embargo, me parece relevante informar a ustedes los objetivos de esta distinción y los motivos que se invocan para otorgarla. Señala el Reglamento que el Premio se otorgará al Ingeniero que se hubiere distinguido por haber desarrollado acciones, en el campo público y/o privado, durante los tres años anteriores a los de su otorgamiento y para estos efectos, se consideran como acciones distinguidas aquellas que excedan el desempeño normal y eficiente de las labores habituales del ingeniero y que redundan en un beneficio evidente para el país, la sociedad, la profesión o el Instituto. Dichas acciones pueden consistir, a modo de ejemplo, en la dirección de una obra de ingeniería relevante

en el ámbito nacional, o la implementación de un proyecto tecnológico importante, o el impulso de una iniciativa de servicio público que impacte al país, o el particular realce que haya alcanzado en el país la labor normal que dicho ingeniero realice.

Extiendo mis más calurosas felicitaciones a los galardonados.

Sra. Salomé Martínez.

—Sres. José Francisco Muñoz y Francisco Suárez, premio “Al Ingeniero o Ingeniera por Acciones Distinguidas – Año 2025”. Sr. Juan Carlos Barros, presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, directores, autoridades, colegas, amigas, amigos. Muy buenos días.

Es para mí un honor poder presentar a los dos ingenieros que reciben el Premio por Acciones Distinguidas, Profesores José Muñoz y Francisco Suárez, académicos de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad Católica, reconociendo el sustantivo aporte científico en la defensa de los intereses de Chile ante la Corte Internacional de Justicia de la Haya en el caso respecto al estatus y uso de las aguas del Río Silala. Ambos profesores lideraron el equipo técnico y científico nacional que respaldó la defensa jurídica del Estado de Chile, formado por un equipo de expertos nacionales e internacionales, quienes en base a estudios técnicos-científicos y modelos hidrológicos elaboraron los argumentos que permitieron demostrar el carácter de curso de agua internacional del río Silala, y que el uso que estaba haciendo Chile de las aguas de este río es acorde al uso equitativo y razonable que establece el derecho internacional. Los estudios liderados por los Ingenieros Muñoz y Suárez se extendieron por alrededor de 6 años (2016-2022), considerando trabajo en terreno exhaustivo que fue clave para el éxito del litigio. La Dirección de Fronteras y Límites conformó un equipo científico internacional convocando a dos especialistas, Howard Wheater y Dennis Peach expertos en hidrología y geohidrología, quienes además de ser referentes en el tema, tenían experiencia testificando en juicios como el que estamos describiendo. A este equipo se sumó José Muñoz, quien tuvo la misión de conformar un equipo nacional que pudiera llevar a cabo los estudios necesarios para sustentar la demanda, demostrando en base a evidencia el carácter internacional del río Silala.

El equipo chileno, liderado por José y apoyado fuertemente por Francisco Suárez, convocó a un equipo multidisciplinario experto, en el cual participaron jóvenes profesionales y científicos quienes tuvieron la posibilidad de iniciar sus carreras con esta experiencia de aprendizaje única y transformadora. Este equipo experto nacional, que fue capaz de hacer realizar una diversidad de estudios, muchos de ellos en terreno, fue clave para el éxito de Chile. La profundidad de los estudios realizados a lo largo de los años permitió generar nuevo conocimiento y metodologías, resultando en publicaciones y números especiales en prestigiosas revistas de corriente principal del área. Más allá del trabajo realizado, José y Francisco destacan la importancia de considerar el aspecto geológico en los modelos de recursos hídricos subterráneos, lo que fue fundamental en los estudios realizados. Además, se generaron nuevas metodologías para el uso de modelos que permitieron posteriormente estudiar otras cuencas. Esta distinción también es en reconocimiento a estos importantes aportes.

El trabajo realizado muestra cómo, en estos tiempos en que muchos problemas medioambientales se han judicializado y donde empresas y el Estado se arman con estudios, es imprescindible que la ciencia esté a la base de los argumentos jurídicos constituyendo un apoyo inobjetable. El trabajo liderado por José y Francisco también nos permite apreciar la dimensión ética de la ingeniería. El objetivo científico de los estudios realizados permitió la solidez de los argumentos presentados, motivados por determinar una verdad científica respecto del fenómeno a la base de la demanda, y no por encontrar argumentos para ganarla.

La labor que realizaron José y Francisco les llegó en distintos momentos de la carrera a ambos. Para José, esto ocurrió en momentos en que se acercaba su jubilación, abriendo una oportunidad para seguir asumiendo desafíos. Francisco estaba en una etapa muy distinta de su carrera, iniciando el trabajo en 2016 con 36 años. Él me contó que esto fue una “inyección de potencia para seguir abordando nuevos problemas y hacer investigación de punta”. Francisco me contaba cómo en este equipo él propuso cosas que nadie había propuesto, contando con el apoyo y confianza de los expertos internacionales, y también los recursos que posibilitaban estos estudios. Esto generó un ciclo virtuoso que potenció su investigación, la cual a su vez fortaleció los argumentos necesarios para la demanda.

Francisco Suárez y José Muñoz tienen un impresionante currículo. José Muñoz es ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile, doctor en Ingeniería de la Universidad de Grenoble. En su carrera ha liderado proyectos de alta complejidad en el ámbito de los recursos hídricos, especializándose en hidrología, hidrogeología y modelación del flujo y transporte en acuíferos. Actualmente, es el Gerente de la nueva Unidad de Hidrogeología de Dictuc.

Francisco Suárez es Ingeniero Civil Hidráulico y Magíster en Ciencias de la Ingeniería UC, y Doctor en Ingeniería de la University of Nevada. Su línea de investigación se orienta a incrementar la disponibilidad de agua en regiones áridas, para lo que ha desarrollado nuevas tecnologías, modelos computacionales y prototipos experimentales. Actualmente es Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, de la Universidad Católica y director de Pregrado de Ingeniería. Ha recibido un número importante de premios y distinciones, como el Young Alumni of the Year Award, otorgado por la Mackay School of Earth Sciences and Engineering de la Universidad de Nevada, el año 2020.

Tuve la oportunidad de conversar con Francisco y José hace un par de semanas, quienes me relataron de manera vívida y apasionada la magnífica experiencia de la cual fueron protagonistas. Esta conversación con José y Francisco es una de las cosas lindas de haber recibido el premio el año pasado. Nunca hubiera tenido esa oportunidad, fue este reconocimiento que distingue aportes tan variados de la ingeniería la que me dio el privilegio de conversar con ellos y de tener hoy el honor de hablar de su trabajo. Me voy a permitir compartir con ustedes algunas partes de la conversación que tuvimos, espero no adelantarme a lo que José y Francisco nos van a contar.

El año 2016, Chile demanda a Bolivia solicitando que declare el Río Silala un río internacional. Esto surge a partir de una nota diplomática enviada por Bolivia respecto de que los manantiales del Silala no constituyan un río y por tanto el uso de Chile no se ajustaba a derecho. El año 2011, el Ministerio de Relaciones Exteriores y la Dirección General de Aguas solicitaron a un grupo de expertos, entre los cuales estaba José Muñoz y su colega Bonifacio Fernández, realizar un completo estudio de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en las cuencas fronterizas de los ríos Lauca y Silala el cual terminó el año 2013. Estos estudios fueron

enviados por la DIFROL a los expertos Dennis Peach y Howard Wheater, quienes se convencieron de que el río Silala es internacional. El año 2016, José fue invitado a una reunión muy confidencial en un hotel a la que asistió acompañado por Francisco, en la que explicó sus estudios ante el equipo científico internacional y el equipo de la DIFROL. El día siguiente ambos se enteraron por la prensa que se había presentado la demanda.

El trabajo, por supuesto, involucró trabajar con abogados de distintos países, que ya habían trabajado en conflictos internacionales. José me contaba que en las reuniones con ellos se aprendía mucho de estrategias y argumentos. En un momento, en una reunión en Ginebra, los abogados decidieron que el juicio se podía ganar solo con los aspectos jurídicos, y los abogados echaron a los científicos, "váyanse, vamos a seguir nosotros", nos dijeron. Me cuentan José y Francisco que se fueron a tomar unas cervezas ahí en Ginebra, un poco sentidos o desilusionados por la situación. Pero, finalmente fueron los aspectos científicos los valiosos en la corte, ayudando a los abogados a desarmar los argumentos de la de la contraparte. El equipo de abogados tuvo que entender los estudios realizados para las examinaciones cruzadas, donde, por una parte, tenían que demostrar la credibilidad de los testigos chilenos y, por otra, examinar los argumentos de los testigos expertos de la contraparte, logrando hacer preguntas que desarmaran sus argumentos. En esta preparación fue esencial el equipo Nacional, con quienes los abogados tenían sesiones interminables de preguntas, asegurándose de comprender aspectos muy técnicos de los estudios realizados.

Una cosa que me llamó mucho la atención fue la dinámica con los expertos internacionales. Como me dijo José, "cada vez que tenían que presentar un trabajo, todos nuestros científicos se sentían como que estaban dando un examen de grado. Porque ellos se sentaban ahí, preguntaban y preguntaban y preguntaban. La cantidad de trabajo y de conocimiento que estábamos generando era lo que respaldaba a estas personas".

El año 2018, Bolivia reconoce el carácter de curso de agua internacional del río Silala, pero presenta una contrademanda referente a que las canalizaciones existentes generan un aumento de caudal superficial que llega a Chile. La argumentación se basa en modelos hidrológicos, alimentados por datos de campo, mediante los cuales se

estimaba que el caudal aumentaba entre un 30% y un 40% por las canalizaciones, lo cual generaba el derecho a una compensación. Para refutar estos argumentos el equipo tuvo que entender los procesos que simulaba cada programa, detectando errores y manipulaciones. El equipo creó un modelo propio de la cuenca que permitió realizar nuevas estimaciones, obteniendo que el efecto real de las canalizaciones era de entre un 2% y un 3%. Obviamente, el tema no era hacer un modelo mejor, sino que encontrar el porqué de esta discrepancia. Me explicaron cómo las condiciones de borde consideradas por el modelo danés; por ejemplo, mantener el nivel del agua constante; eran inconsistentes con lo observado, provocando que el modelo danés que sustentaba la contrademanda boliviana entregara resultados incorrectos, entre otros aspectos.

El aporte de José Muñoz y Francisco Suárez muestra cómo la ingeniería aporta a la comprensión de fenómenos complejos, y cómo esto se gatilla por problemas reales que nos afectan. Esta noción de la ingeniería como disciplina enfocada en resolver problemas de relevancia social y mejorar la vida de las personas, es de gran relevancia para motivar a los jóvenes hacia la ingeniería. La experiencia de ellos también muestra cómo Chile puede llevar a cabo procesos serios, con recursos, visión de Estado, que pueden generar grandes beneficios para nuestro país, poniendo en valor y potenciando nuestras propias capacidades. La inversión sostenida en ciencia y tecnología es indispensable para nuestro propio futuro.

José Muñoz y Francisco Suárez son distinguidos por un trabajo de largo aliento y de excelencia, realizando aportes contundentes para nuestro país, y aportando al desarrollo y una visión moderna e inspiradora de nuestra propia disciplina.

Muchas gracias.

(Aplausos).

A continuación, los Sres. José Francisco Muñoz y Francisco Suárez reciben de manos del presidente del Instituto, la Medalla Recordatoria y el Diploma de Honor.

Acto seguido, don José Muñoz y don Francisco Suárez agradecieron la distinción en los siguientes términos.

Sr. José Francisco Muñoz Pardo.

—Estimado presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, señor Juan Carlos Barros; estimado presidente de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, señor Jorge Gironás; estimado Vicedecano de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Dr. Miguel Torres, estimados directores del Instituto; queridos colegas, amigos y familia, muy buenos días.

Es un gran honor estar hoy aquí rodeado de personas que admiramos profundamente, en una ceremonia que celebra el compromiso de la ingeniería con nuestro país.

Estamos muy agradecidos y, sobre todo, muy emocionados de poder compartir este momento con ustedes.

Queremos comenzar reconociendo a Salomé Martínez por su generosa presentación.

El año pasado ella recibió este mismo premio —fue la primera mujer en lograrlo— gracias a su destacada trayectoria en la enseñanza y aprendizaje de la matemática en la educación pública. Nos honra enormemente que sea ella quien nos haya presentado hoy.

También queremos agradecer a la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile y a la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica por presentar nuestra nominación, y al Instituto de Ingenieros y su Consejo Consultivo por otorgarnos este galardón. Recibirllo es un honor inmenso, que refleja el esfuerzo de un gran equipo interdisciplinario que trabajó durante años en un proyecto científico y legal de alto impacto.

En lo personal, quiero agradecer profundamente a mi familia y a mis amigos, ... que han sido un pilar constante a lo largo de mi vida profesional. Sin su apoyo, muchos de los desafíos que enfrentamos simplemente no habrían sido posibles.

La controversia del río Silala entre Chile y Bolivia tiene raíces antiguas, pero también deja enseñanzas muy actuales. El Silala se origina en un sistema de manantiales y humedales ubicados en Bolivia, en el altiplano, justo antes de la frontera con Chile. Sus aguas fluyen naturalmente hacia nuestro país debido a la pendiente del terreno.



Don José Francisco Muñoz Pardo.

En el Tratado de Paz y Amistad de 1904, ambos países reconocieron que el Silala era un curso de agua internacional y durante décadas, sus aguas se usaron principalmente para los trenes a vapor que unían Antofagasta con Oruro y también como fuente de agua potable. En 1928, Bolivia autorizó a la empresa Ferrocarril Antofagasta–Bolivia a construir canales de drenaje en los bofedales de las Quebradas Cajones y Orientales, para encauzar sus aguas y para reducir la proliferación de insectos. Con el tiempo, esas aguas comenzaron a usarse también para fines mineros. Sin embargo, recién en 1999 Bolivia empezó a reclamar soberanía plena sobre el recurso, y en 2016 la disputa escaló con acusaciones de que Chile utilizaba las aguas del Silala ilegalmente. Ese fue un punto de inflexión.

A mediados de 2016, Chile demanda a Bolivia ante la Corte Internacional de Justicia, solicitando que se declare que el Silala es un curso de agua internacional que debe ser compartido por ambos países. La demanda fue liderada por la doctora Ximena Fuentes, directora nacional de Difrol, y apoyada por la abogada Johanna Klein.

Para serles sincero, yo me enteré por la prensa. Unos días antes, había sido citado a una reunión confidencial en un hotel del centro de Santiago, donde presenté los antecedentes científicos que habíamos reunido durante años en trabajos realizados en el Dictuc, en la cuenca del Silala. Pocos días después de la demanda, Ximena Fuentes me

invitó a integrar un comité científico internacional, junto al hidrólogo Howard Wheater y al geólogo Denis Peach, ambos científicos ingleses de gran prestigio.

Me correspondió conformar un equipo diverso de científicos chilenos que debía caracterizar una cuenca remota, situada a más de 4.300 metros sobre el nivel del mar, con condiciones climáticas extremas. Esa cuenca terminó convirtiéndose en el laboratorio natural más estudiado de Chile en la última década.

En primer lugar, invité a Francisco a sumarse al comité científico, y se entusiasmó de inmediato —a pesar de su carga laboral y de que recién había sido padre de su primera hija. Él propuso un tema innovador: usar el calor como trazador ambiental para investigar la interacción entre aguas superficiales y subterráneas. Esa idea permitió obtener evidencia irrefutable para demostrar la existencia de un curso de agua internacional bajo las reglas del derecho internacional.

En total propusimos diez líneas de trabajo científico, con un equipo comprometido de profesionales de distintas universidades, reparticiones públicas y empresas privadas. Todos compartían el mismo espíritu: poner su conocimiento al servicio del país. Entre ellos quiero mencionar, en orden alfabético, a Hernán Alcayaga, Ramón Aravena, Nicolás Blanco, Bonifacio Fernández, Carolina Gómez, Christian Herrera, Claudio Latorre, Luca Mao, Virginia McRostie, Edmundo Polanco, entre muchos otros.

Durante casi seis años realizamos una gran cantidad de estudios, que se pueden dividir en dos grandes grupos.

El primero, dedicado a caracterizar la cuenca: topografía, patrones de drenaje, geoquímica e isótopos, geología, geofísica, balance hídrico, exploración hidrogeológica, historia sedimentaria, geomorfología y arqueología por nombrar los principales temas. El objetivo era reunir toda la evidencia científica posible para demostrar el carácter transfronterizo del curso de agua.

El segundo grupo se enfocó en el análisis crítico de los estudios presentados por Bolivia. Con nuestros ingenieros jóvenes, tuvimos que hacer una verdadera ingeniería inversa para refutar sus modelos conceptuales y numéricos, que

sostenían que las canalizaciones aumentaban drásticamente los caudales y que Chile debía indemnizar a Bolivia retroactivamente. Fue un trabajo desafiante —los modelos eran sofisticados y el acceso a los datos, limitado. Incluso se tuvo que pedir información a Bolivia a través de la Corte. Pero también fue uno de los momentos más gratificantes: reproducir sus resultados y detectar inconsistencias. Esa validación fue la mejor recompensa al esfuerzo del equipo y un respaldo técnico clave para la defensa chilena.

Quiero mencionar a algunos de los ingenieros jóvenes que participaron en el equipo y destacar que su crecimiento profesional fue impresionante: Magdalena Lagos, María José Fuenzalida, Tomás Oportus, Andrés Sarabia, Pedro Sanzana, Gonzalo Yáñez, Magdalena Mendoza, Fernanda Stegmaier entre otros. Mención especial para Magdalena Lagos, quien además de aportar científicamente en diversos temas, interactuó con abogados y participó activamente en el juicio. Su compromiso fue ejemplar. Todos hicieron que me sintiera profundamente orgulloso de ser profesor de muchos de ellos.

Trabajar en este desafío junto a Francisco fue una verdadera inyección de energía. Me permitió seguir enfrentando cada etapa con entusiasmo —incluso después de los famosos 65 años. Ahora dejo la palabra a Pancho, para que también pueda compartir su agradecimiento.

Muchas gracias.

(Aplausos).

Sr. Francisco Suárez Poch.

—Muchas gracias, Pepe.

Reitero mis saludos a todas las autoridades presentes, a los premiados, colegas, amigos y familiares. Es realmente un honor estar hoy junto a ustedes, celebrando las acciones que enorgullecen y engrandecen la Ingeniería de nuestro país.

También deseo reconocer el apoyo de DICTUC, y de Felipe Bahamondes, su gerente general. Gracias a ellos pudimos mantener a nuestro equipo profesional trabajando por estos largos años.



Don Francisco Suárez Poch.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia: a Jazmín, Flavia y Fili; a mis padres; y a nuestros hermanos, tanto de sangre como políticos. Su apoyo, compañía, comprensión, cariño y paciencia han sido fundamentales en el camino que he recorrido, y me permitieron dedicarme con pasión a un proyecto de gran magnitud, que hoy me trajo aquí.

Tuve el privilegio de incorporarme al equipo científico chileno, proponiendo estudios innovadores que permitieron comprender mejor la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, y que complementaron fuertemente la investigación que desarrollaba como un académico joven, de apenas 36 años. Además, me correspondió colíderar el trabajo de los distintos equipos de investigación y guiar a un grupo de jóvenes motivados y comprometidos, de quienes me siento profundamente orgulloso. Me siento afortunado de seguir aprendiendo de mi mentor, José, que me ha acompañado y aconsejado de manera desinteresada desde hace ya 25 años.

Mientras Bolivia preparaba su contrademanda, junto a José propusimos nuevos estudios para abordar los vacíos en el conocimiento. Monitoreamos numerosas variables ambientales —incluyendo flujos de evaporación en humedales, caudales, índices biofísicos y ecológicos—, interactuando con un gran número de profesionales de instituciones públicas y privadas, y de diversas disciplinas. Mirando

hacia atrás, los enfoques utilizados no solo aportaron evidencia científica robusta al caso jurídico, —que quedó documentada en una edición especial en la revista WIREs Water—, sino que también mostraron cómo la ingeniería puede adaptarse y evolucionar junto a otras disciplinas para responder a desafíos complejos y generar un impacto significativo en la sociedad.

Hay tres aspectos que me gustaría destacar hoy:

El primero es la formación de capital humano avanzado en Chile, que ha alcanzado un nivel que nos permite estar a la altura de los grandes a nivel internacional. Contamos con investigadores y profesionales jóvenes que no solo aportaron con entusiasmo, sino también con excelencia técnica. Fue impresionante ver lo bien preparados que estaban nuestros ingenieros e ingenieras, quienes demostraron gran capacidad y compromiso trabajando en condiciones extremas de altitud y clima. Para mí, es un orgullo enorme haber visto crecer a la mayoría de ellos desde las aulas —cuando estaban en tercer o cuarto año de universidad— hasta su consolidación profesional en los distintos trabajos que realizamos.

El segundo punto es el aporte de las mujeres, tanto en trabajos de gabinete como de terreno... Fue fundamental. Queremos agradecer especialmente a cada mujer que integró nuestro equipo y que, con su compromiso y capacidad, nos mostró lo mejor del espíritu de colaboración. Ninguna se aminoró ante el trabajo exigente ni frente a las condiciones climáticas extremas. Todo lo contrario: nunca tuvimos que cuestionar quién podía ir a terreno, porque todos —y especialmente ellas— siempre lo dieron todo.

El tercer punto es el trabajo codo a codo entre abogados y científicos. Lo que vivimos fue único: la ciencia y el derecho actuando en verdadera sinergia. Para mí, esto tuvo un momento culminante cuando nos encontrábamos en el Palacio de la Paz, en La Haya. En medio de los alegatos orales, el abogado defensor de Chile, Sam Wordsworth, fue capaz de detectar al instante errores en las respuestas de los científicos que apoyaban a Bolivia durante su examinación cruzada. Ese cruce, donde un argumento científico mal planteado quedó en evidencia ante los jueces de la Corte, quitándole credibilidad al equipo científico boliviano, fue una demostración clara de lo importante que fue el diálogo entre disciplinas, y una recompensa personal a las incontables horas de explicaciones científicas compartidas con los abogados que defendían la posición chilena.



Sres. Muñoz y Suárez en compañía de la Sra. Salomé Martínez y Sr. Juan Carlos Barros.

Hoy más que nunca creemos que la ingeniería debe tener un propósito y estar al servicio del país, enfrentando los desafíos con rigor, creatividad y vocación. Este reconocimiento nos anima a seguir trabajando con convicción, demostrando que la ingeniería, cuando se ejerce con vocación pública y amor, puede transformar la sociedad.

En este caso particular, otro aspecto valioso que queda como legado es que este esfuerzo dejó capacidades instaladas. Hoy, un grupo de especialistas en hidrogeología continúa apoyando al Estado de Chile en temas de recursos hídricos compartidos en otros sectores fronterizos, con el mismo compromiso con el que comenzamos a trabajar hace ya casi diez años.

Queremos terminar agradeciendo nuevamente a todos quienes hicieron posible este trabajo. Fue un honor formar parte de esta historia, donde la ciencia y la ingeniería chilena mostraron su valor, y donde aprendimos que, con rigor, colaboración y compromiso, se pueden alcanzar logros que parecían inalcanzables.

Muchas gracias.

(Aplausos).

Fin de la ceremonia.

PREMIO
“RAÚL DEVÉS JULLIAN – AÑO 2025”
A LA INGENIERA SRA. SILVANA COMINETTI COTTI-COMETTI



Sra. Silvana Cominetti recibe el premio “Raúl Devés Jullian – Año 2025”.

El viernes 17 de octubre de 2025, en el Salón de Honor del Instituto de Ingenieros de Chile, tuvo lugar la ceremonia de entrega del Premio “Raúl Devés Jullian - Año 2025” a la distinguida Ingeniera doña Silvana Cominetti Cotti-Cometti.

El presidente del Instituto, don Juan Carlos Barros, dio comienzo a la ceremonia con una breve intervención aludiendo a la naturaleza del premio, su significado dentro del Instituto y en la comunidad de los ingenieros, y el especial merecimiento de la Sra. Silvana Cominetti.

A continuación, de acuerdo con lo que es tradicional, la presentación del galardonado estuvo a cargo del Sr. Patricio Aceituno, quien obtuvo este premio el año 2023.

El Presidente.

—Sra. Silvana Cominetti, premio Raúl Devés Julian año 2025. Sr. Patricio Aceituno, premio Raúl Devés Julian año 2023. Galardonados con los premios "Al Ingeniero o Ingeniero por Acciones Distinguidas" y "Al Desarrollo Científico y Tecnológico Ramón Salas Edwards". Familiares y amigos de los galardonados.

Señores Directores, Socios del Instituto. Señoras y señores.

El premio "Raúl Devés Julian", se otorga cada dos años al ingeniero chileno que se haya destacado por su esfuerzo y trabajo en la enseñanza de la Ingeniería en Chile, y fue instituido en el año 1997 para honrar la memoria de ese destacadísimo hombre público e ingeniero, don Raúl Devés Julian, Medalla de Oro de nuestro Instituto y miembro de su Consejo Consultivo, quien fuera distinguido Decano de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile y se destacara por su extraordinario espíritu innovador y liderazgo en el campo de la enseñanza de la ingeniería. Fue impulsor de una de las iniciativas de mayor trascendencia emprendidas en el país con el propósito de modernizar y desarrollar la enseñanza de la ingeniería, las que fueron determinantes para elevar la calidad de la enseñanza que se exhibe hoy en día en la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Hoy, con ocasión de la entrega del premio que lleva su nombre, el Instituto de Ingenieros de Chile le rinde una vez más un sentido homenaje.

El Premio Raúl Devés Julian de este año ha recaído en la persona de **Silvana Cominetti**, Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María. Su presentación, como es nuestra tradición, estará a cargo del galardonado con el premio en la versión anterior, don Patricio Aceituno. Ellos ya se han sumado a los sobresalientes antecesores en este premio que comenzaron a construir el prestigio que esta distinción está alcanzando en el campo de la enseñanza de ingeniería.

Extiendo mi más calurosa felicitación a Silvana y su familia.

Muchas gracias.

A continuación, la presentación de la Sra. Cominetti, realizada por el Ingeniero Sr. Patricio Aceituno, premio Raúl Devés Julian, año 2023.

Sr. Patricio Aceituno Gutiérrez.

—Ingeniero Juan Carlos Barros, presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, Sra. Silvana Cominetti, Galardonados todos, Rectora de la Universidad de Chile, profesora Rosa Devés Alessandri; amigos presentes, buenos días.

Me es muy grato cumplir con la tarea de presentar a la ingeniera civil, académica, profesora universitaria, Consejera, Presidenta, Directora, la Sra. Silvana Cominetti Cotti-Cometti, en la ceremonia en la cual el Instituto de Ingenieros de Chile le otorga el Premio Raúl Devés Julian en su versión N° 15 desde que en 1997 se inaugurara esta distinción que busca reconocer el esfuerzo y trabajo de un ingeniero o ingeniera en la enseñanza de la ingeniería en Chile.

El ADN de la ingeniería, en el alma de Silvana, hay que rastrearlo en la región de Lombardía, Italia, donde su abuelo, de profesión profesor, mantuvo la ilusión de tener un hijo médico hasta que sorpresivamente se enteró que su retoño, de nombre Girólamo, no se había graduado de medicina, sino que, de ingeniería civil, en el renombrado y tradicional Politécnico de Milán. Quizás este punto de partida, marcado por una vocación a toda prueba por la ingeniería del padre de Silvana, explica lo que vino después cuando los rigores post segunda guerra mundial en Italia llevaron a la familia Cominetti Cotti-Cometti a emigrar a nuestro país, donde en el ejercicio de su profesión, Girólamo se transformó en el modelo y referente cercano para cuatro de sus 5 hijos que decidieron formarse en alguna especialidad ingeniería, realizando dos de ellos, Pablo y Silvana, sus estudios de ingeniería civil en la Universidad Técnica Federico Santa María, siguiendo el consejo paterno que consideraba esa institución la más parecida a su alma mater en Italia.

Las diversas denominaciones que al inicio de este discurso utilicé para referirme a Silvana tuvieron el propósito de dejar de manifiesto las diversas capacidades desplegadas en una vida con múltiples trayectorias, a partir de una rigurosa formación profesional en ingeniería civil, la que fue posteriormente complementada con una formación de postgrado de excelencia en la Pontificia Universidad Católica de Chile donde obtuvo los grados académicos de Magíster y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, mención Estructuras.

Luego de completada su formación, Silvana ha dedicado largos años de su vida a la formación de ingenieros e

ingenieras. Cabe destacar que entre los múltiples caminos por los cuales transcurrió la docencia universitaria en ingeniería, el de Silvana incluyó una rica mezcla entre el conocimiento teórico al más alto nivel posible de las materias enseñadas y el que entrega el desafío de abordar y resolver problemas reales a través del desempeño libre de la profesión. Sus tareas en este ámbito son innumerables, materializadas en el desarrollo de proyectos de ingeniería estructural, incluyendo colegios, viviendas, locales comerciales, galpones, muros de contención, entre otros. La lectura de esta parte de su currículum la vinculé con unas palabras de Silvana que encontré en la búsqueda de antecedentes para organizar este discurso, y que demuestran el rol inspirador de su padre ingeniero en la ruta profesional elegida. Cito. *“Desde temprana edad supe que quería seguir sus pasos. Me encantaba verlo agachado en su mesa de dibujo haciendo planos impecables, que luego se materializaban en viviendas reales construidas por él”*.

De todos modos, sobre el desempeño profesional de Silvana hay mucho más que decir. En su amplia trayectoria profesional, que ha nutrido en forma permanente su labor de transmitir el conocimiento a nuevas generaciones de profesionales de la ingeniería, menciono a continuación algunos ejemplos que revelan la diversidad de las acciones desempeñadas: experta asesora estructural en edificios de la Corporación de Asistencia Judicial en varias ciudades; asesoría en proyectos de estructura para empresa eléctrica Puntilla; proyectos de ingeniería realizados para la Sociedad del Canal de Maipo, para el Parque Metropolitano de Santiago y para la empresa Schwager Energy, entre otros.

Por supuesto que debo recalcar que la actividad profesional de Silvana se articuló con una intensa vida académica dedicada a la docencia e investigación, en un ir y venir que alimenta ambas dimensiones. Así, por 25 años, entre 1982 y 2007, se desempeñó como académica de jornada completa en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago. De esos tiempos son los y las profesionales que hoy recuerdan su docencia en cursos de las áreas de Análisis Estructural, Ingeniería Sísmica y Dinámica de Estructuras, cursos de Diseño en Hormigón Armado y Cursos de Diseño Sismorresistente, así como su labor como profesora guía de trabajos de titulación. En ese periodo conoce también el stress y los desafíos que impone la actividad de investigación: arma y gana propuestas como investigadora principal o coinvestigadora. Los resultados los divulga como autora o coautora en publicaciones indexadas y en capítulo de

libros, así como en actas de congresos de su especialidad a los que asiste en Chile y en el extranjero.

Con el tiempo, otras instituciones que valoraron su capacidad docente en las áreas de ingeniería civil en la que es especialista hicieron crecer el número de profesionales que reconocen en ella un valioso aporte a su formación. Así, con algunos intervalos, entre 1992 y 2015 realizó docencia en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central y entre 2015 y 2022 en la carrera de Ingeniería Civil en Obras Civiles de la Universidad Diego Portales.

Por otra parte, su carácter inquieto y generoso, y su permanente disposición a enfrentar nuevos desafíos, la llevó a comprometerse en diversas actividades. Ha ocupado altos cargos directivos en instituciones de educación superior, entre otros encabezando la Vicerrectoría Académica de la Universidad de Santiago, la Vicerrectoría de Desarrollo Institucional y la Vicerrectoría Académica de la Universidad Central, la Dirección de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad San Sebastián, entre otras destinaciones. Además, se ha desempeñado como especialista en temas de acreditación de carreras profesionales y de Instituciones de Educación Superior, así como evaluadora de proyectos Fondecyt y Mecesup.

Por último, están los reconocimientos públicos. Estos empezaron temprano en su vida cuando 44 años atrás, en 1981, recibió la distinción al mejor ingeniero o ingeniera civil titulado ese año en la Universidad Técnica Federico Santa María. Luego vinieron en 2008 el Premio *Justicia Acuña Mena* del Instituto de Ingenieros de Chile y el Premio Graciela Muñoz Marazzi, en la categoría Ex – Alumna, que la UTFSM entregó en la primera versión de esa distinción en 2023.

Y en lo que respecta a reconocimiento público, no puedo dejar de mencionar en este ilustre, tradicional e histórico Instituto el hecho de haber sido la primera mujer en presidirlo en el bienio 2022-2023, nada menos que 134 años luego de su creación en 1888.

Este ha sido un apretado resumen de la vida de Silvana, que es como un árbol frondoso, de muchas ramas, cada una de las cuales ha dado sus frutos. Es la historia de una mujer valiente, que ha enfrentado múltiples desafíos, incluyendo uno que ahora constituye una rareza, que es el haberse atrevido junto a su esposo a armar una familia y tener a sus dos hijas cuando ambos eran estudiantes universitarios.

Estimada Silvana, finalizo estas palabras mencionando lo orgullosos que se sentirían tu papá Girólamo, tu mamá Cecilia y tu querido hermano Pablo, quienes desde otra dimensión celebran el reconocimiento que hoy recibes rodeada por el cariño y admiración de tu familia, amigos y colegas. Y ahora sí, para cerrar, reproduczo una frase que alguna vez escribiste en una autobiografía, y que a mi juicio muestra muchas de tus virtudes y justifica cabalmente el reconocimiento que hoy recibes. *"Mi mayor impacto como profesora es transformar vidas, formando profesionales cuyas decisiones y diseños mejoran la sociedad. Es una gran responsabilidad que abrazo con pasión"*.

Mis más sinceras felicitaciones Silvana.

Ha sido un gran honor para mí dirigir estas palabras frente a esta audiencia y en este lugar.

(Aplausos).

A continuación, la Ingeniera Sra. Silvana Cominetti recibe de manos de don Juan Carlos Barros, la Medalla Recordatoria y el Diploma de Honor.

Acto seguido, la Sra. Cominetti agradece la distinción en los siguientes términos.

Sra. Silvana Cominetti Cotti-Cometti.

—Ingeniero señor Juan Carlos Barros, Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile; ingeniero y profesor señor Patricio Aceituno; Rectora de la Universidad de Chile, profesora Rosa Devés Alessandri; ingeniero comercial señor Guido Meller Mayr, Presidente de la Asamblea de Socios de la Universidad del Alba; querida familia, colegas, amigos, señoras y señores:

Recibir el Premio Raúl Devés Jullian del Instituto de Ingenieros de Chile es un honor profundamente significativo. Esta distinción rinde homenaje a un profesional ejemplar que supo conjugar su brillante labor en la rea- lización de numerosas obras de infraestructura pública con un compromiso inquebrantable con su alma mater, la Pontificia Universidad Católica de Chile, donde dejó una huella imborrable como académico y decano de la Facultad de Ingeniería entre 1960 y 1968.



Sra. Silvana Cominetti, durante su discurso.

Expreso mi más sincero agradecimiento a quienes tuvieron la generosidad de proponer mi nombre y a todos quienes respaldaron esta iniciativa. Este reconocimiento distingue a ingenieras e ingenieros que han contribuido de forma sobresaliente a la enseñanza de nuestra disciplina en Chile, un ámbito que valoro profundamente y que hoy me enorgullece representar.

Sin pretender compararme con don Raúl Devés, debo decir que también he procurado integrar el ejercicio profesional de la ingeniería con la labor académica. Estoy convencida de que la formación de futuros ingenieros requiere tanto de bases teóricas sólidas como de la experiencia práctica que solo el trabajo en terreno puede ofrecer. Por ello, complementé mi formación con los grados de Magíster y Doctora en Ciencias de la Ingeniería y con una trayectoria activa en el ejercicio profesional. Muchas veces, en un mismo día, cambié los tacos por bototos, me puse el casco y subí a los andamios. He ejercido como calculista, profesora durante 42 años ininterrumpidos y he asumido responsabilidades de gestión en diversos cargos universitarios.

El rigor analítico, la capacidad de estructurar problemas y la búsqueda metódica de soluciones —herramientas que nos entrega la ingeniería— han guiado siempre mi camino. Gracias a ellas pude convertirme en la primera mujer en ocupar distintos cargos históricamente reservados a



En el centro, la Sra. Silvana Cominetti, premio “Raúl Devés Jullian – Año 2025” y la Sra. Rosita Devés, Rectora de la Universidad de Chile, las acompañan: Sres. Leonardo Bronfman, premio “Ramón Salas Edwards – Año 2024”, Patricio Aceituno, premio “Raúl Devés Jullian – Año 2023” y Juan Carlos Barros, presidente del Instituto de Ingenieros de Chile.

hombres. Esto me llena de orgullo porque demuestra que nuestras capacidades son plenamente equivalentes y, a la vez, complementarias.

De la vida académica también me llevo un “posgrado no oficial” en negociaciones con estudiantes: paros, tomas y asambleas incluidas. Ese aprendizaje, sin duda, fue uno de los más complejos de mi carrera.

Si miro en retrospectiva, uno de mis mayores logros ha sido formar generaciones de ingenieras e ingenieros que hoy contribuyen al desarrollo del país desde distintos ámbitos. Nada me enorgullece más que reencontrarme con exalumnos que expresan su cariño y reconocimiento: ese es, sin duda, uno de los mayores honores que puede recibir un académico.

Pero hay otro proyecto que deseo compartir: nuestro proyecto de vida. Aquí me acompañan el ingeniero comercial Guido Meller, la abogada Sandra Guzmán y el profesor ingeniero Mario Letelier, miembros del Directorio de la

Universidad del Alba, junto al abogado Rafael Rosell, rector de la universidad.

En 2019, junto a ellos y al ingeniero comercial Carol Pinto-Agüero —que ya no está con nosotros—, enfrentamos el desafío de rescatar la entonces Universidad Pedro de Valdivia. Sus antiguos socios habían decidido cerrarla, dejando a 5.000 estudiantes en Antofagasta, La Serena, Santiago y Chillán frente a un futuro incierto. La institución no estaba acreditada, su casa central había sido incendiada durante el estallido social y su situación financiera era crítica.

Decidimos no abandonar a esos estudiantes y sus familias. Asumimos la responsabilidad de levantar una universidad viable, capaz de ofrecer formación de calidad a jóvenes con talento y potencial, aunque con menos oportunidades previas. Fue un proceso arduo: negociamos con los antiguos socios —ahí fue útil mi “posgrado no oficial”—, quienes aportaron recursos para cerrar su ciclo, mientras nosotros asumimos el desafío como asociados organizadores.

Gracias a un trabajo colectivo basado en la confianza y el compromiso, logramos darle un nuevo rumbo a la institución. Hoy, la Universidad del Alba está acreditada por la CNA; esperamos el resultado de la acreditación internacional con la agencia alemana AQQAS; todas nuestras carreras están certificadas o acreditadas, y hemos alcanzado una sostenibilidad financiera que contrasta con el déficit inicial. Pasamos de ser una universidad pequeña a una mediana, con cerca de 10.000 estudiantes. Este es, sin duda, un proyecto que nos llena de orgullo y sentido.

Quiero agradecer profundamente a mi familia por su apoyo incondicional. En especial, a mi esposo Luis, ingeniero civil de la Universidad Santa María, quien ha sido un pilar fundamental. Muchas veces, cuando dudaba de mis capacidades (denominado como "síndrome del impostor"), fue él quien me impulsó a seguir adelante. Yo corro sola después, pero ese primer empujón ha sido siempre decisivo. Y un gracias infinito a mis hijos, Catalina, Daniela y Roberto, por el amor dispensado, la paciencia que me han tenido y por regalarme cinco hermosas nietas, y tres nuevos hijos: nuestros yernos y nuera.

Finalmente, quiero agradecer al Instituto de Ingenieros de Chile, donde encontré un espacio para retribuir a la sociedad los privilegios de mi formación. El trabajo en sus Comisiones de Estudio, muchas centradas en la formación de ingenieros, me permitió compartir con profesionales de

excelencia que han entregado generosamente su tiempo y conocimiento para reflexionar y proponer soluciones a los grandes desafíos del país. Haber tenido el honor de presidir el Instituto ha sido, además, una fuente invaluable de crecimiento personal y profesional.

Quiero destacar un proyecto reciente fruto de un trabajo conjunto entre el Instituto de Ingenieros, el Colegio de Ingenieros, CONDEFI y SOCHEDI: la propuesta del Meta Perfil del Ingeniero de Base Científica y sus competencias genéricas comunes, coherentes con el Marco Nacional de Cualificaciones y alineadas con los criterios internacionales de ABET y del Washington Accord. Este marco, diseñado para los desafíos del siglo XXI, permitirá posicionar a Chile como un referente regional en formación de ingenieros, facilitando la movilidad profesional y guiando la transformación curricular y el aseguramiento de la calidad.

Con estas palabras quiero cerrar, reiterando mis más sinceros agradecimientos a quienes han hecho posible mi desarrollo personal y profesional, a mi familia, a mis amigos, a mis colegas y, especialmente, al Instituto de Ingenieros de Chile.

Muchas gracias.

(Aplausos).

Fin de la ceremonia.

PREMIO “AL DESARROLLO CIENTÍFICO TECNOLÓGICO RAMÓN SALAS EDWARDS – AÑO 2025”



Premio “Al Desarrollo Científico Tecnológico Ramón Salas Edwards – Año 2025”, Sres. Rodrigo Verschae, Cristóbal Quiñinao, Jaime Varas y Luis Cossio, por su trabajo “Agricultura de Precisión”.

En solemne ceremonia realizada en el Salón de Actos de nuestra Institución, el viernes 17 de octubre de 2025, el Instituto de Ingenieros de Chile, hizo entrega del premio “Al Desarrollo Científico Tecnológico Ramón Salas Edwards – Año 2025” a los Ingenieros Sres. Rodrigo Verschae, Cristóbal Quiñinao, Luis Cossio y Jaime Varas, por su trabajo “Agricultura de Precisión”.

Este Premio fue instituido para destacar el mejor trabajo científico o tecnológico relacionado con la Ingeniería, y se otorga cada año a la, o las personas que, en conjunto, hayan elaborado y publicado dicho trabajo dentro de los 10 años anteriores al año en que se otorga dicho premio.

Don Juan Carlos Barros, presidente del Instituto, inició la ceremonia con una breve alocución, refiriéndose a la naturaleza de este Premio y a su significado dentro del Instituto y en la comunidad de los ingenieros.

Posteriormente, realizó la presentación de los galardonados, el Sr. Leonardo Bronfman, uno de los coautores del trabajo galardonado en el año 2024.

El Presidente.

—Muy buenos días. Galardonados presentes, autoridades, directores, amigos y amigas:

El premio “Al Desarrollo Científico Tecnológico Ramón Salas Edwards” fue instituido para destacar el mejor trabajo científico o tecnológico relacionado con la Ingeniería y se otorga cada año a la o las personas que hayan elaborado y publicado dicho trabajo en los 10 años anteriores a aquel en que se otorga dicho premio.

Este año corresponderá al coautor del trabajo galardonado el año 2024, **Sr. Leonardo Bronfman**, presentar el trabajo de este año, “Agricultura de Precisión” de los autores **Rodrigo Verschae, Cristóbal Quiñinao, Luis Cossio y Jaime Varas**, y de esta forma, testimoniar en él los aspectos que caracterizan el trabajo distinguido y que honran la memoria de Don Ramón Salas Edwards. Por ello sólo me limitaré a señalar a los asistentes a esta ceremonia, que nos encontramos ante un trabajo hecho por profesionales cuyos atributos coinciden plenamente con aquellos requisitos que deben darse para ser distinguidos con este Premio.

Extiendo a los autores del trabajo galardonado mis sinceras felicitaciones.

A continuación, don Leonardo Bronfman, hace la presentación del trabajo galardonado.

Sr. Leonardo Bronfman.

—Señor Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, don Juan Carlos Barros; señoras y señores directores; miembros del Consejo Consultivo; galardonadas y galardonados de esta jornada; autoridades académicas y del sector productivo; colegas, familiares, amigas y amigos:

Muy buenos días.

Es un honor tomar la palabra para presentar el Premio “Al Desarrollo Científico Tecnológico Ramón Salas Edwards” 2025, que el Directorio y el Consejo Consultivo del Instituto han discernido para el desarrollo “Agricultura de Precisión”. Esta ceremonia mantiene viva una tradición que enaltece a la ingeniería chilena y su impacto en la vida de las personas.

El Premio “Al Desarrollo Científico Tecnológico Ramón Salas Edwards” reconoce el mejor trabajo científico-tecnológico en el campo de la ingeniería desarrollado en Chile, realizado dentro de los últimos diez años, y puesto a prueba en su pertinencia práctica, en su capacidad innovadora y en su aporte a la productividad y al bienestar. No es solo una distinción técnica: es una afirmación de que el conocimiento y la creatividad, cuando se orientan a problemas reales, cambian industrias y mejoran la vida de las comunidades.

El desarrollo que hoy celebramos, “Agricultura de Precisión”, es una respuesta ingenieril y científica a un conjunto de desafíos que definen la competitividad, la sostenibilidad y la resiliencia del agro chileno: variabilidad climática intra-predial, cambios en la disponibilidad de mano de obra, exigencias crecientes de calidad y trazabilidad, y la necesidad de producir más con menos, cuidando suelo, agua y biodiversidad. Es, en suma, tecnología puesta al servicio de un sector que es identidad, empleo y progreso para millones de personas.

Sus autores —el profesor Rodrigo Verschae, el profesor Cristóbal Quiñinao, el ingeniero Luis Cossio y el ingeniero agrónomo Jaime Varas— traen trayectorias notables que convergen en un mismo propósito: llevar inteligencia de datos, robótica y modelamiento a la toma de decisiones de los productores, con soluciones robustas, escalables y económicamente viables. Rodrigo Verschae, doctor en Ingeniería Eléctrica, especialista en visión computacional, IA y robótica, lidera la concepción y dirección científica y tecnológica; Cristóbal Quiñinao, Doctor en Ciencias Matemáticas, codirige con el diseño de modelos dinámicos y climáticos; Luis Cossio, magíster e ingeniero eléctrico, desarrolla la visión computacional para seguimiento y conteo fenológico; y Jaime Varas, ingeniero agrónomo, coordina el trabajo de campo y el vínculo con los productores.

El corazón del proyecto son dos pilares, distintos y complementarios, que dialogan entre sí:

Primero, visión computacional y robótica aplicada al ciclo fenológico: donde antes había muestreos manuales esporádicos en “uno de cada cien árboles”, hoy hay cámaras, videos y algoritmos de “deep learning” que detectan, siguen y cuentan frutos a lo largo de hileras completas, distinguiendo estados de desarrollo. Esta automatización reduce errores, incrementa frecuencia de observación y transforma datos en mapas de densidad y madurez por

árbol y por cuartel, con impacto directo en estimaciones de rendimiento, decisiones de manejo y ventanas de cosecha.

Segundo, sensorización distribuida y modelamiento climático intra-predial: A través de redes LoRaWAN de gran alcance y gran cantidad de nodos de ultra bajo consumo —capaces de transmitir cada 20 minutos durante años sin mantenimiento— se miden temperatura y humedad en puntos clave del predio, se interpolan campos de temperatura y se estiman horas de frío para cada árbol. Esta infraestructura convierte datos dispersos en información útil, y a su vez realimenta la capa de visión y conteo para cerrar el ciclo de estimación y planificación.

El caso de la cereza es paradigmático. Entre 2015 y 2023, la producción nacional se cuadruplicó, consolidando a Chile como actor global. Ese salto obliga a una ingeniería de procesos finísima: planificación del raleo, protección contra heladas, riego, nutrición, y cosecha con precisión temporal y espacial, en un contexto de variabilidad y cambio climático. El proyecto premiado ataca precisamente esa variabilidad, dotando a los productores de mapas, series temporales y predicciones que permiten intervenir a tiempo —ni antes ni después— para homogeneizar madurez, estabilizar calibres y asegurar calidad de exportación.

La elegancia de la solución está en cómo equilibra sofisticación y usabilidad. Por un lado, integra hardware y software de frontera: visión con deep learning, robótica ligera, protocolos robustos de comunicación, y modelos estadísticos avanzados. Por otro, se implementa con videos capturados en terreno con un teléfono, sensores de costo competitivo, y sistemas que pueden operar en entornos reales —polvo, sol, lluvia—. Es decir, es tecnología para el campo.

Hay, además, tres dimensiones de impacto que me parece importante subrayar:

- 1) **Productividad y gestión del riesgo.** La capacidad de estimar precozmente cuántos frutos se desarrollan, dónde y a qué ritmo, reduce la incertidumbre de planificación, permite asignar cuadrillas y logística con antelación y prioriza intervenciones de alto retorno.
- 2) **Sostenibilidad y resiliencia climática.** El modelamiento intra-predial del clima habilita decisiones que usan mejor cada metro cúbico de agua, cada aplicación de insumos y cada kilowatt·hora de energía. Homogeneizar madurez no es solo estética comercial; es también eficiencia:

menos pérdidas, menos mermas, menores emisiones y, sobre todo, mayor capacidad de adaptación a eventos extremos.

- 3) **Capital humano y democratización tecnológica.** En un contexto de menor disponibilidad de mano de obra rural, “Agricultura de Precisión” alivia tareas repetitivas, aumenta seguridad y cualifica el trabajo: formar a técnicos y profesionales para operar, interpretar y mejorar estos sistemas siembra capacidades que permanecen en la región y en la industria.

Importa también la proyección. Las mismas ideas —visión, sensorización, modelos— son transferibles a otros frutales de alto valor, como la palta. Si Chile lidera exportaciones, debe también liderar la inteligencia que las hace posibles: software local, cadenas de proveedores de hardware y servicios, y estándares de datos abiertos que permitan que cooperativas y productores medianos accedan a las mismas ventajas que grandes empresas. El proyecto premiado abre esa puerta y propone un camino concreto para recorrerla.

Señoras y señores, la ingeniería chilena ha demostrado —en minería, en energía, en puentes, y observatorios astronómicos— que sabe resolver problemas grandes con medios precisos. “Agricultura de Precisión” añade a esa lista la conversión de información en decisiones, y esas decisiones en valor económico, social y ambiental. Es un trabajo que honra la memoria de don Ramón Salas Edwards —ingeniero, matemático e investigador— porque traduce ciencia en tecnología y tecnología en progreso.

Quiero otorgar mis sinceras felicitaciones a Rodrigo Verschae, Cristóbal Quiñinao, Luis Cossio y Jaime Varas y a las instituciones y equipos que los respaldan por este merecido premio e importante aporte a nuestra sociedad.

Muchas gracias.

(Aplausos).

Don Juan Carlos Barros, hace entrega de los Diplomas y Medalla a los Sres. Verschae, Quiñinao, Cossio y Varas.

Acto seguido, don Rodrigo Verschae, en nombre de todos los autores, da unas palabras de agradecimientos en los siguientes términos.

Sr. Rodrigo Verschae.

—Estimado Juan Carlos Barros, Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, Estimada Paula Irles, Vicerrectora de Investigación y Posgrado de la Universidad de O’Higgins; Señoras y señores directores; miembros del Consejo Consultivo; Autoridades académicas y del sector productivo; Colegas, familiares, amigas y amigos:

Muy buenos días.

Mi nombre es Rodrigo Verschae, soy Profesor Asociado de la Universidad de O’Higgins. En nombre del equipo aquí presente —Cristóbal Quiñinao, Luis Cossio, y Jaime Varas— quiero expresar nuestro más sincero agradecimiento por este reconocimiento del Instituto de Ingenieros de Chile. Recibir el premio “Al Desarrollo Científico Tecnológico Ramón Salas Edwards – Año 2025” es un honor profundo que nos llena de gran orgullo, pero también de gratitud y responsabilidad.

Este premio distingue un trabajo que refleja lo que creemos esencial en la ingeniería chilena: la unión entre ciencia, tecnología y territorio. Nuestro proyecto en “**Agricultura de Precisión**”, para la reducción del riesgo en la cadena de valor de la cereza, nació de la convicción de que el desarrollo basado en ingeniería tiene mayor sentido cuando está al servicio problemas locales de relevancia e impacto, en este caso buscando medir y comprender con precisión y a nivel intra-predial, las variaciones climáticas y su impacto en el desarrollo fenológico en campos cerezas.

El proyecto es el resultado de la colaboración entre disciplinas, desde la inteligencia artificial y la visión computacional, hasta la agronomía y el modelamiento matemático, pero, sobre todo, es el fruto del trabajo conjunto con quienes hacen posible la producción de agrícola de nuestro país y al mismo tiempo buscan el cómo mejorar sus procesos e incorporar nuevas tecnologías.

Nuestro reconocimiento especial también a las instituciones que han apoyado y confiado en este trabajo. En particular, a la Universidad de O’Higgins, que ha sido un pilar fundamental en el impulso de la investigación y la innovación en la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins, y que nos ha permitido vincular la ciencia con el desarrollo regional.



Sr. Rodrigo Verschae, durante su discurso.

Quiero destacar que nuestro proyecto nace y se desarrolla íntegramente en una universidad pública y regional con menos de 10 años de existencia, institución con un fuerte compromiso, no sólo con la excelencia educacional, sino también con la investigación y desarrollo. En nuestro proyecto esto se refleja en resultados científicos tales como publicaciones en revistas de alto impacto, que validan su novedad y rigurosidad, en memorias título que aportan a la formación de nuevos ingenieros, y además en solicitudes de patente en curso y prototipos funcionales entregando información útil para la toma de decisiones en campos productivos de la región de O’Higgins.

Agradecemos profundamente a todas las personas que han sido parte de este camino. A los investigadores e ingenieros colaboradores y en particular a los estudiantes y miembros del Laboratorio de Robótica y Sistemas Inteligentes de la Universidad de O’Higgins, que han contribuido con su talento y esfuerzo en cada etapa del desarrollo; a todos quienes, con creatividad y perseverancia, transformaron ideas en prototipos, y prototipos en herramientas útiles. Sin su compromiso y dedicación nada de esto habría sido posible.

Queremos agradecer también a los **productores de cerezas**, y a las empresas que abrieron sus predios, compartieron su experiencia y nos permitieron probar, corregir y avanzar.



Sr. Rodrigo Verschae.



Sr. Cristóbal Quiñinao.



Sr. Luis Cossio.



Sr. Jaime Varas.

Ellos son, en realidad, los verdaderos socios y beneficiarios de este esfuerzo. Su visión y apertura han sido esenciales para validar esta tecnología que busca no solo mejorar la productividad, sino también transformar la forma en que se toman decisiones que mejoran producción y reducen los riesgos de la cadena de valor.

Así mismo, agradecemos a todas las instituciones, nacionales e internacionales, universidades y centros de investigación con los que hemos colaborado, y a las agencias y programas públicos que han creído en la importancia de construir capacidades de investigación y tecnológicas locales.

En particular, y también de gran importancia, agradecernos al Gobierno regional de O’Higgins, por el apoyo a través

de proyectos Fondo de Innovación para la Competitividad Regional, “FIC”, que han sido claves para la ejecución de las actividades de investigación, desarrollo y transferencia con foco regional y de impacto nacional.

Finalmente, no podemos dejar de agradecer especialmente a nuestras familias por su continuo e importante apoyo, sin el cual este reconocimiento habría sido posible.

La Agricultura de Precisión que promovemos busca enfrentar, con herramientas desde la Ingeniería, los desafíos del cambio climático y la variabilidad productiva, con datos, modelos y automatización, con sistemas de bajo costo y por lo mismo, sin perder de vista que detrás de cada algoritmo y cada sensor algún productor y una industria se beneficiará



De izquierda a derecha, los Sres. Jaime Varas, Juan Carlos Barros, Rodrigo Verschae, Cristóbal Quiñinao, Leonardo Bronfman y Luis Cossio.

de esos resultados. De esta forma, queremos contribuir a una agricultura más eficiente, más sustentable y justa, donde la tecnología sea una herramienta para fortalecer la resiliencia de las personas y los territorios.

Recibir el Premio Ramón Salas Edwards nos honra porque representa una tradición que valora la ciencia puesta en acción, la ingeniería con propósito y la innovación con impacto. A nombre de todo el equipo, reitero nuestro agradecimiento al Instituto de Ingenieros de Chile, a las instituciones que nos acompañan, a nuestras familias, y a todos quienes han sido parte de este desarrollo.

Recibimos este premio como un estímulo para seguir avanzando, investigando y colaborando. Que este reconocimiento sea también una invitación a continuar fortaleciendo la ingeniería chilena como motor de desarrollo, sostenibilidad e inclusión.

Muchas gracias.

(Aplausos).

Fin de la ceremonia.

PREMIOS A LOS INGENIEROS E INGENIERAS RECIÉN EGRESADOS DE INGENIERÍA CIVIL - AÑO 2025



Galardonados y Autoridades del Instituto de Ingenieros y de cada Casa de Estudios.

El viernes 10 de octubre de 2025, en el Salón de Honor del Instituto de Ingenieros de Chile, tuvo lugar la ceremonia de entrega de los premios “MARCOS ORREGO PUELMA”, “ISMAEL VALDÉS VALDÉS” y “ROBERTO OVALLE AGUIRRE” – Año 2025.

Don Juan Carlos Barros, presidente del Instituto de Ingenieros, inició este acto solemne con una breve y significativa alocución en la que destacó el fundamento de cada premio.

El Presidente.

—Estimados Decanos y Representantes de las Facultades de Ingeniería que nos acompañan el día de hoy. Distinguidos premiados, familiares de los galardonados, señoras y señores:

Me es muy grato dar a ustedes la más cordial bienvenida a la ceremonia que hoy nos reúne, y que es doblemente significativa para nuestra Institución.

En efecto, por un lado, el Instituto de Ingenieros de Chile, por medio de las distinciones que hoy entrega, honra la memoria de prestigiosos Ingenieros cuyos nombres invocamos en estos galardones y, por otra parte, rendimos un merecido homenaje a los Ingenieros Civiles más destacados que han egresado de nuestras Universidades.

Antes de hacer una breve referencia sobre quienes fueron los señores Marcos Orrego, Ismael Valdés y Roberto Ovalle, permítanme contarles brevemente sobre el procedimiento de selección de quienes hoy distinguiremos.

Cada año, el Instituto solicita a las respectivas Facultades o Escuelas de Ingeniería de las Universidades de las cuales son egresados nuestros premiados, proposiciones de no más de 5 candidatos, que consideren idóneos para cada uno de los premios señalados.

Con la proposición efectuada, el Instituto forma una Comisión integrada por uno o más miembros del Directorio y un miembro del Consejo Consultivo de nuestra Institución, que junto a los Decanos o académicos que cada Facultad designa en su representación, examina los antecedentes de los candidatos, los selecciona y efectúa la proposición al Directorio y al Consejo Consultivo de nuestra Corporación, que en sesión conjunta y solemne procede a discernir cada uno de los premios.

Los nombres y fundamentos de cada uno de los premios que hoy se otorgan son los siguientes:

Premio “MARCOS ORREGO PUELMA”

—Don Marcos Orrego Puelma nació en 1890 y falleció en 1933, fue un prestigioso Ingeniero egresado de la Universidad de Chile en 1916. En él se puede apreciar la amalgama más estrecha de honor, virtud, rectitud, esfuerzo

constante y digno, en una época marcada de vacilaciones y convencionalismos.

Destacó entre sus compañeros por su inteligencia, dedicación y desprendimiento y su gran espíritu de servicio, además de su carácter noble y justo, que lo llevó a representar a su curso como delegado ante la Federación de Estudiantes de Ingeniería.

Desempeñó importantes cargos en la Empresa de Ferrocarriles del Estado, en el Ministerio de Economía y posteriormente en la industria privada, siendo miembro del Directorio del Instituto desde 1921 hasta su fallecimiento en el año 1933.

Este Premio, que lleva su nombre, se instituyó en el año 1936, y se otorga cada año a los ingenieros que hayan tenido los mejores rendimientos en sus estudios, conforme a las normas propias de cada Universidad y según certificación oficial que ella misma realice. El rendimiento debe entenderse que corresponde al promedio de las calificaciones obtenidas durante el total de años o semestres de estudio e incluye la calificación del examen de titulación, si lo hubiera.

A su vez, deberá considerarse entre los atributos del o los postulados su colaboración tanto en actividades docentes como extracurriculares. Los postulantes se proponen de entre los Ingenieros egresados de la Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad de Concepción, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad de Santiago de Chile, Universidad Diego Portales, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y Universidad de los Andes, de la promoción del año inmediatamente anterior al del otorgamiento del premio.

Premio “ISMAEL VALDÉS VALDÉS”

—Don Ismael Valdés Valdés nació en 1859 y falleció en 1949, fue un prestigiado Ingeniero titulado en la Universidad de Chile en el año 1878.

De personalidad marcada por una inteligencia clara, servida por una vigorosa formación moral, tuvo pasión por el cumplimiento del deber, demostrando fuerza de ideales y capacidad de realizaciones, que sólo coexisten en los individuos predestinados a tomar parte activa en las grandes empresas de nuestro país.

Se distinguió por su dilatada y fructífera vida pública, en el campo político, gremial y filantrópico.

En el año 1927, el Instituto de Ingenieros de Chile le designó Miembro Honorario y más tarde, en 1938, le otorgó la Medalla de Oro, distinción con la que anualmente se honra a un ingeniero que es elegido entre los que se estima dignos de tal galardón por los servicios prestados al país en alguna de las múltiples actividades de la ingeniería.

El Premio Ismael Valdés Valdés fue instituido en el año 1953 y se otorga cada año a los Ingenieros egresados de las Universidades que he mencionado anteriormente, y se hayan distinguido simultáneamente por:

1. Las aptitudes para organizar y dirigir,
2. Las condiciones morales y,
3. La preparación técnica.

Premio “ROBERTO OVALLE AGUIRRE”

—Don Roberto Ovalle Aguirre nació en 1892 y falleció en 1974, se tituló de Ingeniero Civil en 1917 en la Universidad de Chile, fue uno de los más destacados y eficientes hombres de nuestro país. Poseedor de las condiciones necesarias para constituirse en jefe indiscutido: honradez, inteligencia vigorosa y rápida, conocimientos, gran carácter y justo sentido de la autoridad, tenía la virtud de imponer sus opiniones sin provocar reacciones desfavorables. Supo conciliar la severidad con la justicia, la comprensión y la bondad. Siempre comprendió que el más preciado elemento de que puede disponer una industria es el esfuerzo humano, por eso, no escatimó sacrificios para dar a sus trabajadores el mayor bienestar posible.

Propició y llevó a cabo numerosas iniciativas en favor de los trabajadores: a él se deben los Departamentos de Bienestar Social y la creación de poblaciones obreras. En este aspecto, dejó una lección de solidaridad humana, que tuvo el raro privilegio de ser reconocida por su personal mientras él actuaba.

El Premio “Roberto Ovalle Aguirre” fue instituido en el año 1949 y distingue a los Ingenieros egresados de las Universidades que ya hemos mencionado y se otorga cada

año al, o a los autores del mejor proyecto o memoria para obtener el título de Ingeniero Civil, que esté relacionado con la instalación o explotación de una industria relevante para el fomento de la economía nacional.

Antes de finalizar estas palabras, permítanme los premiados, en mi calidad de presidente del Instituto de Ingenieros, complementar la información que se les dio en la reunión a la que fueron invitados en septiembre recién pasado, en la que se les explicó brevemente la misión de nuestra Corporación.

La Institución que hoy los distingue, que cumple 137 años de existencia el próximo 28 de octubre, sigue vigente y desarrollándose con gran vitalidad. Sus miembros estamos empeñados en cumplir los postulados de nuestro acto fundacional, informando, en nuestro caso, a las nuevas generaciones de ingenieros acerca de los aspectos que distinguen al Instituto de cualquier otra entidad de este país.

Su esencia consiste en que aquellos ingenieros que ingresan como socios están conscientes de que esta es una entidad que tiene como característica fundamental: que sus socios hacen un aporte al desarrollo de la enseñanza de la ingeniería, a ella como disciplina y, como consecuencia de lo anterior, al desarrollo de nuestro país. Esta forma de colaboración, este voluntariado es el que ha adoptado el Instituto desde su creación y así lo han entendido sus asociados que han permanecido fieles a esta tradición.

En el contexto anotado, también debo mencionar a ustedes que el directorio de esta corporación acordó hace ya varios años, que los ingenieros agraciados con estos premios y que se sientan motivados por los fines que persigue el Instituto, si lo desean, puedan ingresar como miembros, sin necesidad de incurrir en el pago de la membresía por los primeros dos años de pertenencia.

Deseo expresar mis más sinceras felicitaciones a los Ingenieros que hoy serán distinguidos y a sus familias.

Muchas gracias.

Acto seguido, el presidente procedió a hacer entrega de los Diplomas y Medallas a los galardonados:



Premio “Marcos Orrego Puelma – Año 2025”.

Premio “MARCOS ORREGO PUELMA”

- Universidad de Chile: **Javier Esteban Maass Martínez**;
- Pontificia Universidad Católica de Chile: **Álvaro Ignacio Olivares Olivares**;
- Universidad de Concepción: **Cristóbal Adolfo Valdés Acevedo**;
- Universidad Técnica Federico Santa María: **Clemente Ferrer Vega**;
- Universidad de Santiago de Chile: **Israel Miguel Arias Panez**;
- Universidad Diego Portales: **Manuel Ignacio Pino Gutiérrez**;
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: **Andrea Licandeo Luco**; y
- Universidad de Los Andes: **Camila Alejandra Zumaeta Gómez**.

Premio “ISMAEL VALDÉS VALDÉS”

- Universidad de Chile: **Ricardo Sebastián Molina Ruiz**;
- Pontificia Universidad Católica de Chile: **Isa Paz Belén Oyarzo Céspedes**;
- Universidad de Concepción: **Camilo Alonso Ruiz Bucarey**;
- Universidad Técnica Federico Santa María: **Valentina Phak-Kim Yap Celedón**;
- Universidad de Santiago de Chile: **Sebastián Jesús Uribe Alarcón**;
- Universidad Diego Portales: **Felipe Amaru Condore Salinas**; y
- Universidad de Los Andes: **Francisca Alejandra Torres Valenzuela**.



Premio "Ismael Valdés Valdés – Año 2025".

Premio "ROBERTO OVALLE AGUIRRE"

- Universidad de Chile: **Isabella Boese Cortés**;
- Pontificia Universidad Católica de Chile: **Nicolás Ignacio Mendicoa Rosas**;
- Universidad Técnica Federico Santa María: **Cristóbal Antonio Beroíza Bastías**;
- Universidad de Santiago de Chile: **María de los Ángeles Sevillano Santos**;
- Universidad Diego Portales: **Rodrigo Francisco Miranda Caniu**; y
- Universidad de Los Andes: **Roberto Alfonso Vergara Cubillos**.

A continuación, la ingeniera Srta. Isa Paz Oyarzo Céspedes de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en representación de los premiados expresó sus agradecimientos, en los siguientes términos:

Srta. Isa Paz Belén Oyarzo.

—Estimado presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, don Juan Carlos Barros, autoridades presentes, familias, colegas y a todos los galardonados el día de hoy.

Recibir este reconocimiento es, sin duda, un honor inmenso. Agradezco al Instituto de Ingenieros de Chile, a nuestras universidades y a todos los presentes por reconocer el esfuerzo, la dedicación y los sueños que hay detrás de cada uno de nosotros.

Este reconocimiento llega en un momento en que muchos de nosotros estamos dando nuestros primeros pasos profesionales. Y creo que, más que un cierre, es un recordatorio de lo que nos une: las ganas de aportar, de aprender siempre y de usar nuestro conocimiento con propósito.



Premio “Roberto Ovalle Aguirre – Año 2025”.

Durante los años de formación, cada uno de nosotros siguió un camino distinto. Algunos eligieron la ingeniería civil tradicional, otros se especializaron en estructuras, hidráulica, transporte, minería, energía o computación. Algunos miraron hacia la academia, otros hacia la innovación, la sostenibilidad o la gestión. Y esa diversidad, de intereses, de talentos, de miradas es, en realidad, lo que da fuerza a la ingeniería.

Como dijo un referente de la innovación alguna vez: “*Las grandes cosas nunca las hace una sola persona, las hace un equipo de personas*”.

Y creo que lo mismo ocurre con la ingeniería. Nada de lo que construimos tiene sentido si no lo hacemos junto a otros: colegas, comunidades, mentores o quienes serán beneficiados por nuestro trabajo.

Esa colaboración y ese compromiso han sido fundamentales en muchos de los avances que ha vivido Chile en los últimos años.

La ingeniería ha estado presente en la reconstrucción tras los terremotos, en los proyectos que nos conectan a lo largo de un país extenso y diverso, en la infraestructura que resiste el clima y la geografía, en los sistemas que permiten llevar agua y energía a comunidades aisladas.

También ha sido clave en los grandes desafíos del presente: en la transición energética hacia fuentes renovables, en el desarrollo de nuevos combustibles, en la gestión del agua frente a la sequía, en la electromovilidad y en la innovación tecnológica que está transformando nuestras ciudades, nuestras industrias y nuestra forma de vivir.

Cada uno de esos logros tiene detrás equipos de ingenieras e ingenieros que no solo aplicaron conocimiento, sino que pensaron en el bien común, que entendieron que la técnica sin ética no basta, y que el progreso solo tiene sentido si mejora la vida de las personas y cuida los recursos que compartimos.

Ser ingeniero o ingeniera no es solamente dominar una técnica o resolver problemas, es tener la voluntad de aportar, de construir algo que trascienda. Nuestra generación tiene la oportunidad - y también la responsabilidad- de darle un nuevo sentido a la ingeniería: usar lo que aprendimos para mejorar la vida de las personas y cuidar el entorno que nos rodea.

Este reconocimiento no marca un final, sino el comienzo de una nueva etapa en la que debemos poner en práctica todo lo aprendido, con la misma curiosidad y compromiso que nos trajeron hasta aquí. Nos recuerda que la excelencia técnica solo cobra sentido cuando está al servicio de la sociedad. Que liderar no es tener respuestas para todo, sino atreverse a actuar con responsabilidad, incluso frente a la incertidumbre.

Agradezco profundamente a nuestras familias, a nuestros profesores y a todas las personas que nos acompañaron en este camino. Ellos son parte de este logro y también del futuro que queremos construir.

Y quiero cerrar con una idea que, creo, refleja el espíritu de todos los que hoy somos distinguidos: *la ingeniería, al final, es una manera de dejar las cosas un poco mejor de como las encontramos, para construir un mejor futuro.*



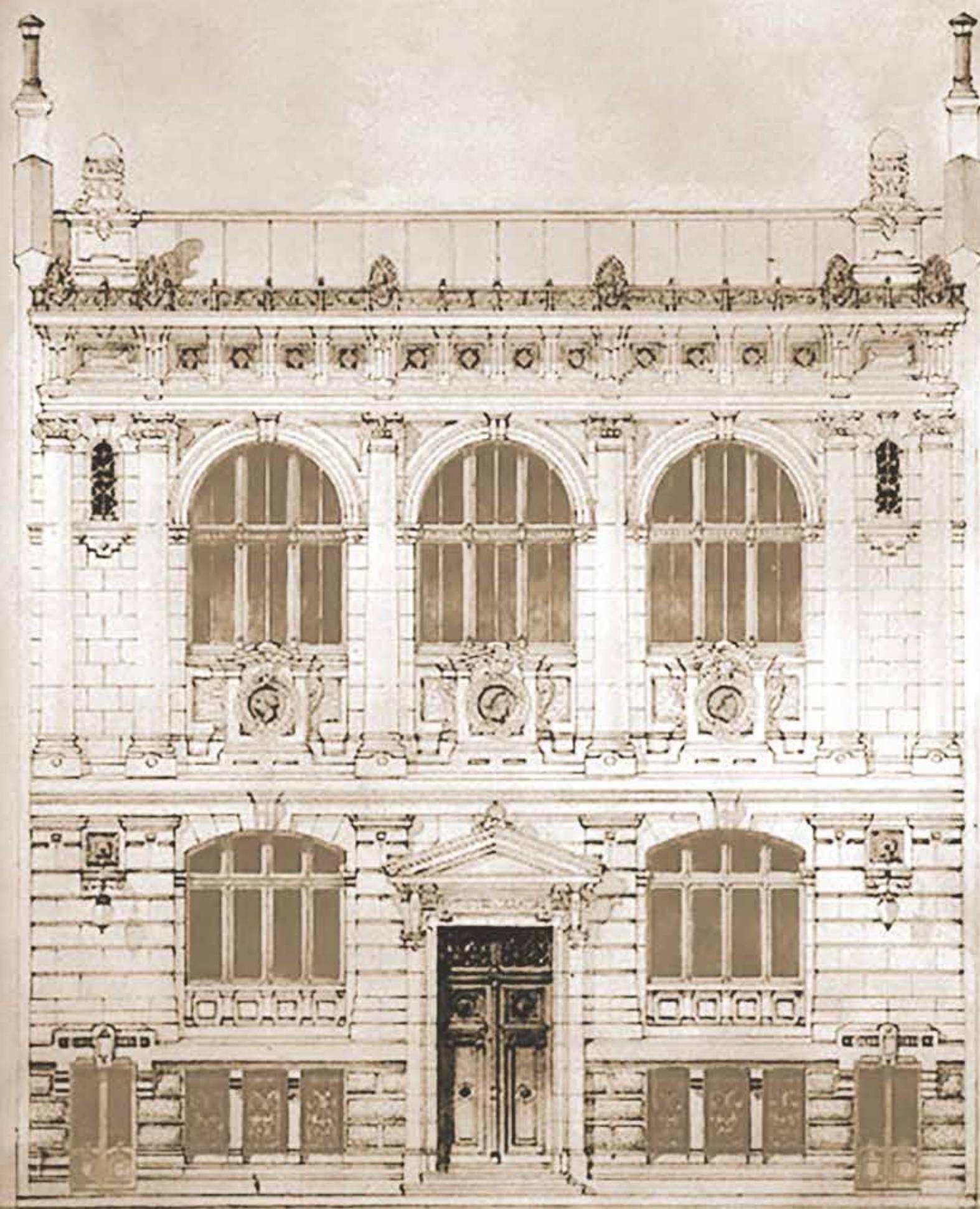
Srta. Isa Oyarzo durante su discurso.

Ese futuro necesita de ingenieras e ingenieros con conciencia, con compromiso y con la valentía de transformar.

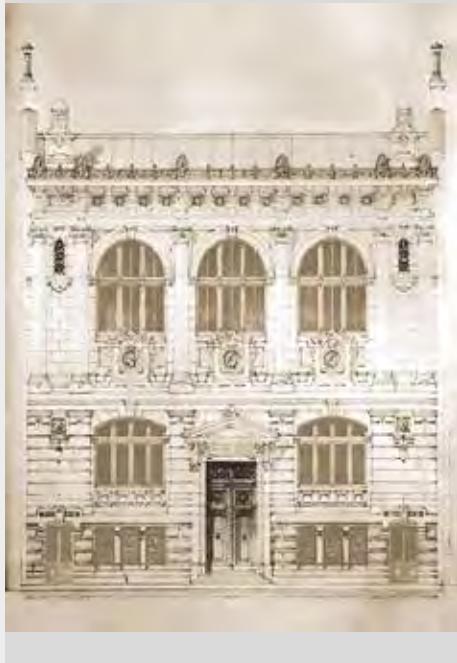
Muchas gracias.

(Aplausos).

Fin de la ceremonia.



RECONOCIMIENTO A NUESTROS SOCIOS



El Instituto de Ingenieros de Chile, lleva más de un siglo de constante presencia en el progreso de la Ingeniería chilena y en el análisis y debate de diferentes problemas públicos, en que los ingenieros chilenos colaboran desde su perspectiva en sus posibles soluciones. Esta colaboración se materializa en el seno de las Comisiones de Estudio y de las Sociedades Académicas miembros, en charlas y conferencias periódicas o en los foros y seminarios que se convocan para discutir desde distintos ángulos algún asunto de relevancia nacional. Los frutos de esta actividad se difunden por medio de sus publicaciones periódicas, como la Revista Chilena de Ingeniería y los Anales del Instituto de Ingenieros, y en libros e informes que dan cuenta de la labor efectuada por los miembros del Instituto y otros participantes en las actividades señaladas.

Para sustentar este quehacer, el Instituto mantiene una sede social y una infraestructura que le proporciona el apoyo técnico-administrativo y de servicios, lo que es financiado por sus miembros, ya sea mediante las cuotas sociales o aportes extraordinarios. El trabajo realizado durante estos largos años ha sido posible gracias al compromiso de sus asociados y a la contribución económica de sus socios activos y cooperadores. Por este motivo, se ha estimado necesario dejar constancia de quienes, en el período anterior, realizaron aportes pecuniarios, permitiendo así que el Instituto mantenga el respaldo necesario para el cumplimiento de sus objetivos.

A nuestros socios este especial reconocimiento.

Patricio Aceituno Gutiérrez

Hugo Acuña Sfrasani

Alejandra Acuña Villalobos

Luis Alarcón Cárdenas

José A. Aldunate Rivera

Raquel Alfaro Fernandois

Raúl Alvarez López

Iván Alvarez Valdés

Jorge Andaur Rodríguez

Carlos Andreani Luco

Rudolf Araneda Kauert

Igor Araus Wastavino

Jaime Arredondo Castillo

José Luis Arumí Ribera

Elías Arze Cyr

Katherine Ascencio Letelier

Mauricio Avendaño Guerra

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Daniel Barría Iroumé

Cristián Barrientos Gutiérrez

Juan Carlos Barros Monge

Raúl Becerra Valladares

Bruno Behn Theune

Carlos Benavides Farías

Sally Bendersky Schachner

Sebastián Bernstein Letelier

Sergio Bitar Chacra

Jorge Bravo Espinosa

Simón Bruna Gutiérrez

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Cannobbio Salas

Carlos Canto Ilabaca

J. Manuel Casanueva Préndez

Juan E. Castro Cannobbio

Carlos Castro Castro

Teodosio Cayo Araya

José Ceroni Díaz

Luciano Claude Yávar

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Gastón Concha Fariña

Ronald Contreras Córdova

Fernando Crespo Romero

Pablo Daud Miranda

Cristian Dawson García

José de Gregorio Rebeco

Juan Pablo de la Carrera Paulsen

Fernando de Mayo Israel

Raúl Demangel Castro

José Domínguez Lira

Esteban Domic Mihovilovic

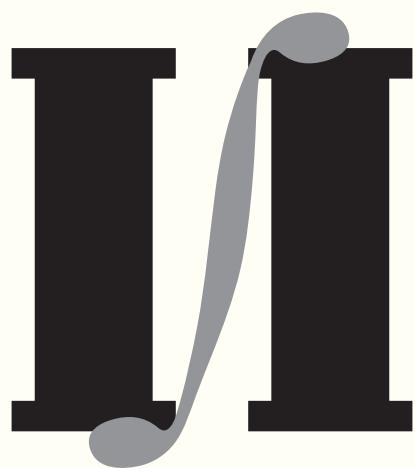
Ariel Domínguez Salazar

Carlos Espinosa Godoy

Fernando Echeverría Acuña

Gustavo Estay Caballero	Julio Lira Ramírez	Francisco Rayo Calderón
Javier Etcheberry Celhay	Alejandro López Alvarado	Juan Rayo Prieto
Rodrigo Fernández Aguilera	Luis Madrid Morales	Osvaldo Richards Abans
Sebastián Fingerhuth Massmann	Nicolás Majluf Sapag	Lucio Ricke Gebauer
Álvaro Fischer Abeliuk	Raúl Manásevich Tolosa	Miguel Ropert Dokmanovic
Martín Fuenzalida Domínguez	Jorge Mardones Acevedo	Eduardo Rubio Álvarez
Roberto Fuenzalida González	Carlos Medel Vera	Guillermo Ruiz Troncoso
Javier García Monge	Fernando Mendoza Pons	Felipe Sabando del Castillo
Enrique Garrido Navarro	Carlos Mercado Herreros	Marta Salazar Becerra
Alex Gildemeister Burgos	Viviana Meruane Naranjo	Hernán Salazar Zencovich
Jorge Gironás León	Germán Millán Pérez (†)	Jaime Sánchez Haverbeck
Arturo Goldsack Jarpa	Germán Millán Valdés	Gustavo Sandoval Sepúlveda
Rodrigo Gómez Álvarez	Ricardo Mohr Rioseco	Eduardo Santos Muñoz
Myriam Gómez Inostroza	Oscar Molinos Oyanedel	Rodolfo Saragoni Huerta
Ricardo González Cortés	José Moya Cancino	Cristóbal Sarmiento Laurel
Edgardo González Lizama	Luis Moyano Ojeda	Mauricio Sarrazin Arellano
Guillermo González Rees	Marcela Munizaga Muñoz	Jaime Solari Saavedra
Sergio González Venti	Claudio Muñoz Zúñiga	Alejandro Steiner Tichauer
Mauro Grossi Pasche	Juan Music Tomicic	Jorge Sturms Forestier
Tomás Guendelman Bedrack	Ricardo Nanjarí Román	Aldo Tamburrino Tavantzis
Mario Guendelman Bedrak	Luis Nario Matus	Carla Tapia Guerrero
Hernán Guerrero Guerrero	Ricardo Nicolau del Roure G.	Raúl Tejeda Sanhueza
Sergio Gutiérrez Cid	Christian Nicolai Orellana	Pedro Toledo Correa
José Antonio Guzmán Matta	Lionel Olavarría Leyton	Alberto Trigueros Baratta
Gloria Henríquez Díaz	José Orlandini Robert	Raúl Uribe Sawada
Cristian Hermansen Rebolledo	Ricardo Ortega Klose	Mario Urrutia Yáñez
Diego Hernández Cabrera	Carolina Pacheco Vega	Perla Valdés Calquín
Erwin Hoehmann Frerk	Verónica Patiño Sánchez	Luis Valenzuela Palomo
Jaime Illanes Piedrabuena	Mario Pavón Robinson	Cristián Vargas Araya
Pedro Inojosa Bañados	Jorge Pedrals Guerrero	Ximena Vargas Mesa
Álvaro Izquierdo Wachholtz	Francisca Pedrasa Pizarro	Scarlett Vásquez Paulus
Jerko Juretić Díaz	José Peña Méndez	Gladys Vidal Sáez
Carlos Kubik Castro	Humberto Peña Torrealba	Andrés Weintraub Pohorille
Mario Kuflik Derman	Rodrigo Pérez Tobar	Cristián Weissmann Marcuson
Juan Carlos Latorre Carmona	Víctor Pérez Vera	Francisco Wittwer Opiz
Alfonso Lavanchy Needham	Mariano Pola Matte	Jorge Yutronic Fernández
Jaime Lea-Plaza Edwards	Alejandro Polanco Carrasco	Luis Zaviezo Schwartzman
José M. Leonvendagar Hurtado	Daniela Pollak Aguiló	
Marcos Lima Aravena	Eric Prenzel Leupolt	

ISSN 0716 - 2340



**ANALES
DEL INSTITUTO
DE INGENIEROS DE CHILE**

Vol. 137, N° 3 - DICIEMBRE 2025

“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 continente de ideas útiles”.

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

Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 137, N° 3, diciembre de 2025

Contenido

CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS DE LLUVIA SOBRE NIEVE EN LA CUENCA DEL RÍO LONGAVÍ: TENDENCIA HISTÓRICA Y PROYECCIONES CON CAMBIO CLIMÁTICO.

Pág. 83

Javiera Bustamante y James McPhee.

EVOLUCIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DEL ACUÍFERO MAIPO-MAPOCHO BAJO PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO.

Pág. 96

Melissa Vargas, Marcelo Olivares, Carlos Poblete, James McPhee y Carlos Espinoza.

PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE SITIO MEDIANTE MODELOS DE MACHINE LEARNING.

Pág. 110

Roberto Vergara, Jawad Fayaz y Rodrigo Astroza.

Editora

Ximena Vargas Mesa, Directora del 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

Rubén Boroschek K., Académico del Departamento de Ingeniería Civil de la FCFM de la Universidad de Chile.

Tomás Guendelman B., Sociedad Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA)

Daniela Pollak A., Sociedad Chilena de Geotecnica (SOCHIGE)

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.

CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS DE LLUVIA SOBRE NIEVE EN LA CUENCA DEL RÍO LONGAVÍ: TENDENCIA HISTÓRICA Y PROYECCIONES CON CAMBIO CLIMÁTICO

RAIN-ON-SNOW EVENTS ON THE LONGAVÍ RIVER CATCHMENT: HISTORICAL BEHAVIOR AND PROJECTIONS UNDER CLIMATE CHANGE

Javiera Bustamante¹, James McPhee^{1,2}

RESUMEN

Este trabajo caracteriza la frecuencia de eventos de lluvia sobre nieve (ROS) en la cuenca del río Longaví en La Quiriquina durante el período histórico (1980–2014) y dos períodos futuros (2040–2069 y 2070–2099), evaluando la estacionalidad e influencia en los caudales máximos anuales de este tipo de fenómenos. Se utiliza el modelo hidrológico CRHM, alimentado con datos climáticos de ERA5-Land corregidos con CR2Met y proyecciones de seis modelos del CMIP6 bajo el escenario SSP5-8.5, para estimar el equivalente en agua nieve (EAN) y caudal. Los eventos ROS se asocian a un 52,9% de los máximos caudales medios diarios en el período histórico, para los períodos futuros cercano y lejano se proyecta una disminución de esta proporción a 41% y 37%, respectivamente, aunque se asocian a caudales de menor probabilidad de excedencia, situándose en el rango de 60% y 1% de probabilidad de excedencia. Asimismo, para el período futuro cercano se proyecta un aumento en la magnitud del caudal asociado a períodos de retorno mayores a 25 años en comparación con el período histórico. Finalmente, se proyecta una disminución en la frecuencia de los eventos ROS hacia el futuro, especialmente en elevaciones bajas y medias, manteniendo su estacionalidad entre los meses de junio y agosto.

ABSTRACT

This study characterizes the frequency of rain-on-snow (ROS) events in the “río Longaví en la Quiriquina” basin, during the historical period (1980–2014) and two future periods (2040–2069 and 2070–2099), evaluating the seasonality and influence of these phenomena on annual maximum streamflows. The hydrological model CRHM is used, driven by ERA5-Land climate data corrected with CR2Met and projections from six CMIP6 models under the SSP5-8.5 scenario, to estimate snow water equivalent (SWE) and streamflow. ROS events are associated with 52.9% of the maximum daily mean streamflows during the historical period. For the near and far future periods, a decrease in this proportion to 41% and 37%, respectively, is projected, although these events are linked to streamflows with lower exceedance probabilities, ranging from 60% to 1%. Additionally, for the near future period, an increase in streamflow magnitude associated with return periods greater than 25 years is projected compared to the historical period. Finally, a decrease in the frequency of ROS events is projected toward the future, particularly at low and mid elevations, while maintaining their seasonality between June and August.

¹Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile, Santiago Chile.

²Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago Chile.

I. Introducción

Los eventos de lluvia sobre nieve (ROS, por sus siglas en inglés) corresponden a eventos en los que precipita de forma líquida sobre el manto nival. Este fenómeno puede generar deslizamiento de tierra y/o avalanchas (Borga et al., 2014; Stoffel et al., 2014), aumentos en los caudales de hasta un 200% (Musselman et al., 2018) y en algunas zonas, han ocasionado las máximas crecidas históricas. Estos se producen durante tormentas con mayor elevación en el nivel de congelamiento, que se asocian tanto a tendencias en las temperaturas como a ríos atmosféricos zonales (ZAR), que inciden perpendicularmente a barreras topográficas (Garreaud et al., 2024).

En Chile se han estudiado tendencias en el periodo 1979-2017, determinándose aumentos en la intensidad de las precipitaciones extremas en el otoño entre las latitudes 25°S y 30°S, precipitaciones máximas diarias menos intensas para el sector Centro-Sur y tendencias al aumento de la temperatura en invierno, lo que puede generar aumento de la escorrentía, menor acumulación de nieve para los meses cálidos y aumento del área pluvial (Lagos-Zúñiga et al., 2024).

Se han realizado estudios de los eventos ROS en el hemisferio norte, principalmente en los Alpes (Beniston & Stoffel, 2016) y en Estados Unidos (Ali et al., 2024; Musselman et al., 2018; Rhoades et al., 2024). Para los Alpes se proyecta un aumento del 40% en la frecuencia de ROS en altitudes bajas y 200% en altitudes altas ante aumentos de temperatura (Beniston & Stoffel, 2016) mientras que para el oeste de Estados Unidos, se proyecta que, en escenarios cálidos (RCP 8,5), los eventos ROS serán menos frecuentes en elevaciones bajas y más frecuentes en elevaciones medias (Musselman et al., 2018). Por otra parte, López-Moreno et al. (2021) analizaron el comportamiento futuro de cuencas virtuales sometidas a distintos climas de alta montaña, determinando una disminución de los ROS en elevaciones bajas y un aumento en los caudales máximos asociados al aplicar aumentos de temperatura.

En Chile Central, Glassner (2022) analizó este fenómeno para el periodo 2000-2022, determinando que la mínima frecuencia anual de ROS ocurre en la cuenca del río Aconcagua, con 1,6 eventos, mientras que la máxima ocurre en la cuenca del río Ñuble con 19,6 eventos. También estableció que, para las

cuenca al sur del Maipo, el fenómeno ocurre en más del 50% de las grandes crecidas. Adicionalmente, Coumerme (2021) realizó una caracterización de eventos ROS considerando cambio climático a través del modelo CCSM4 del CMIP5 en el escenario RCP 8.5 para el periodo 2030-2060, para la parte alta del río Maipo, comparándolo con el periodo histórico 1979-2005. En dicho estudio determinó que los eventos ROS aumentarían de 2,5 a 4 eventos por año, junto a un aumento de estos eventos entre los 3000 a 5000 [m s.n.m].

El 23 de junio de 2023 un evento ROS, medido en la estación Nevados de Longaví (Garreaud, 2023), generó aumentos de caudal de 22 a 2600 m³/s en el “Río Achibueno en la Recova” y de 412 a 16300 m³/s en “Río Maule en Forel”, por lo que surge la necesidad de continuar estudiando cómo los eventos de lluvia sobre nieve afectan a las crecidas en regiones montañosas y determinar cómo los cambios en las condiciones climáticas y atmosféricas afectan la frecuencia de los eventos ROS (Beniston & Stoffel, 2016; Rhoades et al., 2024). En consecuencia, este trabajo busca caracterizar la frecuencia de los eventos ROS en la cuenca del río Longaví en la Quiriquina, región del Maule, determinar si existe una tendencia en las series anuales de eventos ROS, así como la estacionalidad de los eventos y su influencia en la serie anual de caudales máximos medios diarios.

Para lograr este objetivo se requiere conocer la variación del caudal y equivalente en agua nieve (EAN) en periodos de tiempo cortos, por lo que es necesario el uso de un modelo hidrológico. En este caso se utiliza el modelo CRHM (Cold Regions Hydrological Model), que es un modelo de base física, con buen desempeño en la simulación de cuencas con mantos de nieve y glaciares (Pomeroy et al., 2007). Para la simulación hidrológica de la cuenca se utilizan datos de entrada de ERA5-Land. Además, se analiza la capacidad para caracterizar eventos ROS pasados y futuros combinando simulación hidrológica y aquellos modelos climáticos del CMIP6 bajo el escenario SSP5-8.5 seleccionados por su buen desempeño en el periodo histórico por Gateño et al. (2024) y que se encuentran en la base de datos de Vásquez & Mendoza (2024).

II. Zona de Estudio

La cuenca de estudio está delimitada por la estación fluviométrica “Río Longaví en la Quiriquina” de la DGA (Figura 1), la cual se ubica en la región del Maule, Chile. Su área es de 668,5 km², con un rango de elevación entre 446 [m s.n.m] y 3200 [m s.n.m]. La pendiente media es igual a 48,4%, y su cobertura de suelo es principalmente de bosque (45,4%), matorrales (34,7%) y tierra desnuda (8,5%) (Zhao et al., 2016).

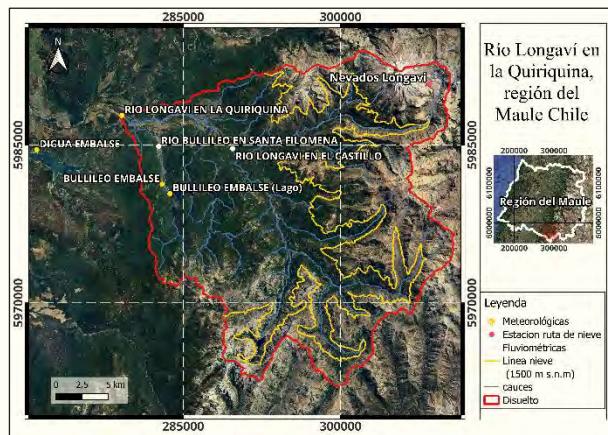


Figura 1: Delimitación cuenca Río Longaví en la Quiriquina

La cuenca contiene estaciones meteorológicas, fluviométricas y una ruta de nieve, según se presenta en la Tabla 1. Posee principalmente un clima mediterráneo de lluvia invernal (Sarricolea et al., 2017), con un régimen hidrológico pluvio-nival con precipitación media anual de 1260 mm y temperatura media anual de 12°C (Figura 2).

III. Metodología

1. Obtención de forzantes meteorológicas

Las series horarias de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento correspondientes al periodo histórico (1980-2014) se obtuvieron de ERA5-Land (0,1° x 0,1° de resolución espacial). Se aplicaron correcciones a la precipitación y temperatura diarias utilizando el producto grillado CR2Metv2.5 (Boisier, 2023), que tiene una resolución horizontal de 0,05°x0,05° (latitud, longitud). Para la corrección se realizó un escalamiento a nivel diario, mediante el método bilineal, y se corrigió el sesgo utilizando la función MBCn propuesta por Cannon (2018), aplicando factores mensuales de corrección. La resolución

espacial de los campos resultantes es la misma de CR2Metv2.5.

Tabla 1: Estaciones de medición presentes en la cuenca y cercanas

Tipo	COD	Nombre	Coordinada	Inicio
Meteorológicas	07350 007-9	Bullileo Embalse	283743; 5980396	1930
	07350 006-0	Bullileo Embalse (lago)	283005; 5981271	2012
	07350 001-K	Río Longaví en la Quiriquina	279169; 5987809	2001
	07331 002-4	Digua Embalse	271043; 5984556	1947
	07350 003-6	Río Longaví en el Castillo	289769; 5984499	1964
Fluviométricas	07350 002-8	Río Bullileo Santa Filomena	282660; 5984873	1926- 1984- 2011
	07350 001-K	Río Longaví en la Quiriquina	279169; 5987809	1937
	07350 008-7	Nevados de Longaví	308467; 5990812	2015
Ruta de nieves				

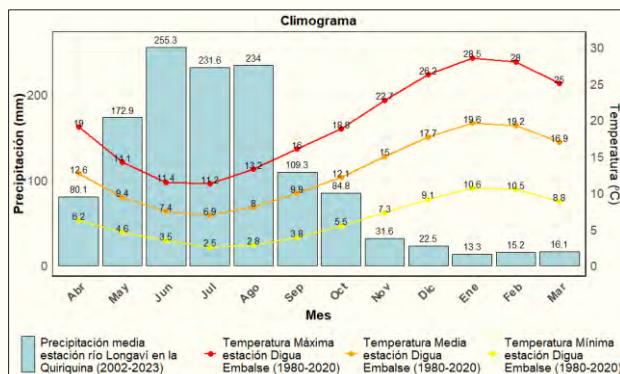


Figura 2: Climograma de zona de estudio

Todos los datos corregidos se ajustan a un paso de tiempo tri-horario. En el caso de velocidad del viento y humedad relativa, los datos de escala horaria se agrupan en intervalos tri-horarios. Para la precipitación, se determinó la distribución de precipitaciones cada tres horas de ERA5-Land, con lo cual se calcularon ponderadores asociados a las

horas en que se presenta la mayor parte de la precipitación de la tormenta. Estos ponderadores se presentan en la Tabla 2. En caso de la temperatura se utilizó una ecuación sinusoidal (Ec. 1), identificando que la máxima temperatura ocurre a las 13:00 horas durante el invierno y a las 15:00 horas en verano, por lo que se utilizaron frecuencias de distribución (ϕ) de 4,8 en invierno y 3,2 en verano.

Tabla 2: Distribución tri-horaria de precipitaciones adoptada

Hora	Verano	Invierno
3	0,05	0,03
6	0,09	0,07
9	0,1	0,09
12	0,1	0,1
15	0,12	0,13
18	0,14	0,15
21	0,18	0,19
0	0,22	0,23

$$T(t) = -\frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{14}(t + \phi)\right)(T_{max} - T_{min}) + \frac{1}{2}(T_{max} - T_{min}) \quad Ec. 1$$

Para las proyecciones climáticas se considera el periodo histórico 1980 a 2014, el periodo futuro cercano 2040 a 2069 y el periodo futuro lejano 2070 a 2099. Los datos de precipitación y temperatura para estos periodos se obtienen de los modelos climáticos (MCG) del CMIP6, bajo el escenario SSP5-8,5, seleccionando aquellos que presentan el mejor *Past Performance index* (PPI) para la zona Central de Chile, según lo indicado por Gateño et al. (2024) y que se encuentran en la base de datos de Vásquez & Mendoza (2024). Los MCG utilizados son los siguientes: CanESM5-gn, CMCC-ESM2-gn, EC-Earth3-Veg-LR-gr, GFDL-ESM4-gr1, IPSL-CM6A-LR-gr y MRI-ESM2-0gn. Los datos diarios de estos modelos se distribuyen a escala tri-horaria siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. En cuanto a los datos de velocidad del viento y humedad relativa, se utilizan los datos del periodo histórico para los periodos futuros,

utilizando análogos para asegurar la consistencia entre las distintas variables meteorológicas.

2. Modelación Hidrológica

Se utilizó el modelo hidrológico CRHM (Cold Regions Hydrological Model) para simular caudales tri-horarios. Este modelo ofrece una plataforma modular, flexible y orientada a objetos, basada en procesos físicos (Pomeroy et al., 2007). La cuenca se divide en 13 Unidades de respuesta agrupadas (URA), que congregan las unidades de respuesta hidrológica (URH) según orientación y elevación. Además, se considera para la agrupación un comportamiento pluvial en áreas por debajo de los 1500 [m s.n.m], de forma de llegar a la distribución que se presenta en la Figura 3. Esta discretización de la cuenca asegura que las zonas más proclives a presentar ROS queden representadas más detalladamente.

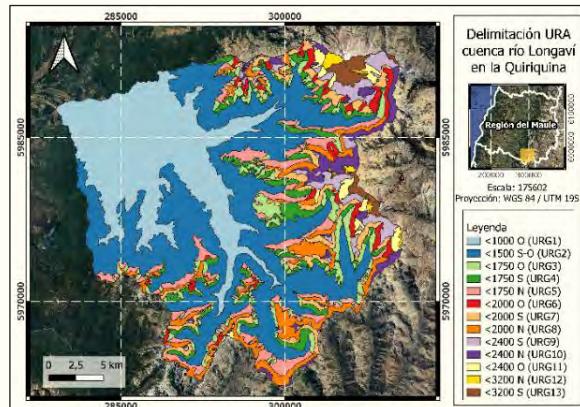


Figura 3: URH de la cuenca río Longaví en la Quiriquina

El modelo utiliza el conjunto de módulos de la Figura 4, los cuales requieren parámetros específicos para cada URH. Dado que CRHM es un modelo de base física, gran parte de estos parámetros se basan en el conocimiento de la cuenca, información de SIG, análisis de sensores, estudios de suelo, DEM y valores derivados de estudios en cuencas con condiciones hidroclimáticas similares (Pomeroy et al., 2022). Sin embargo, los parámetros requieren de un proceso de calibración.

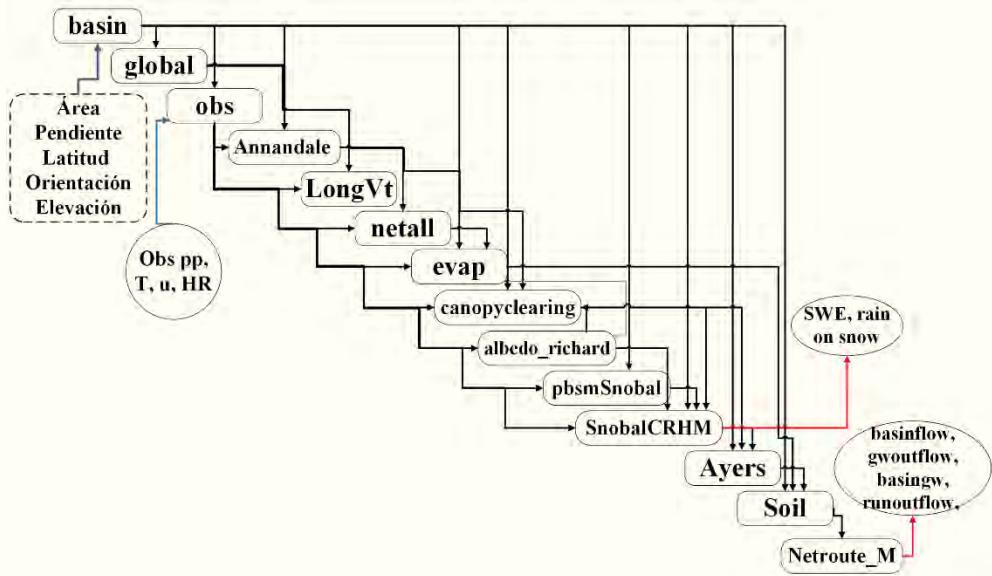


Figura 4: Módulos Modelo CRHM

Para evaluar el modelo, se utilizan los índices de desempeño KGE (Ec 2) y NSE (Ec 3). En la calibración de caudal y EAN, se busca maximizar el valor del KGE, dado que este índice otorga igual peso a la correlación, sesgo y la variabilidad (Gupta et al., 2009).

Además del análisis anterior, se realiza una comparación del caudal estacional, que corresponde al promedio mensual en el periodo 1980-2014, para identificar si el modelo lo representa y se realiza el análisis de las curvas de duración para el periodo completo a través de las métricas de diagnóstico propuestas por Yilmaz et al. (2008) para identificar sesgo. Estas métricas incluyen el BiasFMS, que representa el porcentaje de sesgo en la pendiente del segmento medio (entre 0,2 y 0,7), el BiasFHV, que representa el porcentaje de sesgo en la pendiente del segmento alto, el BiasFLV, que mide porcentaje de sesgo en la pendiente del segmento bajo, y finalmente, el BiasFMMlog, que evalúa el porcentaje de sesgo utilizando la mediana de los valores observados y simulados.

$$KGE = \sqrt{((r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2)}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_0} \quad Ec\ 2$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_0}$$

Donde:

r : coeficiente de correlación de Pearson

σ_s : Desviación estándar datos simulados

σ_0 : Desviación estándar datos observados

μ_s : Media de los datos simulados

μ_0 : Media de los datos observados

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (x_{s,t} - x_{0,t})^2}{\sum_{t=1}^n (x_{0,t} - \mu_0)^2} \quad Ec\ 3$$

Donde:

$x_{s,t}$: valor simulado en el tiempo t

$x_{0,t}$: valor observado en el tiempo t

μ_0 : media de los valores observados

3. Caracterización de eventos ROS

La ocurrencia de eventos ROS requiere que ocurra precipitación líquida sobre terreno cubierto con nieve. Para diagnosticar la presencia de nieve, la magnitud de equivalente en agua y la fase de la precipitación se utiliza el modelo CRHM. Se acepta que ocurre un evento ROS cuando se cumple que la precipitación diaria mínima es de 10 mm, un EAN diario mínimo de 10 mm, y que la variable "Rain on Snow" que entrega el modelo sea mayor a 0 mm. Además, se requiere que la acumulación diaria de "SWE_change" negativo (derretimiento) sea menor a cero.

4. Análisis de Frecuencia de eventos ROS

Una vez realizada la caracterización de los eventos ROS por año hidrológico, se extraen las fechas de los eventos detectados, clasificados según diferentes rangos de elevación: 1000 a 1500 [m s.n.m], 1500 a 1750 [m s.n.m], 1750 a 2000 [m s.n.m], 2000 a 2400 [m s.n.m] y 2400 a 3200 [m s.n.m]. Estos eventos se analizan de dos formas: la primera consiste en determinar el número de eventos por año, generando una serie de valores anuales para cada rango de elevación y determinando su frecuencia anual promedio. A estas series también se les realiza un análisis de tendencia mediante el test de Mann-Kendall (Mann, 1945) y el cálculo de la pendiente Sen (Sen, 1968). En segundo lugar, se caracteriza la estacionalidad de los eventos, determinando el mes del año en que es más frecuente la ocurrencia de eventos ROS. Para ellos, se calcula el total de eventos para cada mes dentro del periodo de estudio. Este análisis también se realiza para cada rango de elevación.

5. Contribución de ROS a caudales máximos

Se construyó la serie anual de máximos caudales medios diarios simulados, y se identificó cuáles de estos eventos están asociados a ROS. Para ello, primero se extraen los caudales asociados a las fechas de los eventos ROS identificados para cada banda de elevación, luego se agrupan las elevaciones que correspondan a la misma fecha (es decir, el mismo evento) y se determina el máximo caudal medio diario para cada evento y año. De esta forma, se obtiene la serie anual de máximos caudales medios diarios asociados a eventos ROS por año hidrológico (un valor por año).

A partir de las series anteriores, se determina el número eventos en que el caudal máximo diario anual estuvo asociado a un evento ROS. Además, se realiza un análisis de frecuencia de la serie anual de caudales medios diarios máximos, para identificar la posición de los caudales asociados a eventos ROS en el espacio de probabilidad. Para ello, se ajustan funciones de densidad de frecuencia (Pearson, Log-Pearson, Normal, Log-Normal o Gumbel), y se selecciona la de mejor ajuste. A partir de lo anterior se determinan los caudales asociados a probabilidades de excedencia de 10%, 25%, 50%, 85% y 90%.

El análisis anterior se realizó forzando el modelo hidrológico con datos de ERA5-Land corregidos en el periodo histórico de referencia, y con datos de los MCG para el periodo histórico y para los períodos futuros.

IV. Resultados y Discusión

1. Calibración Modelo

Para la calibración de los parámetros de Caudal y EAN (Tabla 3) se maximizó el valor de KGE, por lo que esta métrica presenta mejor desempeño. En la Figura 5 se presentan tres años dentro del periodo para observar el desempeño y en la Tabla 4 las métricas de desempeño para los periodos de calibración (1980-2014) y evaluación 2014-2023. Un KGE de 0,6 en la calibración y 0,58 en la evaluación se considera adecuado para la comparación de la escala diaria. Además, se observa en la Figura 5 que el modelo representa correctamente la ocurrencia de eventos de crecida, aunque la magnitud del caudal en los mayores eventos es subestimada.

Tabla 3: Valores parámetros calibrados para caudal y EAN

Módulo	Parámetro	Rango	Valor
Netroute M	ssrKstorage	0-200	47
	Soil gw K	-	5,3
	Gw max	0-5000	50
	Gw K	-	25
	Sd ssr K	-	25
Soil	Max_h2o_vol	0,0001-0,2	0,2
	Max_z_s_0	0-0,35	0,35
Snowbal-CRHM			

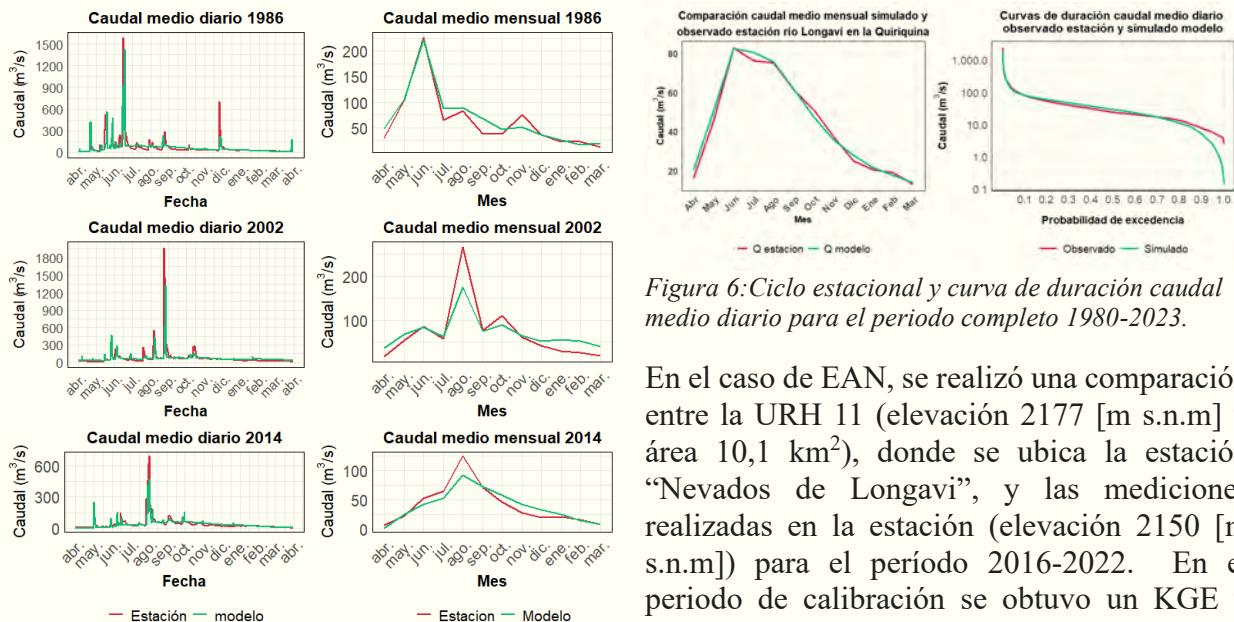


Figura 5: Comparación del caudal medio diario y caudal medio mensual en la cuenca del Río Longaví en la Quiriquina para distintos años.

Tabla 4: Métricas de desempeño caudal medio diario periodo calibración y evaluación

Métrica	Calibración	Evaluación
KGE	0,60	0,58
NSE	0,14	0,10
RMSE	67,9 m ³ /s	49,7 m ³ /s

Al comparar las curvas de duración en la Figura 6, se evidencia un comportamiento similar para las probabilidades de excedencia inferiores al 70%, lo que sugiere una representación adecuada de los caudales medios y altos. Esta afirmación es respaldada por los resultados de las métricas BiasFMM y BiasFHV, que presentan valores cercanos a cero con un 3,8% y 6,1%, respectivamente, y que se asocian con la parte superior e intermedia de la curva de duración. En contraste, BiasFLV presenta un valor de -12,1%, lo que indica una subestimación de los valores bajos de caudal. Por último, el sesgo asociado a los valores de la mediana del periodo corresponde a un 7,73%, lo cual es un valor razonable dado lo anterior. En conclusión, el modelo representa adecuadamente la estacionalidad de los caudales, como se evidencia en la Figura 6.

Figura 6: Ciclo estacional y curva de duración caudal medio diario para el periodo completo 1980-2023.

En el caso de EAN, se realizó una comparación entre la URH 11 (elevación 2177 [m s.n.m] y área 10,1 km²), donde se ubica la estación “Nevados de Longaví”, y las mediciones realizadas en la estación (elevación 2150 [m s.n.m]) para el periodo 2016-2022. En el periodo de calibración se obtuvo un KGE y NSE de 0,6 y 0,76, respectivamente, mientras que en el periodo de validación se obtuvieron valores de 0,42 y 0,52, respectivamente. Por otra parte, de la Figura 7 se determina que la simulación conserva la estacionalidad en el periodo de derretimiento, pero no representa los valores máximos de la estación, tendiendo a subestimarlos. No obstante, se comparó la forzante con la observación de precipitación en la estación Longaví en la Quiriquina, presentando un buen desempeño, por lo que se considera que el modelo es capaz de representar adecuadamente el EAN.

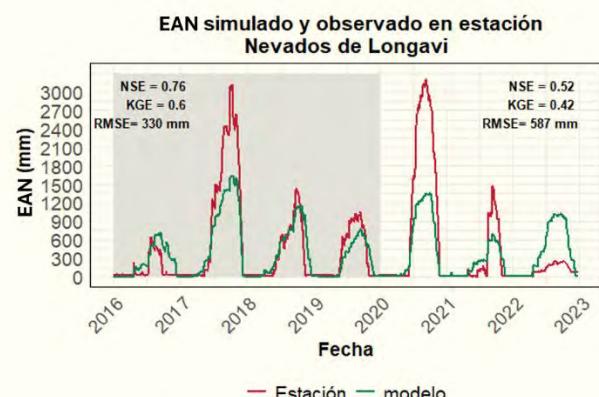


Figura 7: Comparación de EAN simulado y observado en la estación Nevados de Longaví. Periodo de calibración (gris) y validación (blanco).

2. Caracterización de eventos ROS

En el periodo histórico (1980-2023) analizado se aprecia una frecuencia anual de 5 eventos ROS en la elevación de 1000 a 1500 [m s.n.m], 24 eventos entre 1500 y 1750 [m s.n.m], 14 eventos entre 1750 y 2000 [m s.n.m], 14 eventos entre 2000 y 2400 [m s.n.m] y 11 eventos entre 2400 y 3200 [m s.n.m] (Figura 8), con mayor ocurrencia de eventos entre junio y agosto (Figura 9). De la aplicación del análisis de la pendiente Sen y el test de Mann-Kendall se identificó que estas series no presentan tendencias para el periodo histórico. Este comportamiento se mantiene para el modelo forzado con los MCG, que presentan una frecuencia anual de 7, 22, 18, 16 y 14 para cada elevación, por lo que sobreestiman en 2 a 4 eventos por año en el periodo y no presentan tendencia estadísticamente significativa, pero presentan menor dispersión en la frecuencia respecto a la simulación basada en el reanálisis.

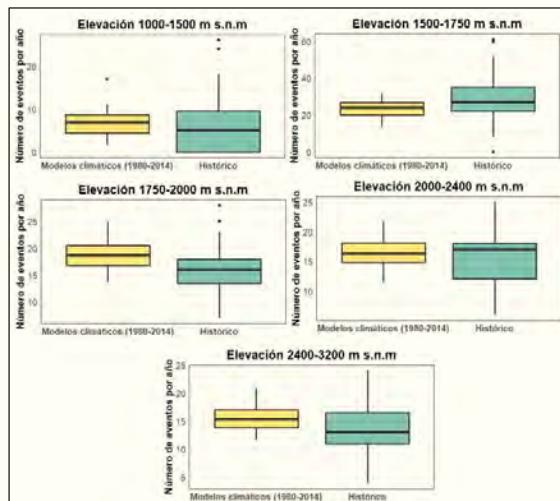


Figura 8: Boxplot de la frecuencia de eventos ROS por elevación simulados con base en forzantes de reanálisis y los MCG en periodo histórico de referencia.

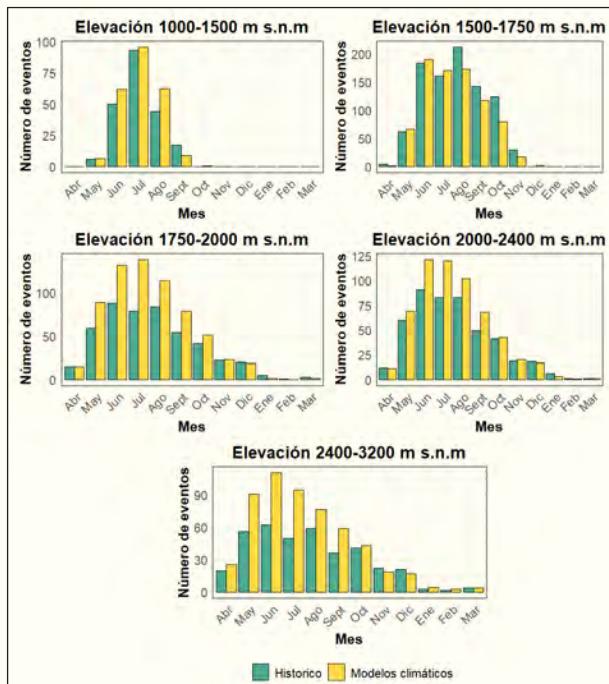


Figura 9: Estacionalidad de número de eventos ROS en periodo histórico simulados con base en forzantes de reanálisis y de los GCM

Los eventos ROS simulados a base de las forzantes del reanálisis en el periodo histórico presentan mayor ocurrencia entre junio y agosto (Figura 9), lo cual es replicado por las simulaciones con las forzantes de los MCG, aunque con una mayor concentración entre en dichos meses.

En los periodos 2040-2069 y 2070-2099 se observa una disminución de la frecuencia anual de eventos ROS simulados con las forzantes de los MCG para todas las elevaciones (Figura 10). En la banda de menor elevación, los eventos ROS prácticamente desaparecen en ambos períodos futuros. Del análisis de tendencia se determina que las elevaciones medias (1500 a 2000 [m s.n.m]) presentan tendencias decrecientes en ambos períodos, mientras que las elevaciones altas (2000-3200 [m s.n.m]) solo presentan tendencias decrecientes en el periodo futuro lejano. En cuanto a la estacionalidad, esta se mantiene con más eventos entre junio y agosto, aunque aumentando en proporción de agosto a octubre y disminuyendo de octubre a mayo (Figura 11).

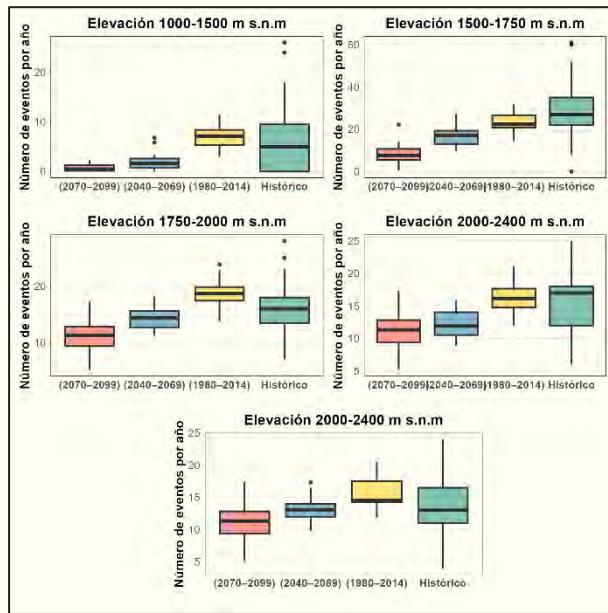


Figura 10: Boxplot de la frecuencia de eventos ROS por bandas de elevación en el periodo histórico y períodos futuros

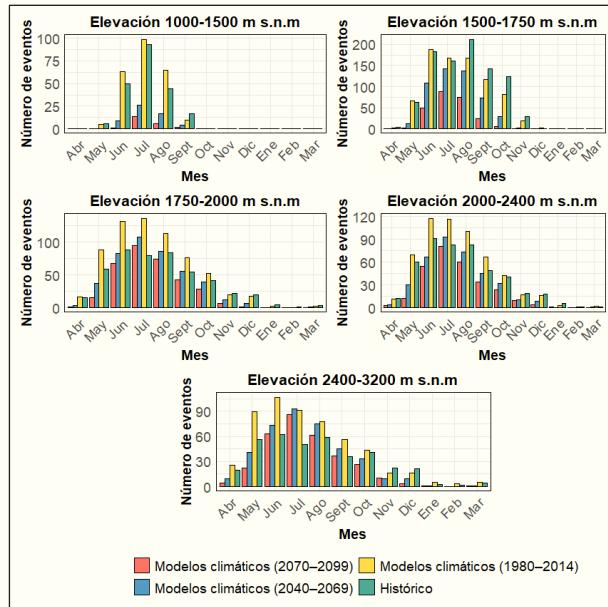


Figura 11: Estacionalidad de número de eventos ROS simulados con base en forzantes de reanálisis y de los GCM para todos los períodos.

Tanto en el periodo futuro cercano como lejano (Figura 11) la banda de elevación 1000-1500 [m s.n.m], presenta la mayor variación disminuyendo en número de eventos entre los períodos. Por otro lado, para las bandas 1500-1750 [m s.n.m] y 1750-2000 [m s.n.m], se observa una disminución de eventos en mayo y

un aumento en octubre y noviembre. Si bien ambos períodos presentan aumento en la ocurrencia de eventos entre octubre y noviembre, se preservan los meses de junio y agosto como los principales de generación de eventos ROS.

3. Análisis de Caudal

A continuación, se comparan las series de caudales diarios simuladas con reanálisis y con los MCG en los períodos histórico y futuros. Para el periodo histórico simulado con la reanálisis se evidencia que 18 de los 34 caudales máximos diarios (53%) de ellos se pueden atribuir a eventos ROS (Figura 12). Estos se producen mayoritariamente en la banda de elevación 1500 a 1750 [m s.n.m] (Tabla 5). Del análisis de frecuencia de estos eventos se determina que se distribuyen a lo largo de todas las probabilidades, con mayor concentración entre el 20% y 80% de probabilidad de excedencia. Este comportamiento es replicado por el modelo forzado con datos de MCG en el periodo histórico, pero subestimando el número de caudales máximos medios diarios asociados a ROS, con 14 en lugar de 18 eventos (Tabla 5).



Figura 12: Serie anual de máximos caudales medios diarios, de caudal medio diario anual y del máximo caudal asociado a eventos ROS. Valores simulados con los forzantes de reanálisis.

Tabla 5: Número de eventos de caudales máximos medios diarios simulados asociados a eventos ROS y elevación predominante de ocurrencia.

Periodo	Forzantes	Nº eventos	Elevación Predominante
(1980-2014)	Reanálisis	18	1500-1750
(1980-2014)	MCG	14	1500-1750
2040-2069	MCG	12	1500-2000
2070-2099	MCG	11	2000-3200

Para el periodo futuro cercano, se determina que 12 de los 29 eventos (41%) de máximos caudales medios diarios se atribuyen a eventos ROS, y estos se producen a una elevación entre 1500 y 2000 m s.n.m. Además, se determinó que estos caudales se continúan concentrando entre el 20% y 80% de probabilidad de excedencia. En el periodo futuro lejano disminuye el número de caudales máximos medios diarios asociados a ROS a 11 eventos (38%), siendo la elevación de mayor ocurrencia de eventos la banda de 2000 a 3200 m s.n.m., aunque en esta situación los caudales se encuentran entre el 60% y 1% de probabilidad de excedencia.

En cuanto a las magnitudes de los caudales medios diarios máximos, se aprecia un aumento para el periodo futuro cercano para todos los periodos de retorno respecto al histórico MCG (Figura 13), mientras que el periodo futuro lejano tiende a presentar una disminución de la magnitud de los caudales máximos medios diarios para todos los periodos de retorno, pero con una mayor variación entre MCG.

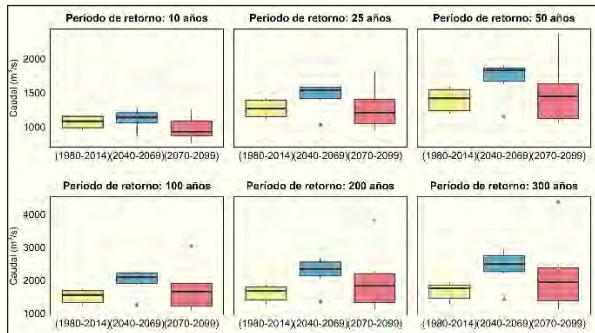


Figura 13: Boxplot de los caudales máximos medios diarios simulados con forzantes MCG, por periodo temporal asociado a distintos periodos de retorno. Notar que ejes de ordenadas en fila superior e inferior tienen distinto rango.

V. Conclusiones

El modelo CRHM forzado a base de datos del reanálisis ERA5-Land presenta un buen desempeño en el índice KGE para el caudal y el EAN, con un valor de 0,60 para la calibración en ambos casos, y 0,58 y 0,42 para la evaluación, respectivamente. En el caso del EAN, la métrica NSE presenta un mejor desempeño, con 0,76 en calibración y 0,52 en evaluación. Además, el modelo representa adecuadamente la estacionalidad de los caudales, aunque subestima los valores bajos de caudal y los máximos de EAN, lo que podría estar asociado a las diferencias de escala entre el área de la URH y la medición puntual en la estación, que no se espera sea representativa de dicha área.

Se analizó la ocurrencia de los eventos ROS simulados en la cuenca durante el periodo histórico (1980-2014), determinándose una frecuencia anual entre 5 a 24 eventos por año para distintas bandas de elevación, sin observarse tendencias. En cuanto a su estacionalidad, los eventos se concentran entre junio y agosto. Esta misma estacionalidad se reflejó en el periodo histórico al operar el modelo con las forzantes de los MCG, aunque se sobreestima la frecuencia anual entre 2 a 4 eventos por banda de elevación. También, en este caso se aprecia una mayor ocurrencia de ROS en invierno y menor en verano, lo que sugiere que estas series climáticas no logran

representar todas las tormentas cálidas ocurridas en el período histórico.

Para los períodos futuros se proyecta una disminución de la frecuencia anual de eventos ROS entre un 75% y 100% para la banda de elevación baja. Para elevaciones medias se proyecta una disminución a un 22% y 65% respecto del período histórico, y a un 22% y 38% en elevaciones altas, respectivamente. Estas proyecciones mantienen la estacionalidad, pero aumentan los eventos entre septiembre y noviembre, presentando tendencias decrecientes para elevaciones medias y altas.

La influencia de los eventos ROS en los caudales máximos medios diarios es significativa, ya que 18 (52%) de los 34 caudales medios diarios máximos anuales están relacionados con dichos eventos y se producen mayoritariamente en la elevación de 1500 a 1750 [m s. n. m]. Las simulaciones forzadas con MCG logran replicar este comportamiento en el período histórico, aunque subestimando el número de caudales medios diarios máximos anuales asociados, que coinciden sólo en un 41%, pero mantienen la elevación predominante. En el caso futuro, disminuye el número de máximos asociados a eventos ROS, coincidiendo con máximos anuales en 35 % en el período futuro cercano y en 32 % en el futuro lejano. Para el período futuro cercano la elevación predominante es entre 1500 a 2000 [m s. n. m] mientras que en el período futuro lejano se producen entre 2000 a 3200 [m s. n. m].

En comparación con el período histórico de los MCG, el período futuro cercano muestra un incremento de los caudales máximos medios diarios que va desde un 4% para períodos de retorno menores a 10 años hasta 44% para períodos de retorno de 300 años, mientras que el período futuro lejano proyecta una disminución en torno al 10,9% en los caudales máximos medios diarios para todos los períodos de retorno. Además, los eventos ROS futuros están asociados a menores probabilidades de excedencia, pasando de

valores entre 80% y 10% en el período histórico de MCG a rangos entre el 60% y el 1% en el período futuro lejano.

Dada la correspondencia entre la ocurrencia de eventos ROS y la generación del máximo caudal medio diario, resulta relevante seguir con el estudio de la modelación de estos eventos, y en un trabajo futuro identificar el aporte del derretimiento al máximo caudal medio diario medido.

Referencias

- Ali, G., Siebert, K., & Mizer, S. M. (2024). Spatiotemporal variability of runoff events in response to rainfall, snowmelt, and rain-on-snow in the Lake Erie Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101774>
- Beniston, M., & Stoffel, M. (2016). Rain-on-snow events, floods and climate change in the Alps: Events may increase with warming up to 4°C and decrease thereafter. *Science of The Total Environment*, 571, 228–236. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.146>
- Boisier, J. P. (2023). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960–2021 in continental Chile. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7529682>
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518(PB), 194–205. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.05.022>
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1–2), 31–49. <https://doi.org/10.1007/S00382-017-3580-6/TABLES/2>
- Coumerme, D. (2021). Caracterización de eventos meteorológicos extremos en la parte alta del río

- Maipo, Chile: efecto de eventos de lluvia sobre nieve y proyecciones por cambio climático [UniversidaddeChile].
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181685>
- Garreaud, R. (2023, June 27). *Vuelven los gigantes: un análisis preliminar de la tormenta ocurrida entre el 21 y 26 de junio de 2023 en Chile Central*.
<https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelven-los-gigantes-un-analisis-preliminar-de-la-tormenta-ocurrida-entre-el-21-y-26-de-junio-de-2023-en-chile-central/>
- Garreaud, R., Jacques-Coper, M., Marín, J., & Narváez, D. (2024). Atmospheric Rivers in South-Central Chile: Zonal and Tilted Events. *Atmosphere*, 15(4), 406.
<https://doi.org/10.3390/ATMOS15040406/S1>
- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change*, 177(6). <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03742-1>
- Glasner, L. (2022). *Eventos hidrometeorológicos de lluvia sobre nieve en los Andes de Chile Central* [UniversidaddeChile].
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188859>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Lagos-Zúñiga, M., Mendoza, P. A., Campos, D., & Rondanelli, R. (2024). Trends in seasonal precipitation extremes and associated temperatures along continental Chile. *Climate Dynamics*, 62(5), 4205–4222.
<https://doi.org/10.1007/S00382-024-07127-Z/FIGURES/1>
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Navarro-Serrano, F. M., Vidaller, I., & Alonso-González, E. (2021). Changes in the frequency of global high mountain rain-on-snow events due to climate warming. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094021.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0dde>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245.
<https://doi.org/10.2307/1907187>
- Musselman, K. N., Lehner, F., Ikeda, K., Clark, M. P., Prein, A. F., Liu, C., Barlage, M., & Rasmussen, R. (2018). Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America. *Nature Climate Change* 2018 8:9, 8(9), 808–812.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0236-4>
- Pomeroy, J. W., Brown, T., Fang, X., Shook, K. R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S. A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z., Kompanizare, M., & Lopez Moreno, J. I. (2022). The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding. *Journal of Hydrology*, 615, 128711.
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.128711>
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J., & Carey, S. K. (2007). The cold regions hydrological model: A platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*, 21(19), 2650–2667.
<https://doi.org/10.1002/hyp.6787>
- Rhoades, A. M., Zarzycki, C. M., Hatchett, B. J., Inda-Diaz, H., Rudisill, W., Bass, B., Dennis, E., Heggli, A., McCrary, R., McGinnis, S., Ombadi, M., Rahimi-Esfarjani, S., Slinskey, E., Srivastava, A., Szinai, J., Ullrich, P. A., Wehner, M., Yates, D., & Jones, A. D. (2024). Anticipating how rain-on-snow events will change through the 21st century: lessons from the 1997 new year's flood event. *Climate Dynamics* 2024, 1–23.
<https://doi.org/10.1007/S00382-024-07351-7>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73.
<https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324),

1379–1389.

<https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

Stoffel, M., Tiranti, D., & Huggel, C. (2014). Climate change impacts on mass movements — Case studies from the European Alps. *Science of The Total Environment*, 493, 1255–1266.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.02.102>

Vásquez, N., & Mendoza, P. A. (2024). *Statistically downscaled and bias corrected CMIP6 models for Continental Chile under scenario SSP5-8.5 - Harvard Dataverse*.
<https://doi.org/10.7910/DVN/O3YBOT>

Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., & Wagener, T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9), 9417.
<https://doi.org/10.1029/2007WR006716>

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185.
<https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.05.016>

EVOLUCIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DEL ACUÍFERO MAIPO-MAPOCHO BAJO PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

SUSTAINABILITY EVOLUTION OF THE MAIPO-MAPOCHO AQUIFER UNDER CLIMATE CHANGE PROJECTIONS

Melissa Vargas¹, Marcelo Olivares², Carlos Poblete³, James McPhee⁴, Carlos Espinoza⁵

RESUMEN

Se evalúa la sustentabilidad del acuífero Maipo–Mapocho bajo escenarios de cambio climático para los próximos 30 años, utilizando un modelo hidrogeológico MODFLOW-2005. Se considera el escenario de altas emisiones SSP5-8.5 para tres casos de cambio climático (ΔP , ΔT) representativos que permiten capturar la incertidumbre asociada. Las proyecciones indican aumentos de temperatura entre 1,0 °C y 2,5 °C y reducciones de precipitación entre 10% y 30%, lo que genera disminuciones significativas en la recarga (10%-47%) y en el volumen almacenado. Se proyectan descensos freáticos superiores a 50 metros y hasta 100 metros en sectores críticos. Se evaluaron tres niveles de adaptación (Bajo, Medio y Alto) para mitigar la pérdida de almacenamiento frente a un escenario atendencial (BAU). Los impactos son heterogéneos: la Zona Norte es la más afectada, seguida por la Este, Centro y Sur, donde las pérdidas pueden alcanzar hasta 70%. El análisis costo-efectividad muestra que las medidas de bajo nivel son más económicas, pero logran mejoras limitadas (~20%), mientras que las de mayor esfuerzo reducen significativamente las pérdidas, aunque con costos elevados.

ABSTRACT

The sustainability of the Maipo–Mapocho aquifer under climate change scenarios for the period 2021–2050, using the MODFLOW-2005 hydrogeological model, is assessed. The SSP5-8.5 high-emission scenario is considered for three representative climate change cases (ΔP , ΔT) that allow capturing the associated uncertainty. Projections indicate temperature increases between 1.0 °C and 2.5 °C and precipitation reductions of 10% to 30%, leading to significant decreases in recharge (10%-47%) and stored volume. Groundwater declines exceeding 50 meters and up to 100 meters are expected in critical areas. Three adaptation levels (Low, Medium, High) were evaluated to mitigate storage loss compared to a business-as-usual scenario (BAU). Impacts are spatially heterogeneous: the Northern Zone is most affected, followed by Eastern, Central, and Southern zones, where losses may reach 70%. Cost-effectiveness analysis shows that low-level measures are more affordable but provide limited improvements (~20%), while higher-effort strategies significantly reduce losses but involve substantial costs.

¹ Ingeniera de proyectos en Aguas Andinas y Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Universidad de Chile.

² PhD, Profesor Asociado Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

³ Ingeniero Civil, Subgerente de Planificación Técnica y Recursos Hídricos, Aguas Andinas.

⁴ Ingeniero Civil, PhD, Profesor Titular Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

⁵ Ingeniero Civil, PhD, Socio en Hidromas.

1. Introducción

Garantizar la seguridad hídrica frente al crecimiento poblacional, expansión agrícola y cambio climático es un desafío global crítico (Vörösmarty et al., 2010; Wheater & Gober, 2015). Las aguas subterráneas son esenciales para los ecosistemas y la adaptación humana, aportando cerca del 50% del agua potable y 43% del riego (Taylor et al., 2013; Siebert et al., 2010; IUCN, 2016). La sobreexplotación de acuíferos genera efectos negativos como agotamiento, intrusión salina y subsidencia, afectando poblaciones vulnerables (Galloway & Burbey, 2011; Michael et al., 2017). El cambio climático agrava estos problemas al alterar precipitaciones, prolongar sequías y reducir la recarga natural, especialmente en zonas áridas (IPCC, 2022; Zeydelinejad et al., 2020). La demanda hídrica sigue aumentando, lo que convierte la gestión sostenible de aguas subterráneas en prioridad global (Famiglietti, 2014; Wu et al., 2020; Mende et al., 2007).

La sostenibilidad del agua subterránea se define como su uso indefinido sin consecuencias inaceptables (Alley et al., 1999), pero enfrenta retos por la integración interdisciplinaria, incertidumbre en modelos y brechas de comunicación (Cook & Bakker, 2012; Gober et al., 2010). Determinar el rendimiento sostenible es complejo, con enfoques que van desde balance extracción-recarga hasta ajustes en flujos (Sophocleous, 2000; Bredehoeft, 2002; Kalf & Woolley, 2005; Konikow & Leake, 2014).

Modelos como MODFLOW permiten analizar flujos y almacenamientos espacialmente, evaluando medidas locales bajo distintos escenarios climáticos y de gestión, superando limitaciones de modelos simplificados (Anderson et al., 2015; Harbaugh, 2005; Freeze & Cherry, 1979; Hunt et al., 2007; Sonnenborg & Henriksen, 2005).

La gestión del acuífero Maipo-Mapocho constituye un desafío estratégico para Chile y un caso de relevancia internacional por su papel crítico en el abastecimiento de agua para una gran población urbana bajo crecientes presiones climáticas y antrópicas. Esta cuenca, ubicada en la zona central, abastece agua para consumo humano y actividades económicas, en una región donde reside más del 50% de la población chilena, lo que genera alta presión sobre los recursos hídricos (MOP, 2023). El clima mediterráneo semiárido, con alta variabilidad interanual y sequías prolongadas, aumenta la vulnerabilidad del sistema (Garreaud et al., 2019). Evidencias recientes muestran una intensa disminución de las reservas subterráneas, impulsada por sobreextracción durante la megasequía (Alvarez-Garreton et al., 2024; Jódar et al., 2024). Proyecciones climáticas indican menor precipitación, mayor temperatura y reducción de recarga, incrementando la dependencia del agua subterránea y el riesgo de sobreexplotación (Vásquez et al., 2024; Alley et al., 1999).

Estos retos complejos evidencian la necesidad de enfoques basados en datos y modelos avanzados que permitan evaluar e implementar medidas de gestión adaptadas a las condiciones locales (Anderson et al., 2015; Gleeson et al., 2020; Refsgaard et al., 2007). El presente estudio se inscribe en la literatura que promueve estrategias sostenibles frente a crecientes presiones climáticas y socioeconómicas (Kumar et al., 2012; Gleeson et al., 2020), incorporando aprendizajes de experiencias internacionales como la revisión realizada por Dangar et al. (2021) en India, que destaca la relevancia de marcos institucionales sólidos, disponibilidad de datos y gestión de la demanda. Sobre esta base, se adopta un enfoque espacialmente diferenciado mediante Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), definidos por la Dirección General de Aguas, para mejorar la eficiencia y adaptabilidad en la gestión del acuífero.

Este trabajo aborda brechas críticas en la comprensión de la heterogeneidad espacial y la dinámica futura del acuífero Maipo-Mapocho. A diferencia de estudios previos centrados en análisis retrospectivos y balances generales, se propone una modelación hidrogeológica espacialmente desagregada que simule respuestas locales bajo escenarios climáticos futuros y distintas estrategias de gestión. El modelo incorpora la heterogeneidad del sistema a través de los SHAC y permite evaluar impactos y costos de implementación de medidas de adaptación a 30 años, aportando insumos clave para la planificación hídrica y el diseño de políticas sostenibles. En última instancia, esta investigación busca fortalecer la gobernanza del agua subterránea, orientar estrategias de adaptación al cambio climático y contribuir a la seguridad hídrica de largo plazo en la cuenca Maipo-Mapocho.

Área de estudio

El acuífero se encuentra contenido en la cuenca del río Maipo, ubicada en la zona central de Chile, y está compuesto principalmente por sedimentos cuaternarios con alta capacidad de almacenamiento (GCF-Aquaterra-Aguas Andinas, 2024). Para la administración y gestión de las aguas subterráneas, la Dirección General de Aguas (DGA) ha definido Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC). En la Figura 1 se presenta el dominio de estudio según los SHAC, abarcando hasta el SHAC Melipilla y cubriendo un área de 2.610 km².

El dominio de estudio cuenta con una herramienta de modelación desarrollada en MODFLOW 2005, actualizada al 2021, la cual se utiliza en el presente estudio. Esta herramienta incorpora información obtenida mediante labores de terreno, como el catastro de sondajes y la exploración geofísica a través de sondeos SE y CSAMT, con el fin de complementar la conceptualización hidrogeológica.

El modelo fue calibrado con mediciones de nivel de agua para el período 1950-2021, utilizando datos de 107 estaciones de la red

de monitoreo pública de la DGA y 233 puntos de información de niveles de Aguas Andinas. La discretización temporal del modelo es mensual, con un período de calibración histórica comprendido entre enero de 1950 y diciembre de 2021. En cuanto a la discretización espacial, el modelo consta de tres capas con 499 columnas y 499 filas, y celdas con dimensiones que varían entre 100 m y 400 m, dependiendo de la zona de interés, sumando un total de 324.795 celdas activas (GCF-Aquaterra-Aguas Andinas, 2024).

Las principales entradas al sistema corresponden a la recarga por precipitación, el riego y las pérdidas de la red de agua potable, las cuales presentan variabilidad espacial y temporal. Las salidas del sistema corresponden a extracciones destinadas a riego, agua potable e industria, con un caudal medio anual total de 23,2 m³/s en 2021, distribuido en 13,7 m³/s para uso agrícola, 7,5 m³/s para agua potable y 2,0 m³/s para uso minero e industrial para 2021 (GCF-Aquaterra-Aguas Andinas, 2024).

La disminución de la recarga, producto tanto de la reducción de la precipitación en la zona de estudio - en el contexto de la Megasequía que afecta a la zona central desde 2010 (Garreaud, et al, 2021) - como del aumento en la impermeabilización urbana, sumada al incremento de las extracciones subterráneas, ha generado un desbalance en el acuífero, observado desde el año 2000 hasta la fecha (Figura 2). Esto ha resultado en descensos sostenidos del nivel freático, que en algunos SHAC superan los 50 m, con profundidades del nivel freático que exceden los 100 m (Figura 1).

1.1. *Objetivos*

Evaluar la sustentabilidad del acuífero Maipo-Mapocho incorporando incertidumbre asociada a proyecciones de cambio climático bajo diversas alternativas de gestión.

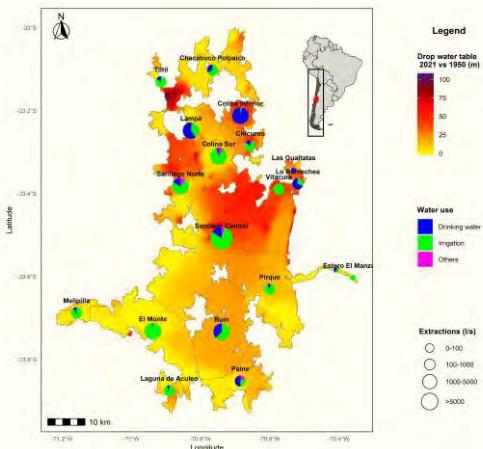


Figura 1. Área de estudio, acuífero regional Maipo-Mapocho según SHAC común, extracciones según uso y magnitud en círculos y descensos espaciales entre 2021 con respecto a 1950. Fuente: Elaboración propia a partir de GCF-Aquaterra-Aguas Andinas, 2024.

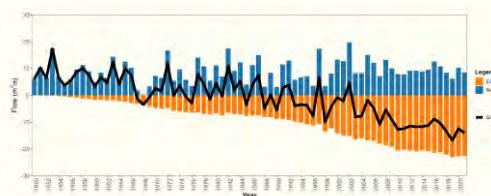


Figura 2. Entradas y salidas del sistema acuífero en términos de caudal medio anual. Fuente: Elaboración propia a partir de GCF-Aquaterra-Aguas Andinas, 2024.

1.2. Objetivos específicos

Evaluar el impacto de las proyecciones de cambio climático sobre la sustentabilidad del acuífero, incorporando la incertidumbre asociada, para la situación sin cambios en la gestión del acuífero.

Identificar y caracterizar alternativas de gestión hídrica que optimicen el uso de las fuentes disponibles y contribuyan a mejorar la sustentabilidad del acuífero.

Simular distintos niveles de adaptación con potencial impacto sobre el sistema acuífero y evaluar su costo-efectividad.

2. Metodología y Actividades Desarrolladas

2.1. Escenarios Climáticos y Proyección de Recarga

Para las proyecciones de cambio climático, se descargaron los modelos climáticos globales (GCM) en su versión más reciente, CMIP6, desde la plataforma Copernicus. La selección de los 12 GCM con mejor desempeño para la macrozona de estudio se realizó en base al trabajo de Gateño et al. (2023). Las variables consideradas en estas proyecciones son precipitación y temperatura media diaria, con un período histórico de referencia entre 1985 y 2014, y un período futuro entre 2021 y 2050, bajo el escenario pesimista SSP5-8.5, que representa la trayectoria más desfavorable en términos de emisiones de GEI. Para el ajuste de estos datos, se aplicó interpolación bilineal utilizando el producto CR2MET v2.0 (Boisier, 2023) a una resolución de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$, seguido de un escalamiento multivariado mediante MBCn (Cannon et al., 2018). Posteriormente, se emplearon índices climáticos ampliamente utilizados en la literatura (Frich et al., 2002; Alexander et al., 2006; Klein Tank et al., 2009; Zhang et al., 2011; Donat et al., 2013b; Sillmann et al., 2013; Dunn et al., 2020; Simões et al., 2021) para descartar los modelos con peor rendimiento en el área de estudio.

Con base en los resultados de estos modelos, en términos de cambios proyectados en precipitación y temperatura, se definieron tres casos de cambio climático ($\Delta P, \Delta T$) que incorporan el rango de incertidumbre de las proyecciones climáticas para las próximas décadas.

Para estimar la recarga de aguas subterráneas para las próximas décadas, se aplicó la metodología desarrollada por GCF-AQUATERRA-Aguas Andinas (2024) durante la calibración y construcción del modelo hidrogeológico, utilizando como series proyectadas de precipitación y temperatura aquellas que resultan de aplicar

los casos de cambio climático a la serie histórica. El modelo de recarga considera las pérdidas de las redes de agua potable y alcantarillado, las pérdidas de riego y la infiltración directa de la precipitación en el acuífero. Para proyecciones futuras, se asume que las condiciones de contorno del modelo se mantienen sin cambios, modificándose únicamente la temperatura y la precipitación. Todos los cálculos de recarga incorporan la variabilidad espacial en todo el dominio. Finalmente, se compara la reducción de la recarga en los diversos escenarios climáticos con la serie de recarga del período histórico 1985-2014.

2.2. Dinámica de los Acuíferos con Escenarios Climáticos

Los escenarios de recarga se generan a partir de los casos de cambio climático seleccionados aplicados a la serie histórica y se incorporan al modelo numérico para proyectar su evolución en las próximas décadas (2021-2050). En cuanto a las extracciones, se asume un incremento del 10% en las extracciones en todos los usos, en concordancia con el crecimiento proyectado por el INE para 2050 (INE, 2018). Este aumento se implementa de manera gradual y lineal a lo largo del período de simulación. Los impactos en el acuífero se cuantifican en función del descenso del nivel freático y variación volumétrica durante los próximos 30 años.

Los impactos de los casos de cambio climático en el acuífero se evalúan mediante la proyección de descensos en los niveles de agua subterránea y reducciones en el almacenamiento durante los próximos 30 años. Los descensos en los niveles de agua subterránea son una métrica de particular importancia.

2.3. Alternativas de Gestión e Implementación Numérica

La definición e implementación de alternativas de gestión en el modelo de simulación se basa en estrategias previamente evaluadas en la cuenca (DGA, 2021; EH-2030, 2024). Estas alternativas se han consolidado y complementado con información más detallada para evaluar su impacto sobre el acuífero (CDM Smith, 2020) y estimaciones internas de Aguas Andinas.

Se definen 3 niveles de adaptación en función de la reducción en la pérdida de volumen de almacenamiento futuro, las cuales se evalúan en función de su costo efectividad:

Nivel de Adaptación Baja: Representa la meta mínima de adaptación esperada, con una reducción del 20% en la pérdida de volumen de almacenamiento futuro.

Nivel de Adaptación Media: Corresponde a un nivel intermedio de adaptación, con una reducción del 50% en la pérdida de volumen de almacenamiento futuro.

Nivel de Adaptación Alta: Representa la meta máxima de adaptación esperada, con una reducción del 100% en la pérdida de volumen de almacenamiento en los próximos 30 años.

Estos niveles se definen en función del esfuerzo requerido por las acciones, donde los niveles bajos implican medidas de menor complejidad, que se intensifican progresivamente en los niveles medio y alto.

Las acciones se agrupan en tres categorías:

Reducción de la demanda de agua según tipo de usuario: Mediante mejoras en la eficiencia del uso del agua, tanto en el consumo de agua potable como en el riego.

Reducción adaptativa de las extracciones de agua subterránea: Aplicable en años con condiciones hidrológicas favorables, definidos como aquellos con una probabilidad de excedencia inferior al 60%.

Incorporación de nuevas fuentes de agua: Incluye opciones como el reúso de aguas, la recarga gestionada de acuíferos y la implementación de plantas desaladoras.

2.4. Alternativas Costo-Efectividad

La contribución de cada nivel de adaptación se evalúa en función de su viabilidad, considerando la disponibilidad de infraestructura existente y/o ampliación, los requisitos específicos de cada medida de adaptación propuesta y el juicio informado de expertos. Las principales referencias para esta evaluación se basan en el estudio de CDM Smith (2020), la estimación interna de Aguas Andinas y Escenarios Hídricos (2030).

Se desarrollan estimaciones de costos para cada escenario climático y nivel de adaptación. Para el cálculo de costos, se asume que la inversión requerida se realiza en el primer año y se evalúa a valor presente. En el caso de las plantas de desalinización, los costos se consideran proporcionales a la capacidad de producción diseñada.

3. Resultados Obtenidos

A continuación se presentan los 3 escenarios climáticos seleccionados que representan la dispersión de los resultados según modelos (Figura 4a):

ECC-1: Escenario menos pesimista, representa una reducción del 10% en precipitación y un 1,0°C de incremento en la temperatura. Los modelos cercanos a este escenario son GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-LR y EC-Earth3-CC.

ECC-2: Escenario donde se concentra la mayor cantidad de los modelos, representa un 20% de reducción en precipitación y un incremento en la temperatura de 1,5°C. Los modelos cercanos a este escenario son NorESM2-MM, IPSL-CM6A-LR y CMCC-ESM2.

ECC-3: Escenario más pesimista, representa una reducción de la precipitación en 30% y

un incremento en la temperatura en 2,5°C. El modelo considerado corresponde a TaiESM1.

Lo anterior, genera una reducción en la recarga desde 10% para el ECC-1 (línea verde) a 47% at ECC-3 (línea roja) comparado con la serie histórica (línea negra) (Figura 4b).

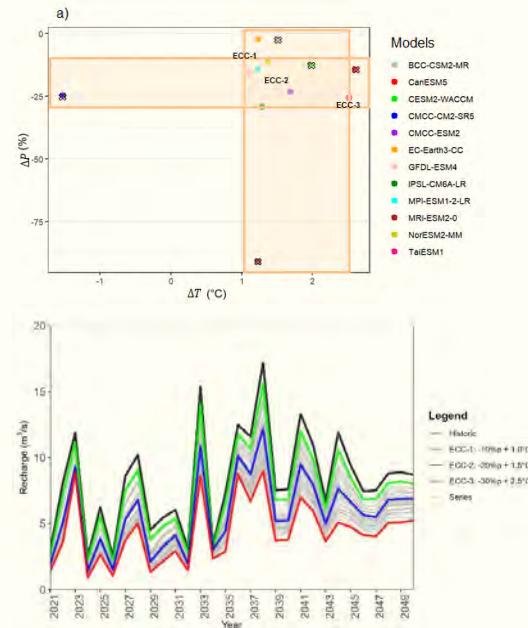


Figura 3. a) Variación de la precipitación y temperatura media entre el periodo 2021-2050 respecto al periodo 1985-2014. b) Recarga total en los próximos 30 años incorporando casos de cambio climático, la línea negra es referencial correspondiente a la serie histórica sin variación de la precipitación y temperatura.

En la Figura 4 se presenta la distribución espacial de la reducción de extracciones de aguas subterráneas por SHAC bajo distintos escenarios climáticos y niveles de adaptación. En el nivel de adaptación bajo, las reducciones se concentran principalmente en sectores de las zonas Norte y Centro, con valores entre 28% y 38% según el escenario. En el nivel medio, las reducciones se amplían, alcanzando entre 50% y 70% en las zonas Norte y Centro, e incorporando el sector Oriente con disminuciones que varían entre 20% y 40%. Finalmente, el nivel de

adaptación alto implica reducciones generalizadas en casi todo el dominio, con valores entre 80% y 100%, salvo algunas áreas en la zona Sur, y ajustes adicionales en el Oriente que pueden llegar hasta el 100% dependiendo del escenario climático.

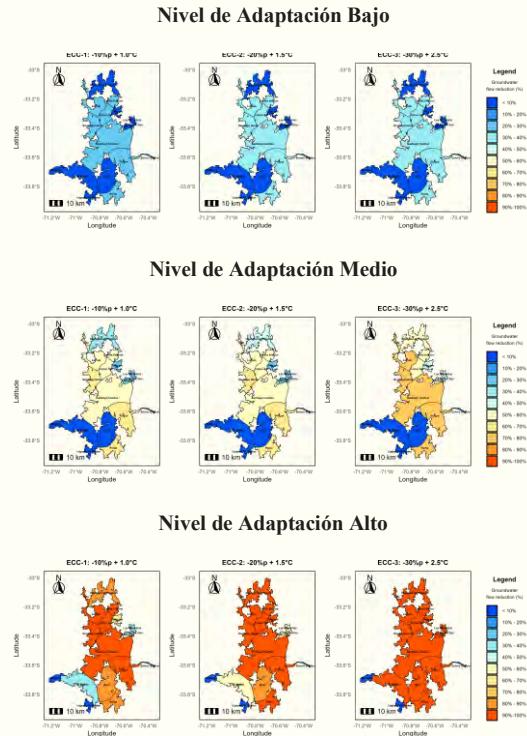


Figura 4. Implementación de la reducción porcentual de según SHAC, nivel de adaptación y caso de cambio climático.

En la Figura 5 se visualizan las proyecciones de descensos del nivel freático en los próximos 30 años. Sin adaptación, la zona Norte presenta caídas superiores a 50 m en sectores críticos como Til-Til y Colina Sur; la zona Oriente muestra descensos entre 10 y más de 40 m; la zona Centro amplía áreas con caídas mayores a 30 m y en la zona Sur, Buin y Paine se proyectan descensos superiores a 20 m, llegando a más de 40 m en escenarios extremos. Al implementar niveles de adaptación, se obtiene que el nivel bajo logra mejoras limitadas en zonas críticas; el nivel medio amplía la recuperación principalmente en zonas donde se implementa la reducción de caudal como en zona Norte y Centro y el nivel alto reduce significativamente los descensos y genera amplias áreas con

recuperación del nivel freático en todos los escenarios climáticos.

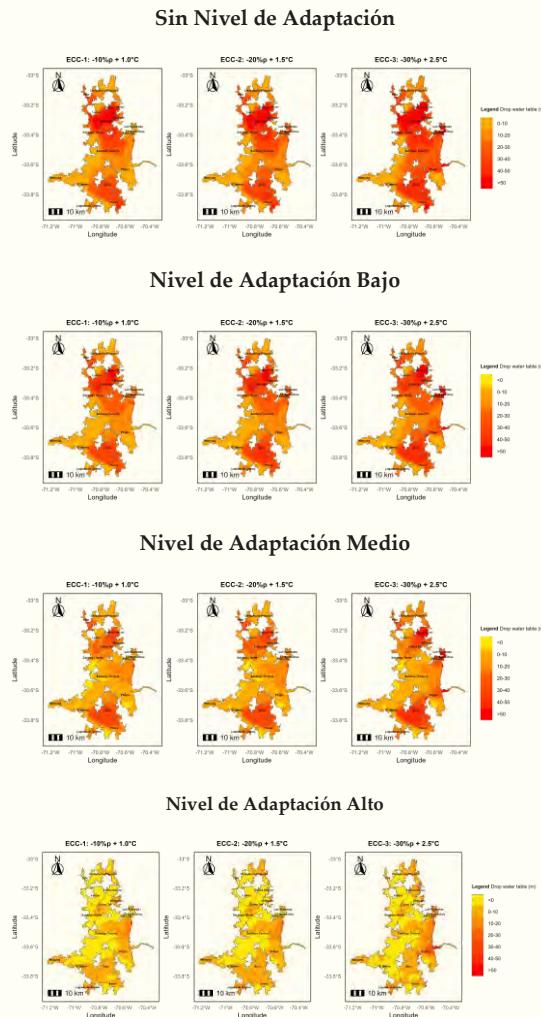


Figura 5. Descenso espacial del nivel freático entre 2021 y 2050 según la proyección de cambio climático considerada, sin y con niveles de adaptación.

En la Figura 6 se destaca que algunas zonas - particularmente la zona Oriente - son más sensibles a los cambios en la extracción de aguas subterráneas. Asimismo, en la figura se presenta la evolución volumétrica al implementar medidas de gestión según SHAC.

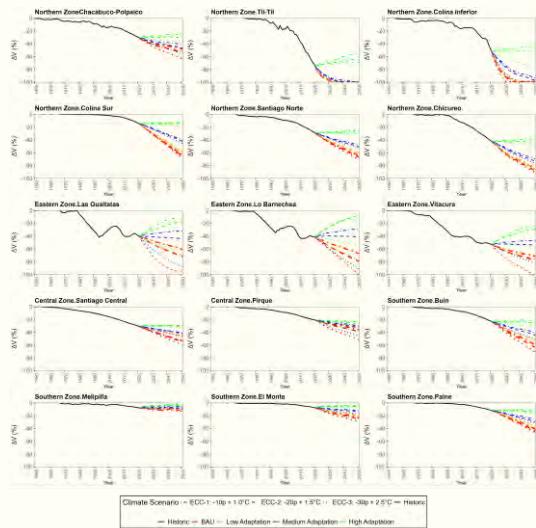


Figura 6. Variaciones proyectadas del almacenamiento de aguas subterráneas en los principales sectores bajo casos de cambio climático (tipos de línea) y niveles de adaptación (colores).

En la Figura 7 se visualiza la relación entre el cambio de almacenamiento y el costo estimado según nivel de adaptación y proyección de cambio climático. El **nivel de adaptación bajo** implica esfuerzos mínimos y no considera la construcción de una planta desaladora. Sus costos estimados oscilan entre USD 99 y 135 millones, dependiendo del caso de cambio climático. Este nivel representa la opción de mejor costoefectividad, ya que contempla medidas simples y de bajo esfuerzo, logrando mejoras limitadas en la recuperación del almacenamiento subterráneo. El **nivel de adaptación medio** requiere inversiones más significativas y mayores reducciones en las extracciones de agua subterránea. Los costos estimados varían entre USD 358 y 2150 millones, con incrementos no lineales bajo consideraciones de cambio climático más severos (ECC-2 y ECC-3). Este aumento se debe principalmente a la inclusión de plantas desaladoras, con capacidades de 0,5 m³/s en ECC-2 y 1,9 m³/s en ECC-3. Aunque este nivel permite una recuperación sustancial del almacenamiento, presenta alta variabilidad en los costos y demanda una infraestructura más compleja. Por su parte, el **nivel de adaptación alto** es el más ambicioso,

orientado a reducir casi por completo el déficit proyectado y alcanzar una condición cercana a cero en la pérdida de almacenamiento en las próximas décadas. Los costos estimados se sitúan entre USD 3273 y 7245 millones, dependiendo de la proyección de cambio climático. Este nivel incluye la implementación de plantas desaladoras en todos los escenarios, con capacidades de 2,2 m³/s en ECC-1, 3,2 m³/s en ECC-2 y 6,6 m³/s en ECC-3. Como resultado, se logra una mejora significativa en la recuperación del nivel freático y del volumen almacenado, aunque con costos muy elevados y una marcada variabilidad entre escenarios.

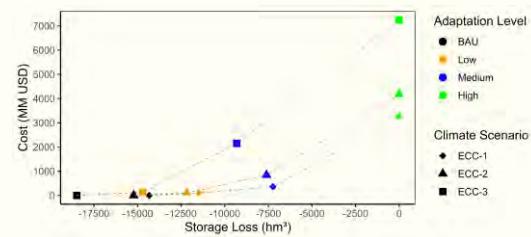


Figura 7. Relación entre el cambio de almacenamiento y el costo estimado según nivel de adaptación y proyección de cambio climático.

4. Conclusiones y Recomendaciones

Este estudio integró proyecciones climáticas, incorporación de incertidumbre y modelación hidrogeológica para evaluar los impactos del cambio climático sobre la sustentabilidad del acuífero Maipo–Mapocho en el horizonte 2021–2050. A partir del escenario de altas emisiones SSP5-8.5 y la definición de tres casos representativos de cambio climático (ECC-1, ECC-2 y ECC-3), se estimó una reducción significativa de la recarga y del volumen almacenado, con impactos heterogéneos a nivel espacial. Los resultados permiten cuantificar la magnitud de los efectos esperados y evaluar la efectividad de diferentes niveles de adaptación, entregando una base técnica para la gestión futura del recurso subterráneo bajo condiciones climáticas más adversas.

Las proyecciones climáticas bajo el escenario de altas emisiones SSP5-8.5 indican una reducción de la precipitación entre un 10% y 30%, junto con un aumento de temperatura entre 1,0 °C y 2,5 °C. Estimamos que estas condiciones proyectadas implican una disminución en la recarga del acuífero entre un 10% y 47% en comparación con el período histórico 1985–2014. Para representar la incertidumbre asociada a los distintos modelos climáticos, se definieron tres casos representativos de cambio climático (ECC-1, ECC-2 y ECC-3), considerando al caso intermedio (ECC-2) como el más probable, dado que refleja el mayor nivel de consenso entre los modelos globales.

Las proyecciones del modelo numérico muestran impactos significativos y espacialmente heterogéneos en la evolución del acuífero en las próximas décadas, con una pérdida de volumen en toda el área de estudio, independientemente de la zona.

La Zona Norte (SHACs Chacabuco Polpaico, Til-Til, Lampa, Colina Sur, Chicureo y Santiago Norte) se proyecta como la más afectada en todos los casos de cambio climático analizados, particularmente en sectores como Til-Til y Colina Inferior, donde se espera una pérdida total del volumen de agua subterránea. Estas áreas ya muestran pérdidas superiores al 50% en condiciones actuales, proyectándose un deterioro aún mayor a futuro.

Le sigue en severidad la Zona Este (SHACs Las Gualtatas, Lo Barnechea y Vitacura), que presenta alta sensibilidad tanto a la variabilidad hidrológica anual como a la extracción de aguas subterráneas. A diferencia de las otras zonas - donde se observa una tendencia descendente constante - la Zona Oriente ha mostrado fluctuaciones marcadas en el período histórico, generando mayor variabilidad en los resultados proyectados según el caso de cambio climático considerado. Esta sensibilidad se atribuye a su menor tamaño y características hidrogeológicas y dinámicas particulares.

La Zona Centro (SHACs Santiago Central y Pirque), ubicada en el corazón del área de estudio, tiene gran relevancia estratégica debido a su alto volumen total de agua subterránea y a la gran concentración de extracciones. En esta zona, las pérdidas de volumen proyectadas podrían alcanzar entre 50% y 60% en Santiago Centro, y entre 36% y 51% en Pirque durante los próximos 30 años, al considerar la incertidumbre de las proyecciones climáticas.

Finalmente, en la Zona Sur (SHACs Melipilla, El Monte, Buin, Paine y Laguna de Aculeo), los sectores más afectados serían Buin y Paine. En Buin, las pérdidas proyectadas de volumen oscilan entre 60% y 70%, mientras que en Paine se estiman entre 41% y 47%, según el escenario.

La variabilidad espacial de las disminuciones del nivel freático - particularmente aquellas superiores a 50 metros subraya la respuesta heterogénea del sistema acuífero, incluso dentro de los mismos sectores. Estos hallazgos destacan la necesidad de estrategias de adaptación diferenciadas y territorialmente focalizadas, priorizando las áreas con mayor vulnerabilidad hidrogeológica.

Para enfrentar los impactos del cambio climático, se evaluaron tres niveles de adaptación según su efectividad para reducir la pérdida de volumen de almacenamiento respecto al escenario tendencial (BAU): Adaptación Baja (reducción del 20%), Adaptación Media (50%) y Adaptación Alta (100%). Las estrategias se agruparon en tres categorías principales según el esfuerzo requerido: (1) Mayor eficiencia en el uso del agua, (2) Optimización de fuentes de agua superficial, y (3) Incorporación de nuevas fuentes de agua. El plan de adaptación sigue un enfoque progresivo, comenzando con medidas de bajo esfuerzo en el nivel bajo, aumentando en complejidad y recursos en el nivel medio, y alcanzando el mayor grado de intervención e inversión en el nivel alto. Estas medidas buscan reducir las extracciones subterráneas y aumentar la

disponibilidad hídrica total, fortaleciendo así la resiliencia del acuífero frente al cambio climático y la creciente demanda.

Los resultados muestran que a mayores esfuerzos de adaptación, se obtienen beneficios progresivamente mayores en el almacenamiento subterráneo. Mientras que los esfuerzos de baja adaptación generan mejoras menores - insuficientes para revertir las tendencias de agotamiento - los niveles medio y alto permiten una atenuación significativa, e incluso una reversión de las pérdidas de almacenamiento, especialmente en las zonas Norte, Centro y Oriente. Los mayores beneficios se observan en las áreas donde se implementaron explícitamente reducciones de extracción en el modelo numérico, enfocándose en los sectores más críticos. Esto resalta la efectividad de las medidas espacialmente focalizadas y la importancia de priorizar las zonas de mayor vulnerabilidad al diseñar estrategias de adaptación.

En cuanto a la relación costo-efectividad, esta es claramente no lineal. Las medidas de adaptación de bajo esfuerzo ofrecen mejoras de mayor relación costo-efectividad, ya que dependen de estrategias más económicas. Sin embargo, sólo logran alrededor de un 20% de recuperación del volumen de agua subterránea y no son suficientes para revertir las pérdidas a largo plazo. Los niveles de adaptación media y alta entregan beneficios sustancialmente mayores en términos de recuperación de almacenamiento. Aunque requieren mayores inversiones - especialmente bajo escenarios climáticos más severos - reflejando la escala e impacto de las intervenciones, como la construcción y operación de plantas desaladoras.

A medida que aumentan los esfuerzos de adaptación, también lo hace la variabilidad de costos, desde aproximadamente 99 a 135 millones de USD en el nivel bajo, hasta 350 a 2150 millones de USD en el nivel medio, y alcanzando entre 3273 a 7245 millones de USD en el nivel alto. Estas cifras reflejan el mayor alcance y efectividad de las medidas

implementadas, destacando la importancia de alinear la inversión con los objetivos de resiliencia a largo plazo.

Dado que los resultados en términos de variación del volumen y descenso del nivel freático son altamente sensibles a los sectores específicos donde se implementan las medidas de adaptación - así como a su magnitud — se recomienda priorizar zonas según criterios como tipo de uso del agua, intensidad de extracción y vulnerabilidad ante proyecciones climáticas. La identificación de zonas prioritarias permitirá una planificación más efectiva y eficiente. Además, se sugiere considerar una subzonificación adicional dentro del SHAC, dada su marcada heterogeneidad espacial, lo cual permitiría una implementación más localizada de las estrategias de adaptación, focalizando los esfuerzos donde más se necesitan.

La factibilidad de implementar las medidas propuestas en la cuenca de estudio depende en el avance de aspectos relevantes, tales como:

Una visión compartida por todos los usuarios de la cuenca acerca de la crítica evolución del acuífero como la presentada en este estudio.

Los acuerdos y consensos necesarios para la definición de una estrategia común para revertir la tendencia de decaimiento del acuífero.

El robustecimiento de las comunidades de aguas subterráneas y de la autoridad central que coordine y monitoree la implementación de las medidas en el tiempo.

El apoyo técnico de una herramienta de simulación del acuífero que sea común y confiable para todos los usuarios.

Por su parte, la efectividad de las medidas requerirá:

Se propone el mejoramiento continuo de la herramienta de simulación del acuífero Maipo-Mapocho, priorizando la

incorporación de información proveniente de zonas con mayor monitoreo y sistemas de medición más precisos, junto con un análisis detallado en las áreas consideradas más críticas.

Es relevante que el costo-efectividad de las medidas implementadas sea monitoreada mediante esta herramienta de manera de introducir cambios oportunos para asegurar la mejora esperada en la recuperación del acuífero, además de la optimización de las medidas y sus costos económicos.

Referencias

- Aeschbach-Hertig, W., & Gleeson, T. (2012). Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. *Nature Geoscience*, 5(12), 853–861. <https://doi.org/10.1038/ngeo1617>
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., ... Vazquez, D. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5), D05109. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (1999). *Sustainability of groundwater resources* (U.S. Geological Survey Circular 1186). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/circ1186>
- Alvarez-Garreton, C., Jódar, J., Fuentealba, M., Oyarzún, R., Rojas, R., & Herrera, D. (2024). The catastrophic effects of groundwater intensive exploitation and megadrought on aquifers in Central Chile. *Science of The Total Environment*, 914, 169651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169651>
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport* (2nd ed.). Academic Press.
- Bredehoeft, J. D. (2002). The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model. *Ground Water*, 40(4), 340–345.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 121–142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0173-7>
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: An N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Cook, C., & Bakker, K. (2012). Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 22(1), 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011>
- Dangar, S., Asoka, A., & Mishra, V. (2021). Causes and implications of groundwater depletion in India: A review. *Journal of Hydrology*, 596, 126103. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126103>
- Dirección General de Aguas. (2021). *Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maipo (SIT N.º 471)*. Ministerio de Obras Públicas. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/items/fd935d78-5b7d-4b48-alfa-9cf77503a8b3/full>
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R. S., Caesar, J., ... Dunn, R. J. H. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2098–2118. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>
- Dunn, R. J. H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., ... Hersbach, H. (2020). Development of an

- updated global land in situ-based dataset of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), e2019JD032263. <https://doi.org/10.1029/2019JD032263>
- Escenarios Hídricos 2030. (2024). *Maipo resiliente: de la crisis a la regeneración hídrica*. https://escenarioshidricos.cl/wp-content/uploads/2024/07/maipo-resiliente_2-18-julio.pdf
- Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945–948. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Frich, P., Alexander, L. V., Della Marta, P. M., Gleason, B. E., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., & Peterson, T. C. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19(3), 193–212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Carty, M. B., Christie, D., ... Wilson, R. (2019). The Central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(10), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- GCF-Aquaterra-Aguas Andinas. (2024). *Actualización modelo regional cuenca Maipo-Mapocho*.
- Gleeson, T., Cuthbert, M. O., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48, 431–463. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>
- Gober, P., Kirkwood, C. W., Balling, R. C., Ellis, A. W., & Deitrick, S. (2010). Water planning under climatic uncertainty in Phoenix: Why we need a new paradigm. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(2), 356–372. <https://doi.org/10.1080/00045601003595420>
- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N. A., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., ... Montserrat, S. (2023). Evaluating CMIP6 models for climate impact assessments in Chile. *ESS Open Archive*. <https://essopenarchive.org/users/644143/articles/657149-evaluating-cmip6-models-for-climate-impact-assessments-in-chile>
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular groundwater model: The ground-water flow process*. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/>
- Hunt, R. J., Doherty, J., & Tonkin, M. J. (2007). Are models too simple? *Ground Water*, 45(3), 254–263. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00316.x>
- IPCC. (2022). *Sixth Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IUCN. (2016). *Informe anual 2016*. <https://portals.iucn.org/library/node/46789>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). *Anuario de estadísticas vitales 2018*. https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/nacimientos-matrimonios-y-defunciones/publicaciones-y-anuarios/anuarios-de-estad%C3%ADsticas-vitales/anuario-de-estad%C3%ADsticas-vitales-2018.pdf?sfvrsn=10e4ed27_5
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

- Jódar, J., Jiménez-Martínez, J., Vizcaíno, P., Oyarzún, R., Rojas, R., & Herrera, D. (2024). Process-based simulation of groundwater recharge and storage change in Central Chile under drought and climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(6), 1605–1622. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1605-2024>
- Kalf, F. R. P., & Woolley, D. R. (2005). Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems.
- Klok, E. J., & Klein Tank, A. M. G. (2009). Updated and extended European dataset of daily climate observations: Daily dataset of 20th century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 29(8), 1182–1198. <https://doi.org/10.1002/joc.1779>
- Konikow, L. F., & Leake, S. A. (2014). Depletion and capture: Revisiting “The Source of Water Derived from Wells.” *Ground Water*, 52(S1), 100–111. <https://doi.org/10.1111/gwat.12204>
- Kumar, M. D., Singh, O. P., & Samad, M. (2012). Water management, food security and sustainable agriculture in developing economies. In *Water Management, Food Security and Sustainable Agriculture in Developing Economies* (pp. 1–17). Academic Foundation.
- Mende, A., Astorga, A., & Neumann, D. (2007). Strategy for groundwater management in developing countries: A case study in northern Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 334, 109–124.
- Michael, H. A., Post, V. E. A., Wilson, A. M., & Werner, A. D. (2017). Science, society, and the coastal groundwater squeeze. *Water Resources Research*, 53(4), 2610–2617. <https://doi.org/10.1002/2017wr020851>
- Refsgaard, J. C., et al. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process. *Environmental Modelling & Software*, 22(1), 1543–1556.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1863–1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>
- Sønnenborg, T. O., & Henriksen, H. J. (2005). Integrated hydrological modelling – A decade of experience. *Hydrological Processes*, 19(3), 747–751. <https://doi.org/10.1002/hyp.5818>
- Sophocleous, M. (2000). From safe yield to sustainable development of water resources – The Kansas experience. *Journal of Hydrology*, 235(1–2), 27–43.
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., ... Treidel, H. (2012). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Vásquez, N., Mendoza, P. A., Lagos-Zúñiga, M. A., Scaff, L., Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2024). Robust spatial changes in climate classes: Insights from bias-corrected CMIP6 models across Chile. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad9d5b>
- Vörösmarty, C. J., et al. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555–561.

Wheater, H. S., & Gober, P. (2015). Water security and the science agenda. *Water Resources Research*, 51(7), 5406–5424.
<https://doi.org/10.1002/2015WR016892>

Wu, W., Lo, M., Wada, Y., Famiglietti, J. S., Reager, J. T., Yeh, P. J., Ducharne, A., & Yang, Z. (2020). Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature Communications*, 11(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17581-y>

Zeydalinejad, N., Nassery, H. R., Alijani, F., & Shakiba, A. (2020). Forecasting the resilience of Bibitarkhoun karst spring, southwest Iran, to future climate change. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2359–2375.
<https://doi.org/10.1007/s40808-020-00819-5>

PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE SITIO MEDIANTE MODELOS DE MACHINE LEARNING

SEISMIC SITE RESPONSE PREDICTION BASED ON MACHINE LEARNING MODELS

Roberto Vergara¹, Jawad Fayaz^{2,3}, Rodrigo Astroza¹

RESUMEN

Este estudio presenta un modelo avanzado de Machine Learning para predecir la respuesta de sitio (respuesta sísmica de depósito de suelos) en el dominio del tiempo. Se implementa una metodología rigurosa para la limpieza de registros sísmicos y se desarrolla un modelo de Deep Learning basado en redes convolucionales (CNN) y perceptrones multicapa (MLP). Mediante la aplicación de una función de pérdida modificada, fundamentada en datos observados, se logra una notable reducción en el tiempo de entrenamiento, una mejora significativa en la precisión de la predicción de la dinámica de los registros sísmicos y una minimización efectiva del sobreajuste. Los datos utilizados provienen de la red sismológica japonesa KiK-Net, la cual consiste en arreglos del tipo downhole. El principal aporte de esta investigación radica en la creación de un modelo capaz de predecir de manera generalizada la respuesta sísmica de sitio, integrando tanto las propiedades del suelo como las características del terremoto, particularmente en sitios clasificados como SH1D (respuesta unidimensional). Los resultados obtenidos demuestran un índice de concordancia superior a 0,7 en promedio para los datos de prueba, con ajustes precisos en las medidas de intensidad, lo que indica que la dinámica de los registros se captura adecuadamente.

ABSTRACT

This study proposes an advanced machine learning model to predict the seismic site response in the time domain. A rigorous methodology is implemented for cleaning seismic records, and a Deep Learning model based on Convolutional Neural Networks (CNN) and Multilayer Perceptrons (MLP) is developed. Through the application of a modified loss function grounded in observed data, significant reductions in training time are achieved, along with substantial improvements in the accuracy of seismic record dynamics predictions and an effective minimization of overfitting. The data utilized was recorded by the Japanese KiK-Net seismological network, which includes downhole arrays. The primary contribution of this research lies in the development of a model capable of generally predicting site response by integrating both soil properties and earthquake characteristics, particularly for sites classified as SH1D (one-dimensional response). The results demonstrate an Index of Agreement exceeding 0.7 on average for test data, with precise adjustments in intensity measures, indicating that the dynamics of the records are adequately preserved.

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Santiago 7620001, Chile

² Department of Computer Science, University of Exeter, Exeter, EX4 4RN, UK

³ Department of Civil, Environmental, and Geomatic Engineering, University College London, London, WC1E 6BT, UK

1.- Introduction

Throughout history, earthquakes have caused major catastrophes, leading to loss of life and the collapse of critical structures. Uncertainties and effects related to seismic events have attracted the attention of different fields, including structural engineering, social planning, seismology, and geotechnical engineering. In the geotechnical engineering field, one of the most important topics is site amplification or site response, which refers to the modifications of seismic waves due to surface geology (Zhu et al., 2022). This area is crucial since site response determines the seismic demands experienced by civil structures located on the earth's surface.

The analysis of seismic site response, its challenges, and the limitations of current methodologies draws heavily upon extensive research conducted across geotechnical engineering and seismology, increasingly utilizing advanced computational approaches to overcome modeling difficulties.

Numerous physical and numerical models exist to simulate site response. Astroza, Pastén and Ochoa-Cornejo (2017) focused on the widely used equivalent-linear (EQL) method, which is applied in practice due to its effectiveness and simplicity in simulating the non-linear behavior of soils during seismic events. They proposed a Bayesian filtering approach to refine the EQL model by incorporating real seismic array data, thereby improving its predictive accuracy. Similarly, Mercado, Nino and Arteta (2019) utilized a Bayesian framework alongside a finite element (FE) model to estimate site parameters by using real on-site acceleration measurements, estimating the correlation between soil dynamics and resulting response spectra.

Zhu et al. (2022) conducted a comparison between traditional physical models, such as Ground Response Analysis (GRA), Square-root-impedance (SRI), and empirical models like the Corrected Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (c-HVSR), using the General Inversion Technique (GIT) as a reference framework. In a subsequent study, Zhu et al., (2023) compared these physical models (GRA and c-HVSR) with machine learning models, specifically Random Forest, which showed superior results in amplification modeling while requiring far fewer predictive variables. Both studies highlighted

the importance of on-site records in enhancing the models' performance.

Other study demonstrated the use of fully connected neural networks and Convolutional Neural Networks (CNN) to derive the Fourier amplification function directly from soil velocity profiles. This machine learning technique successfully reduced the error between their estimates and observations (Roten and Olsen, 2021).

Lee et al. (2023) introduced a hybrid machine learning model, combining Random Forest and Deep Neural Networks (DNN). This model was designed to use the bedrock response spectrum and soil profile of one site as inputs to predict the surface response spectrum, achieving superior results by integrating these features through the two distinct models.

Artificial Intelligence (AI) models have been increasingly proposed in recent years due to their superior ability to capture non-linear relationships, often surpassing the capabilities of traditional physical models. For instance, Lee et al. (2023) highlighted the superior performance of DNN in site response modeling, demonstrating that these models outperformed traditional FE models in both frequency and time domains. Furthermore, machine learning models like Random Forest have demonstrated superior results in amplification modeling compared to physics-based models while using far fewer predictive variables.

The modeling of seismic site response presents a high complexity, stemming from several intertwined physical and theoretical issues. The main challenge is the high complexity due to impedance effects, soil non-linearity, and potential resonance effects of the sites (Stewart, Afshari and Goulet, 2017). This complexity arises because seismic records encapsulate crucial information about seismic events and the soil's properties, requiring comprehensive analysis to capture the soil non-linearities that may amplify or deamplify the seismic motion.

Another very important aspect is that many models used for seismic site response analysis are linear, which can distort results at high frequencies. Furthermore, most existing models are ergodic, applying source, path, and site-averaged effects based on global data for a specific site. However, site response can deviate from the global average due to site-specific parameters.

Current site response models face limitations in generalization, reliance on specific conditions, and issues related to data handling in advanced computational methods. Many efforts result in models that are useful only under specific conditions. Numerous academic works often compute, categorize, and classify spectral ratios, but these investigations generally apply to specific conditions and do not generalize well across different scenarios, though they yield good results under certain conditions (Bergamo, Hammer and Fäh, 2021; Zhu *et al.*, 2022; Ji *et al.*, 2023). Physical models, despite their good results, are often heavily dependent on many parameters and assumptions.

The availability and integration of data collected from downhole/borehole arrays are crucial for site response analysis and modeling.

Increasing the number of instrumented sites is essential to conduct robust comparisons and develop constitutive soil models, thereby enhancing the characterization of different types of soils under seismic excitations. This type of data provides sufficient information for more robust modeling. For instance, the Japanese KiK-Net network is a strong-motion seismograph network comprising pairs of sensors installed both in boreholes and on the ground surface, providing both borehole and surface records for multiple seismic events. The borehole sensor collects the seismic data, which then propagates through the different layers of the soil.

Thompson *et al.* (2012) developed a classification highly relevant in this context, as it categorized stations based on wave propagation characteristics. This classification defines classes such as LG (Low - Good), indicating low inter-variability (L) and a good fit for SH1D models (G). Specifically, Thompson *et al.* (2012) identified 16 stations in the KiK-Net network that exhibited one-dimensional responses.

This work introduces a novel approach to seismic hazard assessment through the development of an advanced Machine Learning model designed to predict seismic site response in the time domain. This methodology is based on integrating actual data recorded at the Japanese KiK-Net network.

The primary contribution of this research lies in the creation of a model capable of generally predicting site response by integrating both soil properties and

earthquake characteristics, which represents a divergence from investigations that generally apply only to specific conditions and do not generalize well across different scenarios.

The approach focuses on predicting the acceleration time history at the ground surface from borehole records, along with soil deposit properties and seismic event information. This is a key contribution that addresses a research gap, as realistic time histories are needed for optimal performance-based design solutions, providing a robust foundation for designing structures.

The study specifically uses data from 16 stations within the KiK-Net network classified as *LG* by Thompson *et al.* (2012).

Furthermore, the model operates within the time domain, diverging from the traditional focus on frequency content prevalent in existing literature, thereby expanding the discipline's theoretical framework.

2.- Database and Data Processing

KiK-Net (Kiban Kyoshin Network) is a strong-motion seismograph network in Japan, comprising pairs of sensors installed both in boreholes and on the ground surface at approximately 700 locations (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019). The selection of the 16 stations was based on the site classification provided by Thompson *et al.* (2012). This classification defines classes such as LG (Low - Good), indicating low inter-variability (L) and a good fit for SH1D models (G). The SH1D model assumptions are:

- i) The medium consists of laterally constant layers overlying a non-attenuating half-space.
- ii) Wavefronts are assumed to be planar.
- iii) Only the horizontally polarized component of the S wave (the SH wave) is modeled.
- iv) Damping is assumed to be frequency-independent.

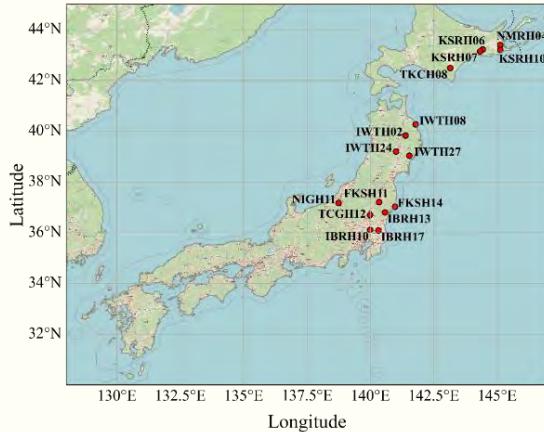


Figure 1: Map of Japan and the 16 selected stations.

Figure 1 shows a map of the selected stations, while Table 1 describes the soil classification of these stations according to the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)

Table 1: Site Classification according to the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) (Huang et al., 2020).

Station	Latitude	Longitude	V_{s30} [m/s]	NEHRP site classification
FKSH11	37.1976	140.342	240	D
FKSH14	37.0233	140.9736	237	D
IBRH10	36.1078	139.9919	144	E
IBRH13	36.7924	140.5784	335	D
IBRH17	36.0822	140.3171	301	D
IWTI02	39.8222	141.3861	390	C
IWTI08	40.2658	141.7867	305	D
IWTI24	37.5382	138.6174	486	C
IWTI27	39.0278	141.5356	670	C
KSRH06	43.2175	144.4325	326	D
KSRH07	43.1333	144.3314	204	D
KSRH10	43.2058	145.1208	213	D
NIGH11	37.1697	138.7472	375	C
NMRH04	43.3953	145.1264	168	E
TCGH12	36.6928	139.9875	344	D
TKCH08	42.4839	143.1558	353	D

Based on the comprehensive site classification and the selection of the 16 stations from the KiK-Net network, which were chosen for their alignment with the SH1D model assumptions, the following methodology was rigorously implemented for handling the time series data to prepare a robust dataset for the machine learning model.

The process of preparing the seismic records involved several stages, including data transformation, standardization, filtering, and quality control, necessary due to the challenging nature of raw time series data.

The analysis focused primarily on the horizontal directions (EW and NS) of the seismic records (both borehole and surface), as these are considered the most influential for structural seismic response.

First, a rotational conversion was conducted. Because the precise orientation of the sensors was unknown, the data underwent a rotational conversion to Rot50 and Rot100 components (Boore, 2006). The Rot50 component represents the median value of the response across all 180 possible directions, while Rot100 corresponds to the maximum value.

Then, Arias Intensity (I_A) (Arias, 1970) was computed. To ensure a single degree (θ) was selected for Rot50 and Rot100 that maintained point correlation, I_A was utilized. The median (θ_{median}) and maximum (θ_{max}) I_A values were sought to define the final Rot50 and Rot100 records, respectively.

Once the data has been transformed, all signals must be standardized to the same sampling frequency. There are records with sampling frequencies of 100 Hz and 200 Hz, and to unify all records, those with 200 Hz are resampled to 100 Hz (Shannon, 1949).

A final transformation involved calculating the cumulative Arias Intensity for each record and retaining only the segment between 0.1% and 99.9% of the total intensity (Arias, 1970). This was essential to eliminate non-event-related "sensor memory" or noise present at the start and end of the records.

To ensure the database contained only consistent, single-event records, four filters were applied.

- Minimum PGA:** Records with a peak ground acceleration (PGA) below 5 gal were removed, as they were deemed to have minimal engineering significance.
- Multiple Event Filter:** Records containing multiple events were filtered by adjusting the smooth normalized envelope of each record to a skew-normal distribution, which typically resembles a single seismic event. Only records with a coefficient of determination (R^2) greater than 0.7 were retained.

The functionality of the filter is illustrated in Figure 2, showing a clean case with a high R^2 (top row) that is retained, versus a case with

multiple events (second column) that is eliminated for the purposes of this study.

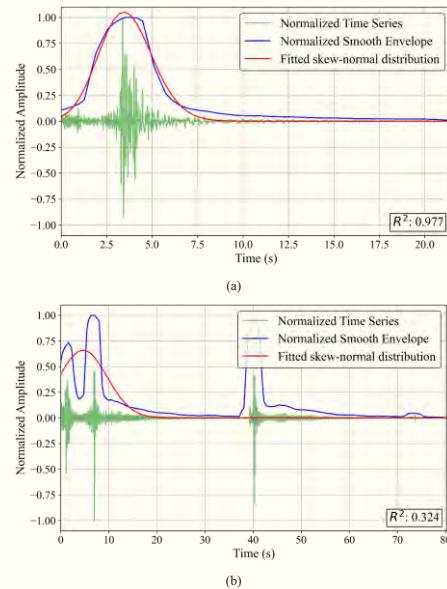


Figure 2: Example of a (a) good fit and a (b) bad fit of the Skew Positive Normal Distribution filter.

iii. **Energy Filters (Initial and Final):**

These filters ensured critical dynamic information was captured based on I_A . The Initial Energy Filter eliminated records where the first 2.5% contained more than 25% of the total energy, indicating an abrupt start (Figure 3). The Final Energy Filter discarded records if the last 20% contained at least 10% of the total energy, suggesting an unusual termination (Figure 4).

iv. **Visual Filter:** All remaining records underwent a final visual inspection to remove any apparent inaccuracies.

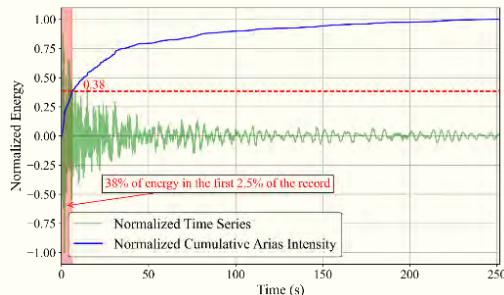


Figure 3: Example of the initial energy problem.

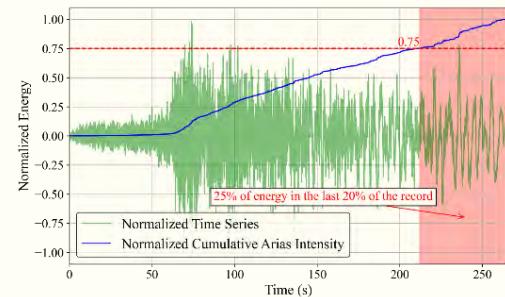


Figure 4: Example of the final energy problem.

The clean records still presented highly variable lengths, posing a challenge for the machine learning models.

To validate the use of the significant duration ($D_{5-95\%}$), acceleration response spectra (Paz, 1991) were calculated for both the original and the $D_{5-95\%}$ cases. As shown in Figure 5, this reduction did not result in a significant loss of information, exhibiting minimal differences in the response spectra.

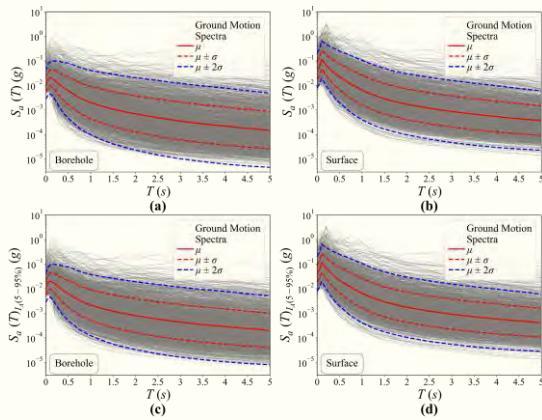


Figure 5: Response Spectra for (a) Borehole Original Case, (b) Surface Original Case, (c) Borehole $I_A(5-95\%)$ and (d) Surface $I_A(5-95\%)$ for Rot100.

To manage the resulting lengths, only records between 500 and 2,500 values (5 to 25 seconds at 100 Hz) were retained for training, encompassing the vast majority of the data (Figure 6).

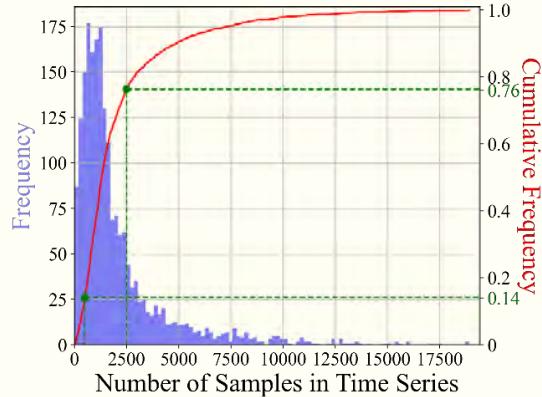


Figure 6: New Lengths of time series Rot100 data.

Next, the amplification of each station is analyzed as an initial estimation measure to understand the working ranges. This involves examining the relationship between surface and borehole for PGA and the acceleration response spectrum for multiple periods: short, medium, and long (Figure 7).

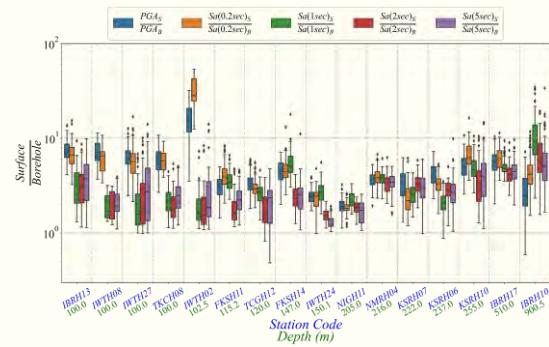


Figure 7: Boxplot showing amplification of PGA and response spectra in different periods for Rot100.

Additionally, the number of records for each station is presented in Figure 8.

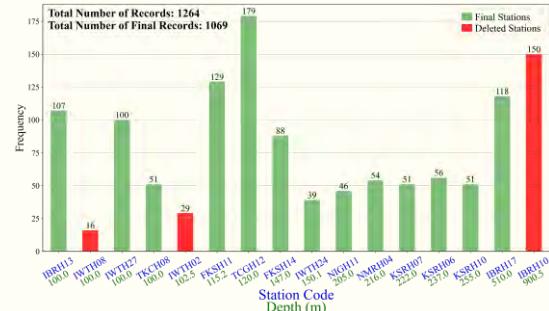


Figure 8: Number of Records per Station Rot100.

Figure 8 shows that stations IWTH08 and IWTH02 have very few records, with less than 30. Consequently, their statistical significance is minimal. Furthermore, Figure 7 reveal inconsistencies in amplification values for these stations compared to the others, likely due to the limited data. Therefore, it was decided to eliminate these stations from the study.

Moreover, station IBRH10 is also eliminated because its amplification behavior significantly deviates from the other stations, marking it as a potential outlier. The primary objective of this study is to generalize findings, and including such an outlier would introduce inconsistencies. The PGA amplification values and short-period response spectra for IBRH10 are more significant than those for the long-period response spectrum (see Figure 7), which is unusual and contrary behavior compared to the other stations.

For the remaining thirteen (13) selected stations, a clear trend emerges based on station

depth: shallower depths correspond to higher PGA values and response spectra at low periods. In comparison, greater depths correlate with increased response spectrum values at high periods. This highlights the importance of depth in the analysis.

For soil properties, the KiK-Net network provides detailed information on each station's soil profile. Additionally, it includes the latitudes and longitudes of both the seismic event and the station, which can be used to calculate the epicentral distance (R_{epi}). The depth at which the borehole sensor is located is also provided.

Next, the shear wave velocity (V_s) soil profiles for the selected stations are analyzed. These profiles are crucial, as they provide insight into the subsurface characteristics and the behavior of seismic waves as they travel through the soil. The profiles of each station can be seen in Figure 9.

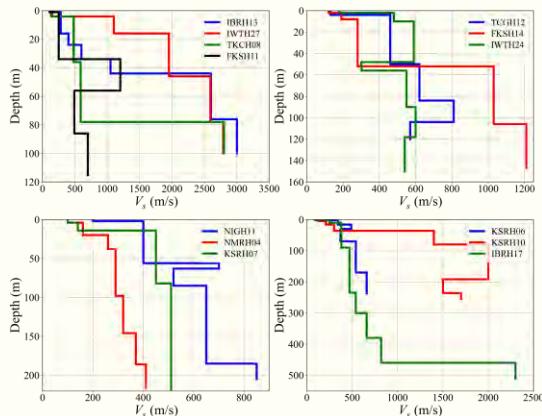


Figure 9: Shear wave velocity profiles of the selected stations.

From Figure 9, it is evident that the soil profiles vary significantly across the different stations, highlighting the substantial heterogeneity in soil conditions. This variability is beneficial for the purposes of this study, as it allows for better generalization. Additionally, it can be noted that the stations exhibit highly variable depths, further highlighting the diversity of the soil profiles.

Since each station has a different depth profile, the average shear wave velocities at various depths are utilized to ensure comparability.

The average shear wave velocity (V_s) is calculated as follows:

$$V_s(n) = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s_i}}} \quad \text{Eq. 1}$$

Where:

h_i = Thickness of the i -th soil layer.

V_{s_i} = Shear wave velocity in the i -th soil layer.

Using this expression, the average shear wave velocity at different depths can be computed. To ensure a standardized comparison of soil profiles across stations with varying depths, the term $V_s(n)$ is calculated as a percentage relative to each station's depth. This approach normalizes the soil profile length represented by $V_s(n)$, making it proportional to each station's total depth.

Figure 10 presents the results obtained from this process, showing average shear wave velocities ranging from 300 m/s to nearly 1400 m/s at the maximum depths of each station. It can be observed that using this method, all profiles contain the same number of values, allowing for unified analysis.

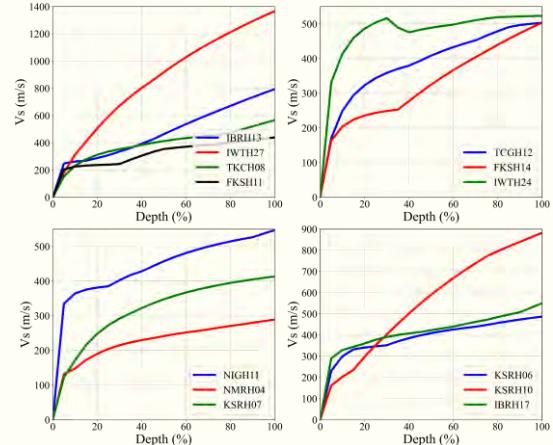


Figure 10: Percentual V_s soil profile for the selected stations.

Finally, the seismic source input parameters included focal depth and magnitude. These parameters were chosen due to their accessibility as primary components in any seismographic network. They are also significant variables that provide essential insights into the nature and impact of an earthquake.

3.- Model Architecture and Training

To maximize the available data, the records from both Rot50 and Rot100 are combined without differentiation during training to enhance model robustness, generalization, and avoidance of overfitting. To maintain uniform length handling across different time series, zero-padding is applied at the end of sequences.

The dataset is divided into three parts: 72% for training, 19% for testing, and 9% for validation, ensuring that equivalent seismic events are consistently grouped within each category.

Figure 11 illustrates the distribution of each split (test, train, validation) in relation to the event's magnitude. It clearly shows that the splits maintain similar magnitudes across events, ensuring a well-distributed and balanced dataset.

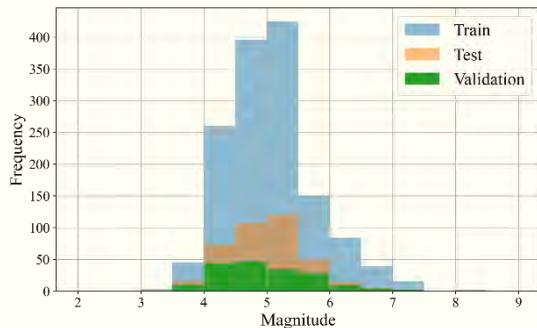


Figure 11: Train, test and validation distribution.

The selected model architecture is a hybrid CNN-MLP model (Convolutional Neural Network - Multi-Layer Perceptron), designed to process heterogeneous input data effectively.

- CNN for Time Series: The time series data is processed by 4 convolutional layers (CNN), which are specialized neural networks used to extract features and temporal relationships from grid-like data.
- MLP for Static Properties: The soil and source properties are handled by Fully Connected layers (MLP), approximating a specific function to map static inputs to outputs.

- Combination: The hidden states from both the CNN and MLP branches are combined using matrix multiplication (Matmul), followed by additional Fully Connected layers to reduce dimensionality and streamline the data. This hybrid structure ensures that the model learns complex relationships by integrating the temporal features extracted from the seismic records with the contextual information provided by the soil properties.

The representation of the model is presented in Figure 12.

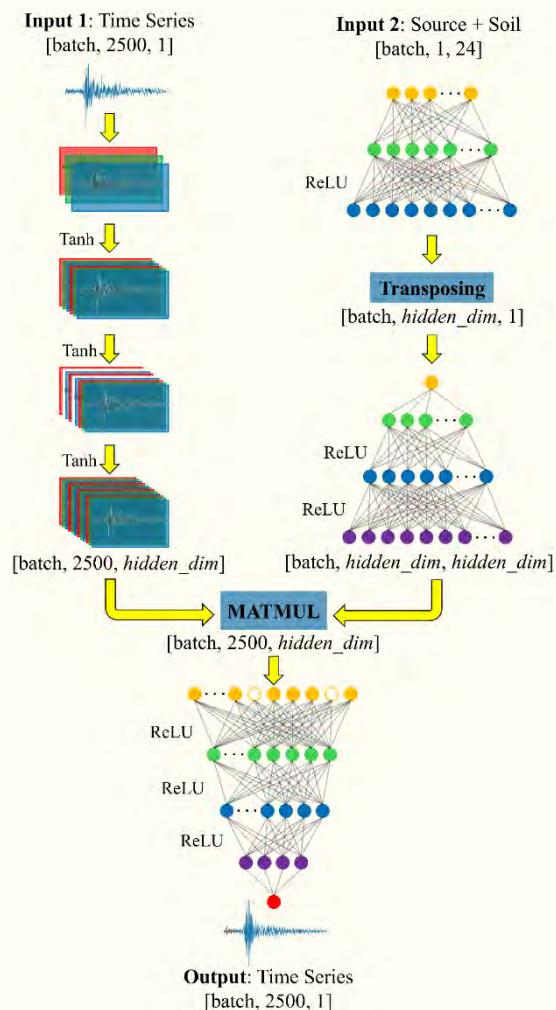


Figure 12: Representation of the CNN-MLP model.

The loss function used diverges from conventional methods to accommodate the distinct nature of seismic records, where data

tends to cluster near zero rather than at peak values.

All surface time series data are normalized to absolute values (constrained between 0 and 1). Each normalized series is then segmented into 20 equal zones, with each zone representing 5% of the total amplitude range (see Figure 13).

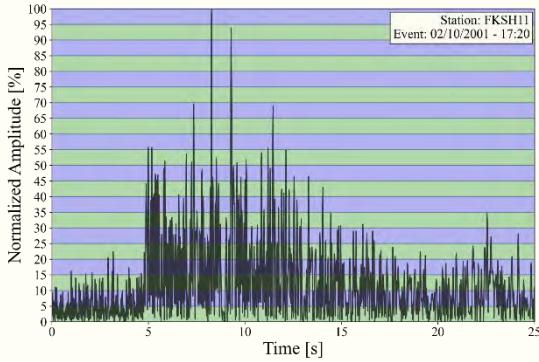


Figure 13: Example of normalized time series in terms of amplitude, segmented into 20 zones (5% each.)

Next, a histogram is constructed to quantify the distribution of elements within each zone across all surface time series, aiming to assess the overall data magnitude where a significant proportion of values are near zero. Figure 14 depicts the histogram illustrating data distribution across the 20 zones of all surface time series.

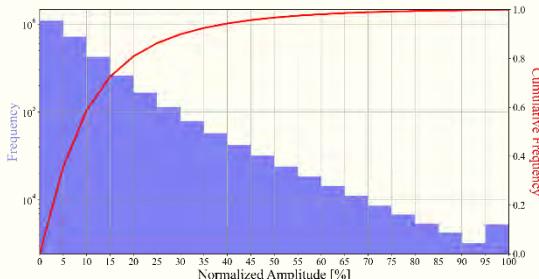


Figure 14: Distribution of values in each zone (5% each) across all surface time series.

To ensure an unbiased representation across all amplitude zones and to enhance the importance of PGA values, which are crucial in seismic analysis, an amplification function is applied to the histogram presented in Figure 14. Figure 15 illustrates this amplification function, which regularizes the importance of each zone's magnitude within the histogram.

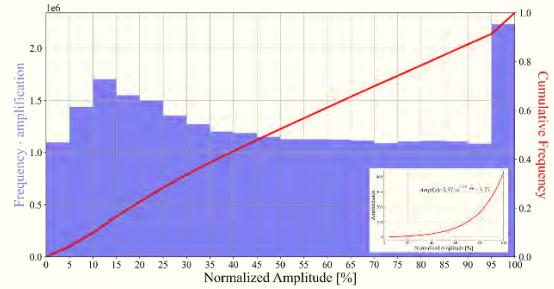


Figure 15: Distribution of values in each zone (5% each) across all surface time series after applying the amplification function.

Consequently, the final loss function is defined by integrating three components, and it is masked to exclude values corresponding to padding:

- Mean Absolute Error (*MAE*)
- Mean Squared Error (*MSE*)
- Amplified Mean Squared Error (*AMSE*): Corresponding to *MSE* multiplied by the amplification function shown in Figure 15.

The final loss function is the sum of the three loss functions mentioned above. Finally, the model's performance was optimized through iterative fine-tuning to select the most effective hyperparameters (Table 2).

Table 2: Hyperparameters of the final model.

Optimizer	Learning Rate	Early Stopping	Hidden Dimension	Kernel Size CNN
RMSprop (Root Mean Squared Propagation)	0.0001	Patience = 30 Tolerance = 0.2	64	101

The Index of Agreement (*d*) will be used as the predictive parameter (see Eq. 2). This index corresponds to a standardized metric used to quantify the degree of error in predictive models. This index varies between the values 0 and 1, where a value of 1 signifies perfect agreement between model predictions (P_i) and observed data (O_i), while 0 indicates complete disagreement (Willmott, 1981). This index acts as a normalized indicator of the prediction error derived from the ratio between the mean square error (MSE) and the potential error. It allows for a comprehensive model performance evaluation by considering systematic and random disparities between observed and modeled data.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, \quad \text{Eq. 2}$$

$$0 \leq d \leq 1$$

In Eq. 2 O_i represents observation values, P_i denotes forecast values, \bar{O} signifies the average observation values and n the total number of samples.

This estimator is particularly effective for time series analysis due to its normalization, enabling realistic comparisons independent of record magnitudes.

4.- Model Performance and Validation

This chapter presents the results derived from the DNN model, with a primary focus on predicting surface accelerations. The analysis is comprehensive, emphasizing the performance on the testing set, and validating predictions using various intensity measures (proxies). To provide a balanced overview of the model's capabilities and limitations, nine specific cases - three lowest, three median, and three highest Index of Agreement scores - were selected for detailed discussion.

The testing set, which constitutes 19% of the total database (385 records), included records with lengths ranging from 500 to 2,500 samples. The performance metric used was the Index of Agreement (d).

The distribution of the Index of Agreement values showed an average prediction value of 0.723, with the mode observed at approximately 0.75. Figure 16 shows the index of agreement for the training set, with a clear upward trend until reaching the mode.

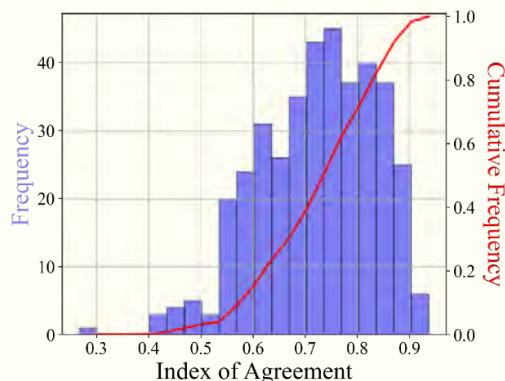


Figure 16: Histogram Index of Agreement for the testing set.

When visually inspecting the predicted time series, records with median and highest Index of Agreement scores exhibited a strong fit, closely resembling the original recorded data. Although records with lower agreement scores lacked precise waveform matching, they successfully captured the overall dynamic characteristics of the soil surface seismic response. Figure 17 to Figure 19 depicts the time series with the three lowest, three median, and three highest predictions according to the Index of Agreement.

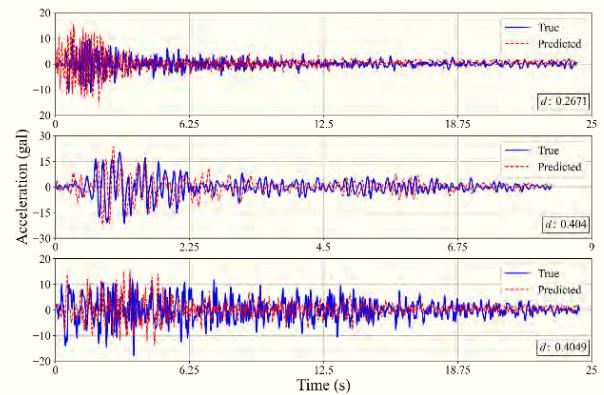


Figure 17: Three time series from the testing set with the lowest Index of Agreement values.

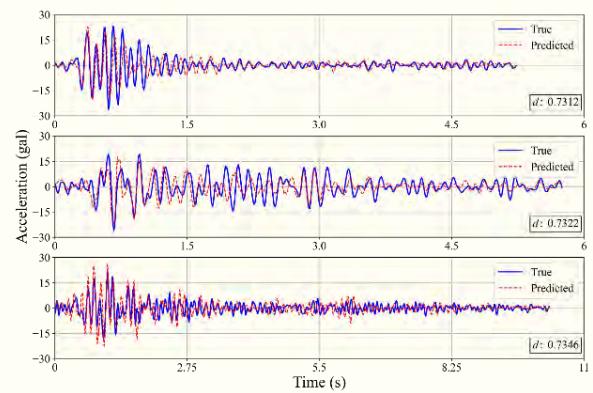


Figure 18: Three time series from the testing set with the median Index of Agreement values.

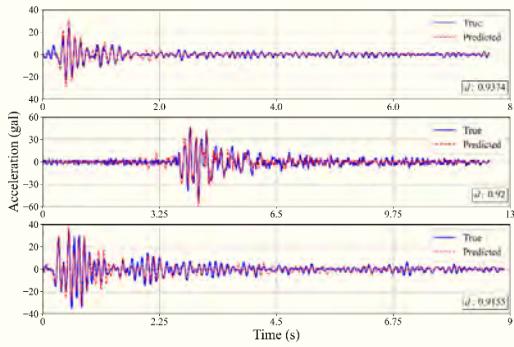


Figure 19: Three time series from the testing set with the highest Index of Agreement values.

It should be noted that no clear relationship was identified between prediction quality (d) and seismic inputs such as magnitude, epicentral distance (R_{epi}), focal depth, or PGA. However, analyzing the soil profile characteristics and borehole sensor depth revealed discernible trends in predictive performance.

However, certain common characteristics are evident when examining the soil profiles and the depth of the borehole sensors. Figure 20 illustrates the relationship between the model's predictive performance for different stations.

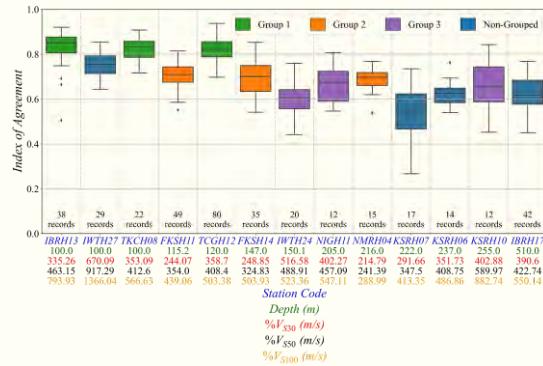


Figure 20: Index of Agreement per station with corresponding soil properties, station depth, and similar groups (testing set).

It can be observed that the best predictions are associated with stations that have shallower borehole depths, showing a slight downward trend in predictive performance as borehole depth increases. This trend is reasonable, as shallower stations are less affected by complex subsurface transformations, resulting in more accurate predictions than deeper stations.

When examining the shear wave velocities, specifically shear wave velocity at 30% of the depth of the total soil profile ($\%V_{S30}$), distinct groups emerge with similar predictive outcomes. Stations with $\%V_{S30}$ values between 200 and 250 m/s, such as NMRH04, FKSH11, and FKSH14 (see Group 2 in Figure 20) exhibit consistent predictive performance, with median Index of Agreement values around 0.7, regardless of their borehole depth.

In contrast, stations with $\%V_{S30}$ values ranging from 330 to 360 m/s, including IBRH13, TKCH08, and TCGH12 (except KSRH06) (see Group 1 in Figure 20), demonstrate the highest predictive accuracy, with median Index of Agreement values exceeding 0.8. The outlier, KSRH06, likely diverges from this group due to its differing borehole depth, indicating that, for this range of velocities, the interplay between velocity and depth plays a significant role, unlike in the previous group.

Finally, stations with $\%V_{S30}$ values between approximately 400 and 500 m/s, such as IBRH17, NIGH11, KSRH10, and IWT24 (see Group 3 in Figure 19), show a slightly inferior prediction level, with median Index of Agreement values just over 0.6. In this group, borehole depth again appears to have minimal impact on prediction accuracy.

Notably, sensors located within the same geographical zones (as indicated by the first four letters of each station's code) do not consistently correlate with prediction quality, with some sensors yield better results than others, irrespective of their location.

Secondary verification of the model's performance was conducted using key intensity measures derived from the predicted time series in the testing set.

Peak Ground Acceleration (PGA): The comparison between recorded and predicted PGAs validated the predictions satisfactorily, demonstrating a near 1:1 trend (Figure 21). A linear regression analysis confirmed this high accuracy, yielding an R^2 value of 0.86.

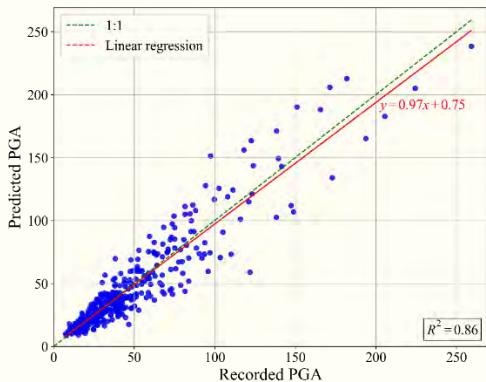


Figure 21: Comparison between predicted and recorded PGA from the testing set.

Peak Ground Velocity (PGV): The comparison for PGV levels also demonstrated a strong predictive performance. A clear 1:1 tendency was observed, resulting in an R^2 value of 0.86 (Figure 22).

Acceleration Response Spectra: The acceleration response spectra, calculated using a 5% damping ratio, were evaluated for the nine selected cases (lowest, median, and highest Index of Agreement scores) in the testing set. The analysis demonstrated that the predictions exhibited reasonable accuracy. Crucially, although spectral peaks varied slightly, the spectra maintained similar shapes, underscoring the robustness of the predictions across spectral accelerations. This consistency, combined with the strong performance in PGA and PGV ($R^2=0.86$), affirms the model's suitability for seismic design applications.

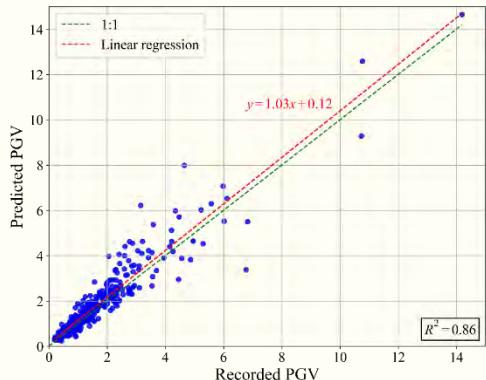


Figure 22: Comparison between predicted and recorded PGV from the testing set.

Arias Intensity: Finally, the Arias Intensity (I_A) was analyzed as a measure of the predicted energy release and its temporal evolution. This analysis revealed that the Arias Intensity values do not necessarily correlate with prediction quality (Index of Agreement). This finding indicates a potential area for future improvement by further incorporating energy properties into the model's architecture or loss function.

5.- Conclusions

This research successfully developed a CNN-MLP architecture capable of predicting surface seismic records by integrating subsurface seismic data, earthquake characteristics, and intermediate soil properties, particularly across sites classified as SH1D. The model demonstrated robust predictive performance on the primary dataset, achieving an Index of Agreement (d) averaging above 0.7 for records containing 2,500 samples or fewer.

The model's reliability is strongly evidenced by its accuracy in predicting key intensity measures, which are essential for structural design. Comparisons between predicted and recorded Peak Ground Acceleration (PGA) and Peak Ground Velocity (PGV) showed excellent coherence, yielding a linear regression fit with an R^2 value of 0.86 for both metrics. Furthermore, the predicted acceleration response spectra maintained similar shapes and demonstrated reasonable accuracy across all cases examined, including those with lower Index of Agreement scores, affirming the robustness of the predictions across spectral accelerations. This consistency suggests that the derived intensity measures generally outperform the raw predicted records in terms of reliability, making them well-suited for seismic-resistant design applications.

Analysis of the predictive performance revealed a clear dependency on site characteristics: predictions were generally associated with stations having shallower borehole depths. Furthermore, specific soil profiles exhibited varying degrees of accuracy,

with stations characterized by average shear wave velocities ($\%V_{S30}$) between 330 and 360 m/s demonstrating the highest predictive accuracy, with median Index of Agreement values exceeding 0.8. This success confirms the model's capacity for better generalization of site response across different SH1D locations using a single predictive framework.

When evaluating records outside the primary training dataset, the model showed reduced but acceptable performance. For short records, the average Index of Agreement was 0.73, with a mode of 0.85, although predictions exhibited greater variability. For long records (exceeding 2,500 samples), the predictive accuracy decreased by approximately 10%, averaging 0.619. However, a notable practical advantage was observed in the poorer-performing long records, where the model consistently predicted higher peak values than the original data. This characteristic is considered beneficial for conservative design scenarios where overestimation of seismic forces is preferred.

The implementation of a modified loss function was identified as crucial for achieving these results, as it enabled the model to prioritize the critical aspects of the seismic records, specifically the peak values, thereby mitigating overfitting and ensuring prediction robustness. The primary area identified for future refinement remains the Arias Intensity, as current values do not necessarily correlate with prediction quality, suggesting the need for adjustments to integrate energy properties more effectively. Overall, the model provides a highly effective and efficient predictive tool, particularly valuable for generating realistic, site-specific time series for performance-based design.

6.- Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support provided by the Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) through the projects Fondecyt Regular 1240503 and FOVI 230030.

7.- References

- Arias, A. (1970) 'Measure of Earthquake Intensity', pp 438-83 of *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. /Hansen, Robert J. (ed.). Cambridge, Mass. Massachusetts Inst. of Tech. Press (1970). [Preprint]. Available at: <https://www.osti.gov/biblio/4167721> (Accessed: 4 July 2024).
- Astroza, R., Pastén, C. and Ochoa-Cornejo, F. (2017) 'Site response analysis using one-dimensional equivalent-linear method and Bayesian filtering', *Computers and Geotechnics*, 89, pp. 43–54. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.04.004>
- Bergamo, P., Hammer, C. and Fäh, D. (2021) 'On the relation between empirical amplification and proxies measured at Swiss and Japanese stations: Systematic regression analysis and neural network prediction of amplification', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(1), pp. 101–120. Available at: <https://doi.org/10.1785/0120200228>
- Boore, D.M. (2006) 'Orientation-Independent Measures of Ground Motion', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), pp. 1502–1511. Available at: <https://doi.org/10.1785/0120050209>
- Huang, D. et al. (2020) 'A Modified Frequency-Dependent Equivalent Linear Method for Seismic Site Response Analyses and Model Validation using KiK-Net Borehole Arrays', *Journal of Earthquake Engineering*, 24(5), pp. 827–844. Available at: <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1453418>.
- Ji, K. et al. (2023) 'Site classification using deep-learning-based image recognition techniques', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 52(8), pp. 2323–2338. Available at: <https://doi.org/10.1002/eqe.3801>.
- Lee, Y.G. et al. (2023) 'Site amplification prediction model of shallow bedrock sites based on machine learning models', *Soil*

- Dynamics and Earthquake Engineering*, 166. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107772>
- Mercado, V., Nino, E.D. and Arteta, C.A. (2019) ‘Dynamic Site Response Characterization Via Bayesian Inference: Analysis of the SGC Station Deposit in Bogota, Colombia’, *Journal of Earthquake Engineering*, 23(10), pp. 1629–1650. Available at: <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1387192>.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019) ‘K-NET, KiK-net’. Available at: <https://doi.org/10.17598/nied.0004>.
- Paz, M. (1991) ‘Response Spectra’, in *Structural Dynamics: Theory and Computation*. Boston, MA: Springer US, pp. 170–198. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7918-2_8
- Roten, D. and Olsen, K.B. (2021) ‘Estimation of site amplification from geotechnical array data using neural networks’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(4), pp. 1784–1794. Available at: <https://doi.org/10.1785/0120200346>
- Shannon, C.E. (1949) ‘Communication in the Presence of Noise’, *Proceedings of the IRE*, 37, pp. 10–21. Available at: <https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969> (Accessed: 4 July 2024).
- Stewart, J.P., Afshari, K. and Goulet, C.A. (2017) ‘Non-ergodic site response in seismic hazard analysis’, *Earthquake Spectra*, 33(4), pp. 1385–1414. Available at: <https://doi.org/10.1193/081716EQS135M>.
- Thompson, E.M. et al. (2012) ‘A taxonomy of site response complexity’, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, pp. 32–43. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.04.005>.
- Willmott, C.J. (1981) ‘On The Validation Of Models’, *Physical Geography*, 2(2), pp. 184–194. Available at: <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.
- Zhu, C. et al. (2022) ‘How well can we predict earthquake site response so far? Site-specific approaches’, *Earthquake Spectra*, 38(2), pp. 1047–1075. Available at: <https://doi.org/10.1177/87552930211060859>.
- Zhu, C. et al. (2023) ‘How well can we predict earthquake site response so far? Machine learning vs physics-based modeling’, *Earthquake Spectra*, 39(1), pp. 478–504. Available at: <https://doi.org/10.1177/87552930221116399>
- Arias, A. (1970) ‘Measure of Earthquake Intensity’, pp 438–83 of *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. /Hansen, Robert J. (ed.). Cambridge, Mass. Massachusetts Inst. of Tech. Press (1970). [Preprint]. Available at: <https://www.osti.gov/biblio/4167721> (Accessed: 4 July 2024).
- Astroza, R., Pastén, C. and Ochoa-Cornejo, F. (2017) ‘Site response analysis using one-dimensional equivalent-linear method and Bayesian filtering’, *Computers and Geotechnics*, 89, pp. 43–54. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.04.004>
- Bergamo, P., Hammer, C. and Fäh, D. (2021) ‘On the relation between empirical amplification and proxies measured at swiss and japanese stations: Systematic regression analysis and neural network prediction of amplification’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(1), pp. 101–120. Available at: <https://doi.org/10.1785/0120200228>
- Boore, D.M. (2006) ‘Orientation-Independent Measures of Ground Motion’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), pp. 1502–1511. Available at: <https://doi.org/10.1785/0120050209>
- Huang, D. et al. (2020) ‘A Modified Frequency-Dependent Equivalent Linear Method for Seismic Site Response Analyses and Model Validation using KiK-Net Borehole Arrays’, *Journal of Earthquake*

- Engineering*, 24(5), pp. 827–844. Available at: <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1453418>
- Ji, K. et al. (2023) ‘Site classification using deep-learning-based image recognition techniques’, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 52(8), pp. 2323–2338. Available at: <https://doi.org/10.1002/eqe.3801>.
- Lee, Y.G. et al. (2023) ‘Site amplification prediction model of shallow bedrock sites based on machine learning models’, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 166. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107772>
- Mercado, V., Nino, E.D. and Arteta, C.A. (2019) ‘Dynamic Site Response Characterization Via Bayesian Inference: Analysis of the SGC Station Deposit in Bogota, Colombia’, *Journal of Earthquake Engineering*, 23(10), pp. 1629–1650. Available at: <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1387192>
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019) ‘K-NET, KiK-net’. Available at: <https://doi.org/10.17598/nied.0004>.
- Paz, M. (1991) ‘Response Spectra’, in *Structural Dynamics: Theory and Computation*. Boston, MA: Springer US, pp. 170–198. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7918-2_8
- Roten, D. and Olsen, K.B. (2021) ‘Estimation of site amplification from geotechnical array data using neural networks’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(4), pp. 1784–1794. Available at: <https://doi.org/10.1785/0120200346>.
- Shannon, C.E. (1949) ‘Communication in the Presence of Noise’, *Proceedings of the IRE*, 37, pp. 10–21. Available at: <https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969> (Accessed: 4 July 2024).
- Stewart, J.P., Afshari, K. and Goulet, C.A. (2017) ‘Non-ergodic site response in seismic hazard analysis’, *Earthquake Spectra*, 33(4), pp. 1385–1414. Available at: <https://doi.org/10.1193/081716EQS135M>
- Thompson, E.M. et al. (2012) ‘A taxonomy of site response complexity’, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, pp. 32–43. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.04.005>.
- Willmott, C.J. (1981) ‘On The Validation Of Models’, *Physical Geography*, 2(2), pp. 184–194. Available at: <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Zhu, C. et al. (2022) ‘How well can we predict earthquake site response so far? Site-specific approaches’, *Earthquake Spectra*, 38(2), pp. 1047–1075. Available at: <https://doi.org/10.1177/87552930211060859>.
- Zhu, C. et al. (2023) ‘How well can we predict earthquake site response so far? Machine learning vs physics-based modeling’, *Earthquake Spectra*, 39(1), pp. 478–504. Available at: <https://doi.org/10.1177/87552930221116399>.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

ALSTOM CHILE S.A.

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CIA. DE PETROLEOS DE CHILE COPEC S.A.

COLBÚN S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

GUZMÁN Y LARRAÍN VIVIENDAS ECONÓMICAS 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.

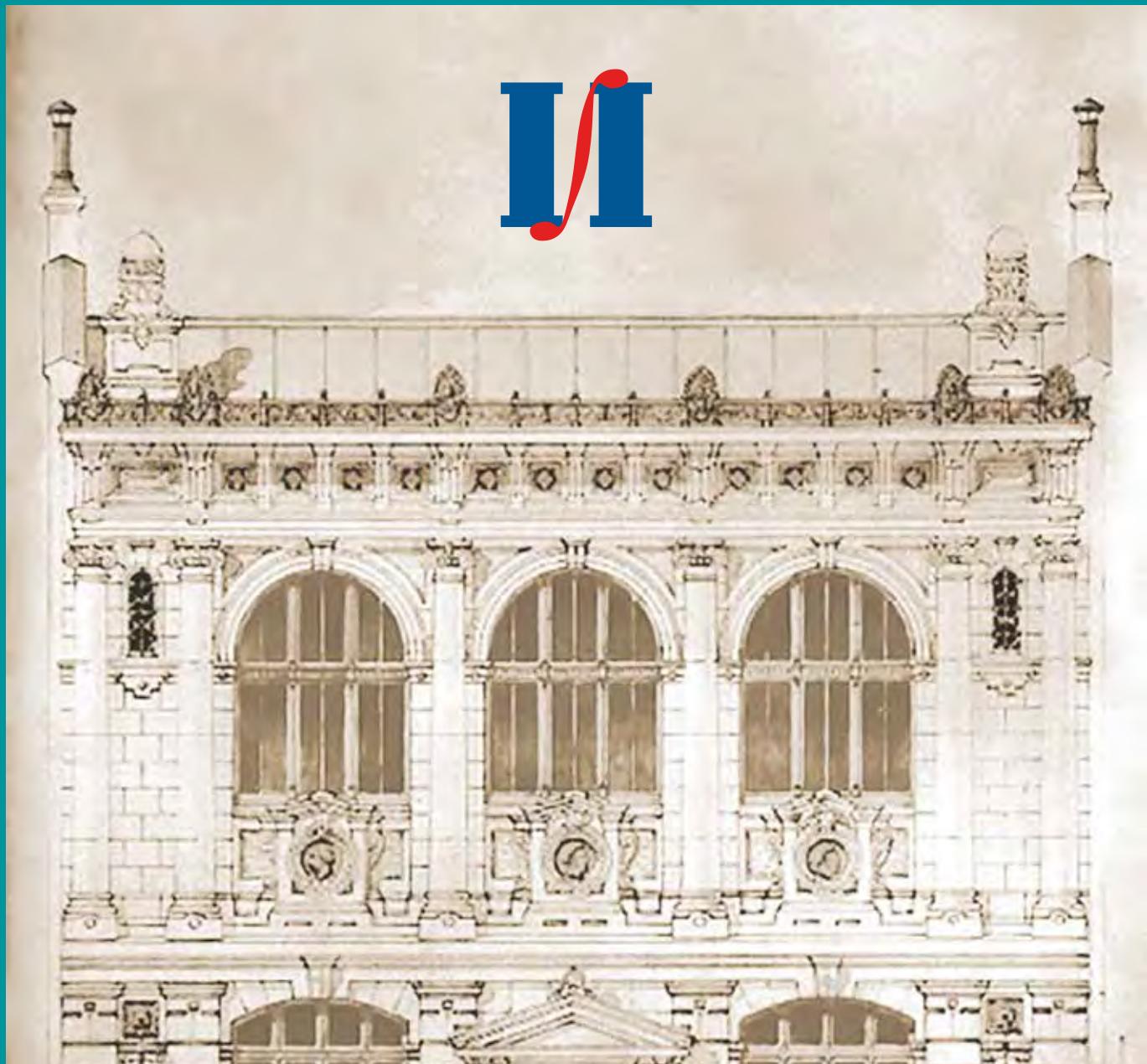
ARCADIS CHILE S.A.

IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX 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