

Revista Chilena de INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 - N° 494 - Diciembre 2021



Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 133, N° 3 - ISSN 0716 - 2340

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros (UPADI)

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

Ricardo Nicolau del Roure G.

Primer Vicepresidente

Luis Nario Matus

Segundo Vicepresidente

Carlos Mercado Herreros

Tesorera

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Protesorero

Jorge Pedrals Guerrero

Secretaria

Ximena Vargas Mesa

Prosecretario

Germán Millán Valdés

DIRECTORIO 2021

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Fernando Bravo Fuenzalida

Juan Carlos Barros Monge

Juan E. Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Alejandra Decinti Weiss

Álvaro Fischer Abeliuk

Rodrigo Gómez Álvarez

Mauro Grossi Pasche

Cristian Hermansen Rebolledo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Valdés

Marcela Munizaga Muñoz

Juan Music Tomicic

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

Daniela Pollak Aguiló

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

René Vásquez Canales

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: Jorge Carvallo W.

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

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA, **SOCHID**.

Presidente: Scarlett Vásquez P.

SOCIEDAD CHILENA
DE GEOTECNIA, **SOCHIGE**.

Presidente: Gonzalo Montalva A.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
DE TRANSPORTE, **SOCHITRAN**.

Presidenta: Carolina Palma A.

PMI SANTIAGO CHILE CHAPTER.

Presidente: Alfonso Barraza San M.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN
EN INGENIERÍA, **SOCHEDI**.

Presidente: Raúl Benavente G.

COMISIONES DEL INSTITUTO

**INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Y EL BIG DATA.**

Presidente: Juan Carlos Barros M.

**INGENIEROS EN LA HISTORIA
PRESENTE.**

Presidente: Ricardo Nanjarí R.

**CALIDAD DE LA INGENIERÍA
EN PROYECTOS DE INVERSIÓN.**

Presidente: Ricardo Nicolau del Roure G.

PROSPECTIVAS DE LA INGENIERÍA.

Presidente: Jorge Yutronic F.

**EL ESTADO, SU EFICIENCIA,
SU ROL Y LOS DESAFÍOS FUTUROS.**

Presidente: Jorge Pedrals G.

CONSEJO CONSULTIVO

Raquel Alfaro Fernandois

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Jorge Cauas Lama

Joaquín Cordua Sommer

Alex Chechilnitzky Zwicky

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Agustín León Tapia

Nicolás Majluf Sapag

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Pérez

Guillermo Noguera Larraín

Luis Pinilla Bañados

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazin Arellano

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Solano Vega Vischi

Hans Weber Münnich

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



Nuestra portada

Los Premios que el Instituto confiere, anual o periódicamente, son una acción a la que nuestra Corporación otorga suma importancia y dedicación. Premios que honran a quienes los reciben y, al mismo tiempo, honran al propio Instituto. Nuestra portada muestra un collage con fotografías de los premiados en 2021, donde se destaca el Ingeniero Medalla de Oro. Felicitaciones a todos.

REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 494, diciembre de 2021

Dirección: San Martín N° 352, Santiago
Teléfonos: 22696 8647 - 22698 4028 - 22672 6997
www.iing.cl • e-mail: iing@iing.cl

DIRECTOR

Raúl Uribe S.

CONSEJO EDITORIAL

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

REPRESENTANTE LEGAL

Ricardo Nicolau del Roure G.
Dirección: San Martín N° 352, Santiago

SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

EDITORIAL

Pág. 2

EL ROL DEL HIDRÓGENO VERDE EN EL DESARROLLO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES DE CHILE

Pág. 3

Conferencia del Sr. Rodrigo Palma Behnke,
Director del Centro de Energía de la FCFM
de la Universidad de Chile.

LA DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR COMO UNA OPCIÓN ESTRATÉGICA PARA EL FUTURO DE CHILE

Pág. 20

Conferencia del Sr. Carlos Foxley, Asociación
Chilena de Desalinización A.G., ACADES.

PREMIO

“MEDALLA DE ORO – AÑO 2021”

Pág. 44

Al Sr. Nicolás Majluf Sapag.

PREMIO

“AL INGENIERO POR ACCIONES DISTINGUIDAS – AÑO 2021”

Pág. 59

Al Sr. Hernán de Solminihac Tampier.

PREMIO

“RAÚL DEVÉS JULLIAN – AÑO 2021”

Pág. 64

Al Sr. Juan Carlos de la Llera Martin.

PREMIO

“RAMÓN SALAS EDWARDS – AÑO 2021”

Pág. 75

Al trabajo: “Sistema de Automatización para
Cargadores Frontales de Bajo Perfil”.

PREMIO A LOS ALUMNOS DESTACADOS DE INGENIERÍA CIVIL – AÑO 2021

Pág. 82

- Premio Marcos Orrego Puelma.
- Premio Ismael Valdés Valdés.
- Premio Roberto Ovalle Aguirre.

ENTREVISTA

A INGENIEROS DESTACADOS

Pág. 87

- Sra. Raquel Alfaro Fernandois
 - Sr. Francisco Brieva Rodríguez
- Comisión de Ingenieros en la Historia Presente
Presidente: Ricardo Nanjarí R.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE RECIBE PREMIO NACIONAL 2021 DEL COLEGIO DE INGENIEROS DE CHILE A.G. – CATEGORÍA INSTITUCIÓN

Pág. 92

RECONOCIMIENTO A NUESTROS SOCIOS

Pág. 94

En las conferencias de agosto y octubre de este año del Instituto de Ingenieros de Chile, se abordaron temas de gran relevancia, relacionados con las aplicaciones del **Hidrógeno Verde** y con la **Desalinización del Agua de Mar**, indispensables para combatir los graves problemas que sufre el planeta, derivados principalmente del calentamiento global. En ambos temas Chile tiene mucho que ofrecer, por la amplitud y volumen de sus recursos de energías renovables eólica, solar e hidráulica, que constituyen una singularidad a nivel mundial, avalada internacionalmente.

En agosto de 2021, el Ing. Rodrigo Palma Behnke, Director del Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, dictó la conferencia **El Rol del Hidrógeno Verde en el Desarrollo de las Energías Renovables de Chile**.

Su primer aporte consistió en precisar que el hidrógeno es un portador energético y no otra fuente energía propiamente tal. Hecha esta aclaración, señaló que hoy estamos muy conscientes de que los temas del cambio del clima van a ser parte de algo que vamos a enfrentar en paralelo con la necesidad de mitigar, destacando que Chile ha estado activo en ello, debido a su amplia disposición de recursos de energías renovables.

El Hidrógeno Verde, a partir de electricidad generada por las fuentes renovables, es una suerte de portador energético para distintas aplicaciones, por ejemplo, en el transporte, donde con la electricidad no se pudo llegar con tanta facilidad, o para exportar combustible a otros lugares donde tampoco se pudo acceder con las interconexiones eléctricas directamente. Entonces, este camino del hidrógeno permite generar muchas opciones, que no solamente son la energía, y que, en su empleo a gran escala, debe ser sinérgicamente compatible con la de pequeña escala, constituyendo una apuesta hacia un mundo sostenible, que trascienda los diferentes Gobiernos.

A fines de octubre, el Ing. Carlos Foxley, Presidente de la Asociación Chilena de Desalinización (ACADES), dictó una conferencia denominada **La Desalinización de Agua de Mar como una Opción Estratégica para el Futuro de Chile**.

Señaló en su presentación que ACADES es una institución formada por organizaciones diversas relacionadas con esta tecnología: Universidades, Centros de Investigación y usuarios en general. Se refirió al cambio climático y su efecto preponderante en la zona central de Chile; explicó lo que se entiende por desalinización, señalando que se han desarrollado tecnologías de origen térmico y de membranas o filtración.

ACADES se ha propuesto la misión de promover el desarrollo de la desalinización como una fuente de agua fresca para Chile, mediante una solución eficiente, sustentable y asequible para todo el mundo. Porque el problema es: ¿Qué pasaría si el déficit de lluvia y por consiguiente la sequía continúa o crece en los próximos años, poniendo en duda la factibilidad de contar con el recurso hídrico para riego?

En esta edición se incluye la presentación completa de ambas conferencias, difíciles de resumir en esta Editorial, por lo que invitamos a leerlas con detención.

Una especial y destacada mención debe hacerse al Premio Nacional que el Colegio de Ingenieros de Chile A.G., otorgó este año al Instituto de Ingenieros de Chile, en categoría Institución. Los agradecimientos y unas breves palabras dichas por el Presidente Ricardo Nicolau del Roure, al recibir la comunicación de su otorgamiento, se encuentran contenidas en el cuerpo principal de este número. Asimismo, se incluyen los galardones que este año entregó nuestra Institución: el Premio Medalla de Oro; los Premios “Al Ingeniero por Acciones Distinguidas”, “Raúl Devés Jullian”, “Ramón Salas Edwards” y los Premios a los ingenieros jóvenes: “Marcos Orrego Puelma”, “Roberto Ovalle Aguirre” e “Ismael Valdés Valdés”.

EL ROL DEL HIDRÓGENO VERDE EN EL DESARROLLO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES DE CHILE

Conferencia del Sr. Rodrigo Palma Behnke, Director del Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile



Sr. Rodrigo Palma.

El día martes 31 de agosto de 2021 a las 11:00 horas, vía Zoom, ante una gran asistencia de personalidades del ámbito público, académico y privado se realizó la conferencia del Sr. Rodrigo Palma Behnke, Director del Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, con el tema “El Rol del Hidrógeno Verde en el Desarrollo de las Energías Renovables de Chile”.

El Sr. Rodrigo Palma es Ingeniero Civil de Industrias con mención en Electricidad y Magister en Ciencias de la Ingeniería de la P. Universidad Católica de Chile, Dr.-Ing. de la Universidad de Dortmund de Alemania. Desde el año 1999 es académico de la Universidad de Chile. Es Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Director del Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Su campo de investigación –el que se ha traducido en más de 100 publicaciones en revistas especializadas a nivel internacional– cubre el diseño, la planificación y operación de sistemas eléctricos de potencia en mercados competitivos; soluciones energéticas descentralizadas, energías renovables, particularmente energía solar; y el desarrollo de herramientas de apoyo a la docencia. Dicta cátedras de sistemas eléctricos de potencia, mercados energéticos de la Universidad de Chile y Taller de Proyecto en Energías Renovables. Fue coordinador de investigación del proyecto MAPS Chile y ha participado en variados estudios para el Gobierno y empresas del sector eléctrico en Chile y en el extranjero, además de haber sido miembro del Comité de Expertos y Panel de Expertos de la Ley General de Servicios Eléctricos en Chile. Participó en la Comisión Asesora de Desarrollo Eléctrico (CADE) y en el Comité Consultivo de Energía 2050 constituido por el Ministerio de Energía, encabezado por el Ministro Máximo Pacheco. Actualmente es miembro del Comité Científico de Cambio Climático convocado por el Ministro Andrés Couve.

Rodrigo Palma también es senior member del IEEE y Past Presidente de la Sección Chile del IEEE en tres períodos. Asimismo, es Investigador Principal del Centro de Excelencia FONDAP-ANID de Energía Solar SERC-Chile.

El Presidente.

—Sean bienvenidos a la conferencia mensual del Instituto de Ingenieros de Chile; como es nuestra costumbre y muy fiel al espíritu fundacional y la misión que tiene el Instituto de Ingenieros de Chile, siempre intentamos mostrar y presentar los temas de actualidad en los campos de la Ingeniería, la Ciencia y la Tecnología. Hoy tendremos la oportunidad de escuchar una conferencia sobre el “Rol del Hidrógeno Verde en el desarrollo de las energías renovables”, a cargo del Profesor Titular del Departamento de Energía Eléctrica y Director del Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, el Profesor Rodrigo Palma Behnke.

La presentación del Profesor Palma la hará nuestro Director, don Cristian Hermansen.

Sr. Cristian Hermansen.

—Muchas gracias Presidente y muy buenos días a los asistentes. Tengo el agrado de presentar al Doctor Rodrigo Palma Behnke, que desde el año 1999 es académico de la Universidad de Chile. Rodrigo Palma es Profesor Titular del Departamento de Energía Eléctrica y actualmente es Director Fundador del Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile; es Ingeniero Civil de Industrias con mención Electricidad y Magíster en Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, además Doctor Ingeniero de la Universidad de Dortmund en Alemania. Tiene un amplio currículo en investigación con más de cien publicaciones en revistas especializadas, también en el diseño, planificación y operación del sistema eléctrico de potencia en mercados competitivos, soluciones energéticas descentralizadas, energía renovable, particularmente energía solar y desarrollo de herramientas de apoyo a la docencia. Dicta cátedras del Sistema Eléctrico de Potencias, del Mercado Eléctrico en la Universidad de Chile y también el Taller de Proyecto en Energías Renovables; es Profesor del Diplomado de Regulación del Sector Eléctrico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Ha participado en varios estudios para el Gobierno y empresas del sector eléctrico en Chile y en el extranjero, fue miembro del Comité de Expertos y uno de los primeros integrantes del panel de expertos de la Dirección General del Servicio Eléctrico, también participó en la Comisión Asesora de Desarrollo Eléctrico

y del Comité Consultivo de Energía 20-50, constituido por el Ministerio de Energía, y encabezado por el ex Ministro Sr. Pacheco.

Actualmente, miembro del Comité Científico de Cambio Climático convocado por el Ministro Andrés Couve. Rodrigo no está solo en la parte de docencia, en la investigación sino también desde muchos años ha participado en políticas públicas: energía, ambiente y cambio climático. Pertenece a la Asociación de Ingenieros Eléctricos de Estados Unidos e Investigador principal del Centro de Excelencia de Energía Solar SERC Chile, y muchas cosas más. Pero, Rodrigo se preocupa de cosas terrenas, participó en el año 2006 en el proyecto del primer auto solar de Chile, y apoyando a los alumnos de Mecánica de la Universidad de Chile; fueron a competir a Australia, en condiciones muy austeras. También participó en un proyecto en el 2010 en un poblado en Iquique, que no tenía electricidad las 24 horas del día e hicieron un Sistema que ahora llamamos microrredes combinando energía solar, eólica, almacenamiento. En nuestro Instituto, Rodrigo ha contribuido con bastantes papers para los Anales del Instituto de Ingenieros.

Sr. Rodrigo Palma.

—Este desafío hoy día está muy vigente, habiendo muchas personas hablando sobre hidrógeno verde así que espero no mencionar muchos lugares comunes. En ese sentido, hemos hecho un esfuerzo con uno de mis alumnos de magister, Carlos Alvear, que está trabajando en estas temáticas, para ver si podemos agregar un poco de valor a esta discusión nacional, que está sometida a mucha información que sin duda varios de ustedes ya conocen y que, intento ahora resumir en una mirada quizás desde la Academia.

El Hidrógeno Verde es más bien habilitante a nuestras energías renovables y no al revés, cómo parece que se escuchaba. Se hace referencia al hidrógeno como si fuera otra fuente de energía y en este ámbito de ingenieros, estamos claros que es un portador energético, y no corresponde a una fuente energía propiamente tal (Figura 1).

Los saludo desde el Centro de Energía, ahí están nuestras instalaciones, que desgraciadamente hemos podido usar poco desde que se inauguraron el año 2019. Las usamos algunos meses, pero también los invitamos a contactarnos y poder seguir la aventura en los temas energéticos. Ese es

nuestro lugar hoy día, donde este equipo humano habita en esta iniciativa que comienza el año 2009, que hoy día es formalmente un Centro de Facultad y se constituye como el Centro de Energía de la Universidad de Chile (Figura 2).



Figura 1



Figura 2

Lo primero que deseo comentarles, en términos de contexto de esta temática, es que el Informe reciente IPCC no hace más que confirmar algo que se viene diciendo hace ya bastante tiempo, pero el mensaje adicional es la evidencia de que estos eventos extremos se asocian al cambio climático y que hasta ahora se pensaba que podrían ocurrir más en el futuro. Hoy día estamos muy conscientes de que los temas del cambio del clima van a ser parte de algo que vamos a enfrentar en paralelo con la necesidad de mitigar. Y Chile ha estado activo en esto, en mayo del año 2020 se envió la actualización de lo que se llama la NDC, los compromisos nacionalmente determinados, que emanan del acuerdo de París y que en términos muy resumidos constituyeron el siguiente cambio en nuestra postura como país. Primero fue definir un presupuesto de carbono, es decir, todo lo

que vamos a emitir en estos 11 años no debe superar los 1.100 millones de toneladas de CO₂. Entonces, tenemos un camino no fácil, porque si bien es mantener lo de hoy día, mantenerlo en un país creciendo haría que las proyecciones fueran por la línea roja y para poder ir derivando a esta línea verde que permitiría generar un conjunto de emisiones que al año 2050 sea en torno a los 65 millones de toneladas para poder lograr la carbono neutralidad, que es lo que establecen cuando uno a esa emisión se le restan, la captura del sector básicamente forestal, de las plantaciones (Figura 3). Este es el desafío de Chile, tenemos una meta al 2030 de 95 millones de toneladas y un máximo de emisiones al año 2025. Si bien pensamos que el máximo ya lo pasamos, en este mundo cambiante podría ser que esto no suceda. Entonces, en este contexto donde Chile enfrenta un desafío y tiene que ver la capacidad de responder de alguna forma a ese desafío, nosotros estamos siendo evaluados en el mundo por distintas instituciones y la apreciación de Chile por una institución bastante popular que se llama, Climate Action Track (Figura 4), y es que todavía tenemos una condición de “insuficientes”.

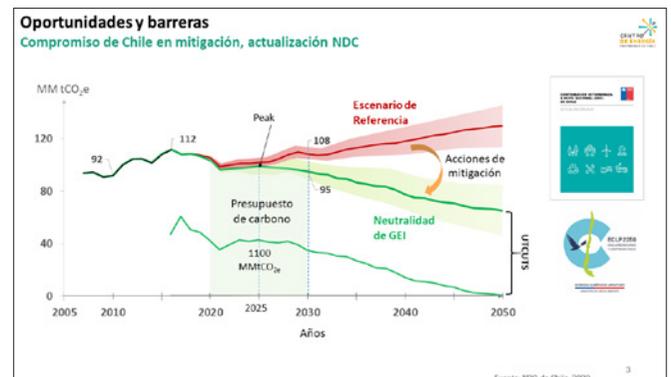


Figura 3



Figura 4

Si bien nos acercamos a la compatibilidad de los 2 grados, lo que estamos proponiendo no permite ser compatible con 1,5 grados, que es la meta. Recuerden que llevamos un aumento de temperatura del planeta con respecto a la era preindustrial de 1,2, valor muy cercano a 1,5. Es el desafío para lograr mitigar de alguna forma estos cambios climáticos que van a tener consecuencias graves.

Entonces ese es el contexto que estamos viviendo que yo no lo quería minimizar como para hablar o darle un preámbulo al tema del hidrógeno. Entonces surge la gran pregunta ¿Qué puede hacer Chile? Podemos hacer muchas cosas, entre cambios culturales y cambios de hábitos, etcétera. Pero hay una herramienta sobre la cual quiero profundizar, que es muy relevante dentro de este conjunto de acciones que tenemos que seguir como país y para las cuales se está desarrollando esta estrategia climática a largo plazo, que como saben fue sometida a consulta ciudadana hace poco tiempo. Y esa gran estrategia tiene que ver con nuestro recurso de energías renovables, que es realmente una singularidad a nivel mundial y que está avalado por estudios como los que ven citado abajo (Figura 5) y otras informaciones adicionales que han aparecido. Este estudio es como la información más completa que se tiene desde el año 2015 sobre el potencial. Fue solicitado por el Ministerio de Energía GIZ, y realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y permitió disponer de este número cercano a los 1800 GW de potencia. Y tener la referencia para estos números tan grandes, si uno suma el potencial hasta Chiloé, que es hasta donde se realizó el cálculo, se suma solo la estimación de la energía eólica que hizo pública el Ministerio de Energía de 126 GW adicionales en energía eólica uno llega fácilmente a valores sobre los 2000 GW de potencial. Eso se compara con el potencial instalado de energías renovables que al día de hoy es en torno a los 28 GW. Entonces ustedes ven que es impresionante, tenemos en torno a un 1,5% del potencial instalado en máquinas de generación del potencial que podríamos desarrollar.

Como ustedes ven, para el potencial solar ni siquiera está considerado todo lo que se puede hacer a nivel de la región metropolitana y al sur, y sabemos qué en torno a Santiago, existen proyectos ya desarrollados. Entonces, para los que quizá no están relacionados a ese sector es importante resaltar que de esos 28 GW hoy día existen, en torno a 14 GW en torno a energías renovables (incluye la generación hidráulica) y la otra mitad son básicamente instalaciones con máquinas a base de combustibles fósiles,

entiéndase energía a base de carbón, termoeléctrica, gas natural y diésel, etcétera.

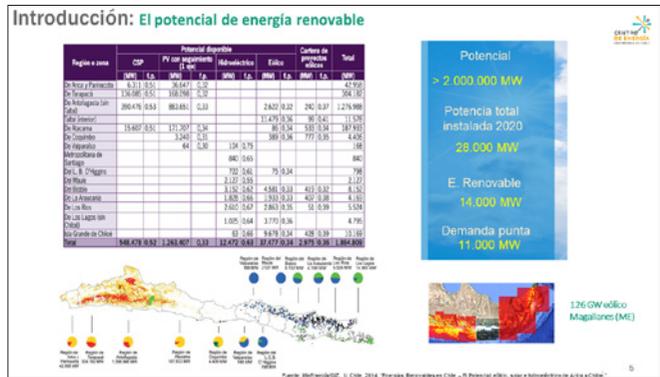


Figura 5

Como vemos existe una posibilidad única de poder afrontar nuestro desarrollo futuro a partir de este regalo de la naturaleza de manera responsable.

La demanda de punta, ya que también se está hablando de racionamiento, es de 11 GW, por lo cual el sistema está bastante bien preparado para afrontar el requerimiento energético (28 GW), más allá de los temas hídricos que están presentes hoy.

Avanzando en esta lógica, quiero mostrar acá una primicia referida al desempeño de nuestras energías renovables del año 2020. Acá tomamos todo el potencial de energía renovable, solar arriba a la derecha, eólica a la izquierda (Figura 6), y observamos cómo operó realmente durante todo el año 2020, separado en verano, otoño, invierno y primavera y poniendo cada día (en datos horarios) como una forma más gráfica. Esto no es una simulación, es lo que operó nuestro sistema. Una cosa es tener el potencial y lo otro es tener la calidad observada. Muy pocos países pueden mostrar una generación solar agregada de esta característica todos los días. Se aprecia que la mayoría las centrales tienen seguimiento en un eje o sino la curva no sería tan cuadrada y sería más como una función senoidal como de seguro han visto en las generaciones de las casas.

Por su parte, la energía eólica, como ven es bastante más variable, pero también se aprecian cosas interesantes como la complementariedad que es un concepto que hemos trabajado muy poco en Chile entre nuestras energías renovables. En este caso en primavera, cuando el sol ya

no está, estamos acá más allá de las siete de la tarde y el aporte de la energía eólica aparece con mayor fuerza y esas complementariedades se aprecian más o menos bien aquí donde se extienden en primavera, donde hago la suma de las dos, son elementos relevantes de ir conociendo.

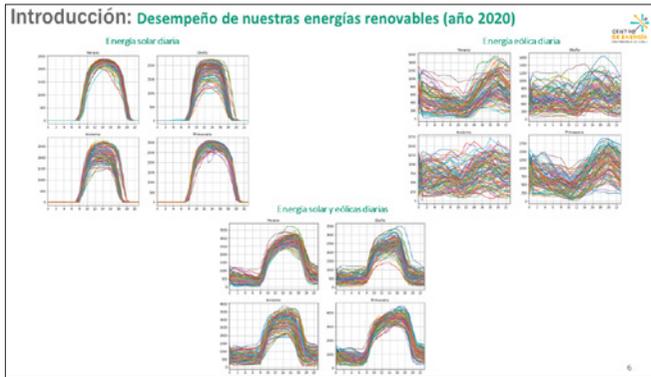


Figura 6

Tenemos un potencial gigante y tenemos un recurso que ya ha demostrado su constancia y su estabilidad, particularmente en el caso del sol en términos de variabilidad, pero también en los montos que aportan al sistema, eso es un segundo elemento. El tercer elemento se refiere a los costos. Como ayer conocimos el resultado de las licitaciones, probablemente varios lo vieron en la prensa, tomé de un par de láminas: fuentes CNE a la derecha y acá de BNamericas (Figura 7), que mostró un gráfico interesante de como en USD/MWh en los últimos años hemos visto un descenso permanente, que es un buen indicador de la competitividad de nuestras energías. Casi todas estas últimas licitaciones son a base de energías renovables, eólica, solar e hidráulica, y ven ustedes que ayer tuvimos esta gran sorpresa de Canadian Solar (14 USD/MWh) de algo que está dando la vuelta al mundo. La energía comprometida en la licitación va a llegar a valores bajo los 30 USD/MWh, eso es lo que se estima. Entonces: potencial gigante, una buena cantidad de recursos y a costos que cada vez son más impresionantes. Esos tres elementos son la base de una historia que tenemos que contar y sobre la cual ha estado desarrollándose esto en el Chile, y ahora sí viene acá un primer matiz.

Esta lámina la hicimos con la intención de mostrarles cómo somos un país bueno para las modas (Figura 8). Rescatamos en el año 2008; yo de hecho participé en el proyecto Domeyko Energía, que teníamos en la Universidad

de Chile, que trataba de aunar la fuerzas en los temas de energía de distintas Facultades y fue una experiencia bastante interesante; pero en ese tiempo estábamos hablando sólo de biocombustible, InnovaChile adjudicó los consorcios Biocomsa, Bioenercel y en bioalgas. Hoy día poca gente se acuerda de eso y eso no es porque los biocombustibles hayan dejado de ser relevantes, sino porque de alguna forma tenemos esta lógica de que nos cansamos de un tema. Después tenemos CIFES, cuando se crea este Centro de Innovación y Fomento de la Energía Sostenible, empieza a levantar el año 2013 la idea como foco de la energía solar y se realiza el programa estratégico solar, en ese tiempo hablamos solo de sol. Después en el 2017 nos volvimos locos y sale la estrategia del Litio de CORFO y hablábamos solo del Litio. Después salió el Instituto de Tecnologías Limpias que todavía está en un tema delicado con el proceso de adjudicación y hablábamos de que esa era la gran apuesta, se redredó eso. Ahora empezamos a hablar del hidrógeno verde y de la gran aventura que tenemos que emprender para este desafío de exportación y pronto.



Figura 7



Figura 8

¿Cuál es el mensaje? el peligro de las modas y de qué en estas cosas, los países que realmente salen adelante, son persistentes y los trabajos son sobre décadas en apuestas. Lo que sí es claro, es que de alguna forma nos hemos dado cuenta como país, de que las energías renovables son nuestra verdadera ventaja. Espero que con los argumentos que les comenté ustedes también suscriban eso, y eso parece ser el hilo conductor y un poco mi presentación trata de argumentar un hidrógeno verde, pero un hidrógeno verde habilitante al desarrollo de las energías renovables, pero probablemente no exclusivo para lograr su desarrollo.

Siguiendo con esta idea del hidrógeno verde (Figura 9), justamente esto es parte de la tesis de Carlos Alvear, la cadena de valor del hidrógeno. Efectivamente el hidrógeno verde, como ven ustedes, a partir de electricidad de fuentes renovables es una suerte de portador energético para aplicaciones, por ejemplo, en el transporte donde con la electricidad no pudo llegar con tanta facilidad o para exportar combustible a otros lugares donde no puedo llegar con las interconexiones eléctricas directamente. Entonces, este camino del hidrógeno es un camino que permite generar muchas opciones, que no solamente son la energía. Hoy día tenemos aplicaciones en desarrollo de nanomateriales, por supuesto, en otros combustibles que no sea el hidrógeno directo que se llama combustible sintético y se ha acuñado el término que voy a presentar a continuación del “Power to X”, o sea la energía renovable nuestra aplicada a cualquier producto expresado con la letra “X”.

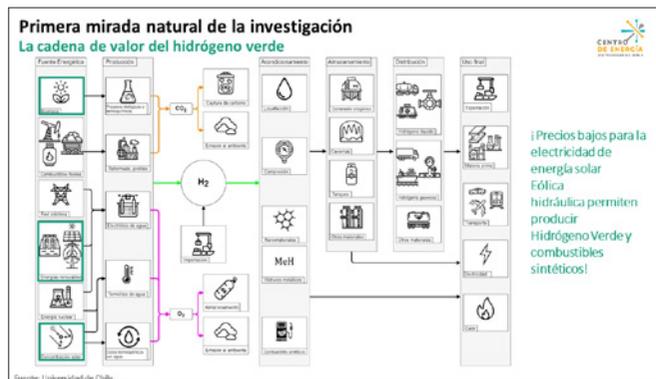


Figura 9

Nuevamente los precios bajos para electricidad, energía solar, eólica, hidráulica, geotermia permiten producir hidrógeno verde y su combustible sintético o combustible

sintéticos asociados y otras aplicaciones de valor, de una manera que pueden ser una oportunidad para nuestro país. En ese contexto tenemos que analizar oportunidades y hacer apuestas, porque si esperamos que esté todo listo como hemos hecho en muchos otros ámbitos, lo que va a poder aprovechar el país se dice va a ser la captura de valor que puede tener el país, pero eso puede ser muy pequeño al lado de otros que ya tomaron el liderazgo.

De GIZ, grafica el concepto de Power to X, que significa que con energía renovable de bajo costo puedo desarrollar alimentos, riego tecnificado, generar agua potable, acá puedo gestionar agua para dejarlo en términos gráficos, acá puedo desalar agua con todo el cuidado que requiere, en términos de impacto local de biodiversidad, etcétera (Figura 10). Puedo tener impacto en la industria en el proceso directo de electricidad o calor para los procesos industriales en donde existen varias opciones y también puedo fabricar hidrógeno como habilitante fundamentalmente en transporte, que es un factor diferenciador, pero también en muchos otros ámbitos.



Figura 10

Es bueno considerar esta imagen porque cuando uno fabrica hidrógeno hay que tener claro que de pasadita fabrica oxígeno, y si uso 10 litros de agua o 10 kg para fabricar un kilo de hidrógeno, los otros 9 son oxígeno, entonces, ahí hay un tema que tampoco tiende a verse y haciendo un análisis más holístico del paquete completo se ve como oportunidad.

Hace como un mes, salió justamente en el marco de esto Power to X, el primer Atlas que van a poder revisar para los más curiosos. Todavía está solo la versión en alemán, se supone que en estos días salía la versión en castellano,

qué son las que supuestamente se van a adaptar más a la energía renovable variable y van a dominar el mercado en el corto plazo, y se habla también de las de óxido sólido, que son las que hoy día no están tomando el mercado, pero se supone que en algunos años van a ser las que van a tomarlo. Entonces con esas tres tecnologías, son con las que se hacen estos análisis de a qué costo se puede llegar.



Ya les mencioné que el consumo de agua es de 10 litros por kilogramo de hidrógeno,

La energía requerida para esto es bien oscilante. Si bien yo he escuchado bajo 40 kWh/kg, por lo menos lo que tiene IRENA, es un rango más amplio entre los 40 y los 60 kWh/kg de hidrógeno.

Después tienen los factores de planta en torno a 60%, es más o menos a lo que tiene que llegar el electrolizador para que tenga sentido económico su uso. Entonces se plantean estos primeros dilemas, si uno usa una planta fotovoltaica, que al norte llegamos a factores de planta en torno al 30% anuales, evidentemente hay un problema ahí, porque si voy a tener una parte del día el electrolizador sin uso, entonces va a salir más caro amortizar ese capital. Todas esas preguntas empiezan a aparecer.

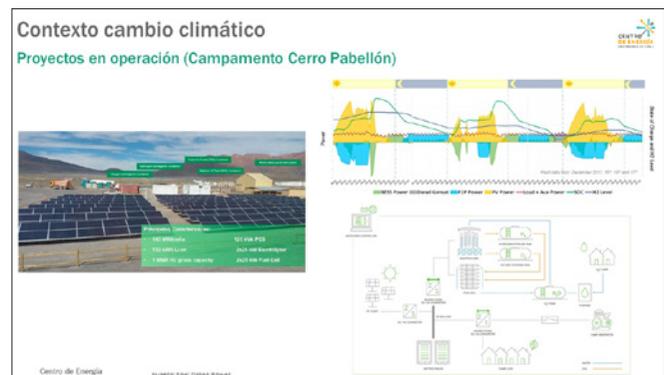
También faltó mencionar la eficiencia, en torno al 70%, es decir, que en el contenido energético que se usa, supongamos se usaran 100 para producir hidrógeno, entonces se dispondrá de 70 kWh en contenido energético del hidrógeno producido. Esto resalta la calidad de portador energético del hidrógeno.

Y los costos de transporte a centros de consumo pueden ser críticos, como ya les comenté, que es un elemento que tenemos que ver con mucho cuidado en Chile. Por eso hay que ver otras opciones también del uso de la energía renovable y que 1 kg de hidrógeno equivale a cerca de 2,8 litros de gasolina.

Por último, utilizar el hidrógeno producido para volver a generar electricidad con celdas de combustible tendría una eficiencia general en torno a un 50%.

Con esta explicación general de este mapa, vamos a avanzar en la presentación para terminar con esta mirada que hoy día estamos dando como país y que ha generado cambio de perspectiva. Hoy día es inconcebible pensar en desarrollos que no sean armónicos o no estén en coherencia con los objetivos de desarrollo sostenible y la sociedad está muy sensible a esto.

Ayer oí una entrevista, en que se decía que todo esto del hidrógeno era un símbolo del extractivismo y que esta cuestión había que pararla porque tenemos de nuevo un problema fundamental por el impacto que vamos a tener en la naturaleza. Más allá de estar de acuerdo o no con los temas específicos planteados, todos si concordamos en que ahora en el contexto que estamos viviendo, modo pandemia, es muy relevante que estos proyectos no nazcan muertos; eso significa informar adecuadamente a la sociedad y tener las capacidades de estudiar todos los tipos de impacto que se producen. Así la sociedad puede tomar una decisión respecto si existe un balance adecuado entre los beneficios que le reportan y por supuesto los daños que causan o los impactos que se tienen (Figura 14).



El único proyecto que nosotros conocemos de electrólisis que lleva un tiempo en operación, es el de ENEL en Cerro Pabellón que está asociado al campamento de la Central geotérmica. Se aprecia el esquema de funcionamiento, que es bien bonito. Se dispone de una planta fotovoltaica, toda la electrónica de potencia que lidia con un banco de baterías, pero que alimenta también a un electrolizador. Por su parte, el electrolizador almacena su producto hidrógeno y oxígeno en estanques. Existe otro estanque de agua, que obviamente ha tenido que ser tratada para poder alimentar este proceso. Además, se dispone de una celda de combustible, que permite volver a producir electricidad a partir del hidrógeno. Y, por supuesto, se puede usar el hidrógeno para otras aplicaciones. Asimismo, se dispone de los datos de la operación, por lo que concluimos que existe cierta experiencia en Chile, que puede ser útil y que tenemos que seguir profundizando (Figura 15).

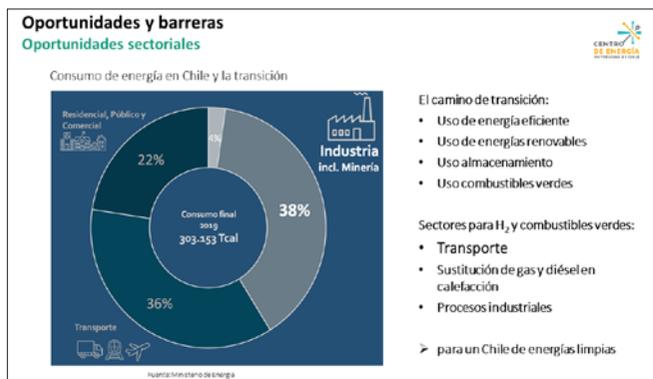


Figura 15

En términos de las oportunidades sectoriales, destaca el transporte, pero también destaca la sustitución de gas y diésel en calefacción y procesos industriales para que podamos concretar un Chile con energía limpia. Nunca está demás recalcar que cerca del 70% del consumo energético sigue siendo fósil y la energía eléctrica sólo representa un 20%. Tenemos por tanto un tremendo desafío en el sector energético. Por eso es que el cambio, no sólo involucra la electrificación de los consumos sino también el uso de hidrógeno verde y derivados. El transporte es el sector más complejo en su transformación. La electrificación con acumuladores químicos o bien con el uso de hidrógeno y derivados buscan cumplir u rol clave (Figura 16).



Figura 16

Es por eso que en la NDC, volviendo a lo del cambio climático, ustedes ven que en la lista escrita en fácil de las distintas medidas de mitigación que se consideraron para respaldar ese camino verde, encuentran varios elementos donde el hidrógeno puede jugar un rol. Se habla electromovilidad, de hidrógeno en transporte de carga, de hidrógeno en uso de proceso térmico, de hidrógeno en usos motrices. Entonces observan que hay una apuesta grande desde el Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Energía. Concuera nuestro futuro a nivel local con el de las exportaciones (Figura 17).

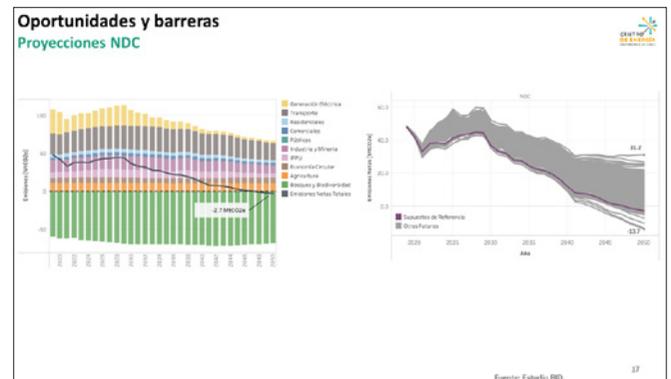


Figura 17

Dado que las apuestas son muy fuertes al hidrógeno y que el futuro es tan incierto, recientemente se han hecho análisis que incorporan los factores de incertidumbre para ver si somos capaces de llegar a las metas propuestas. La línea negra corresponde la línea verde que comentamos antes (Figura 18); es la que permite con las capturas del sector forestal llegar a las cero emisiones netas al año 2050.

Esa línea negra, que es la línea morada acá a la derecha en otra escala, está sometida a tanta incertidumbre que uno se da cuenta que, en muchos futuros posibles, podríamos no cumplir con la meta y por eso debemos tener plan A, plan B, plan C, y ahí pensar en la oportunidad del hidrógeno.

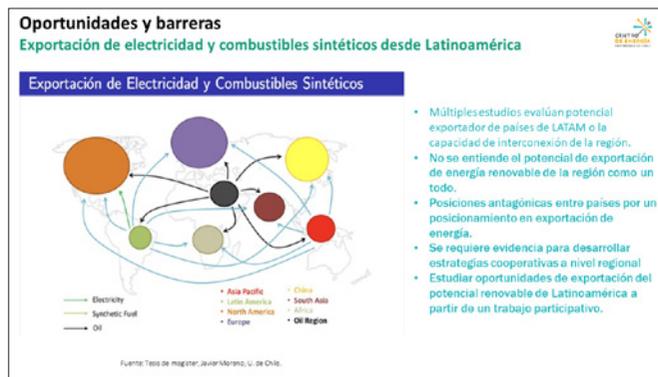


Figura 18

Y en ese contexto es que yo me permito realizar la reflexión de que hoy día van a escuchar en la opinión pública. Se plantea una especie dilema: ¿por qué vamos a empezar a pensar en las exportaciones de hidrógeno si todavía no solucionamos nuestros propios problemas? Como bien dice el dicho: “la caridad parte por casa”. ¿Deberíamos seguir esa lógica?; y que una vez que cumplamos nuestros compromisos veamos qué hacemos hacia afuera. Otra línea de pensamiento sostiene todo lo contrario: la única forma de cumplir con nuestros compromisos nacionales, es emprender una exportación exitosa de manera que ésta habilite la posibilidad de cumplir con los compromisos locales. No existe una respuesta categórica y hay varias investigaciones en curso para abordar esta situación. Existe un grupo ahora en el marco del comité de cambio climático donde queremos llegar con una suerte de White Paper, a la Cop 26, donde el mundo científico se pronuncia sobre la evidencia que existe sobre las oportunidades reales y el sentido que tendría la exportación de electricidad y combustible sintético de Chile.

Esta Figura corresponde a un resultado de la tesis de Javier Moreno de la Universidad de Chile, que investigó si Latinoamérica se constituyera, más que Chile, en un nodo de exportación. Como ustedes saben, uno tiende mirarse el ombligo, pero si uno ve Perú, también posee un potencial gigante en renovables. En el atlas Power to X, vean los números para Argentina que también son

impresionantes. En realidad, toda Latinoamérica posee un gran potencial de energías renovables. Entonces, en vez de ponernos a pelear entre los países latinoamericanos, se podría plantear la economía de Sudamérica exportando. Eso es solo una de las cosas que exploramos en este trabajo que bajo ciertos supuestos podría ser, en el largo plazo, una gran aventura de Latinoamérica; transformarse y constituirse en una región que le ofrezca sostenibilidad al resto del mundo, obviamente con los cuidados locales que correspondan (Figura 19). Entonces este dilema de resolver primero lo local antes de emprender el camino exportador o bien habilitar la exportación para poder afrontar lo local, es algo bien importante.

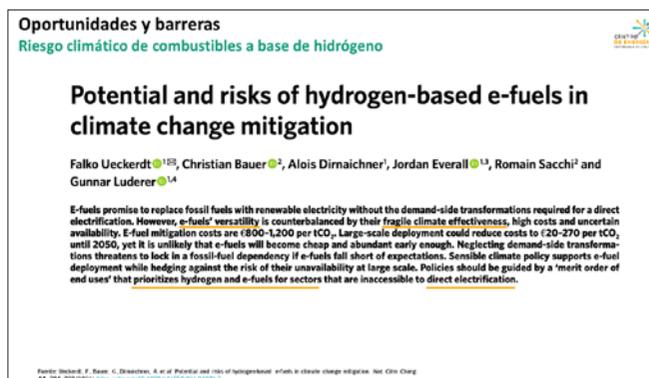


Figura 19

Dicho lo anterior y cambiando un poco de tema, hay publicaciones recientes como ésta, se las muestro como ejemplo: “Potencial and risk of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation”, donde empieza a existir evidencia que muestra (Figura 20) las toneladas de CO_{2e}/MWh, decir, lo que se denomina Global Warning Potencial al 2030 y el 2050 de las distintas estrategias de bencina sintética o de gasolina normal. Se muestra qué si bien tienen efecto de secuestro o efecto positivo de disminución, algunos de ellos, dependiendo de cómo se lleven a cabo, pueden tener un efecto importante en agravar incluso el tema del calentamiento global.

Otro tema que estamos levantando de la academia es que, si emprendemos este camino, el acto seguido es saber cómo vamos a crear las redes de suministro de hidrógeno en cada una de las regiones. Acá a la izquierda vemos la región de Arica, acá a la derecha en Corea los ejercicios de cómo sería la mejor combinación de redes de soporte para poder abastecer, ya sea con camiones, gasoductos,

usando las redes eléctricas en combinación con sistemas de almacenamiento, etc. Es muy relevante empezar a pensar estas soluciones, porque un éxito de la estrategia de hidrógeno va a ser también un éxito a partir de cómo ello se plasma en el territorio (Figura 21).

2010 (Figura 22). Uno podría pensar a futuro en soluciones integradas de hidrógeno, donde ver esto como parecido al Cerro Pabellón pero aplicado a alimentos. En este caso disponemos de una planta fotovoltaica las mismas baterías, se produce hidrógeno y oxígeno, pero también hay la posibilidad de integrar esto a invernaderos.

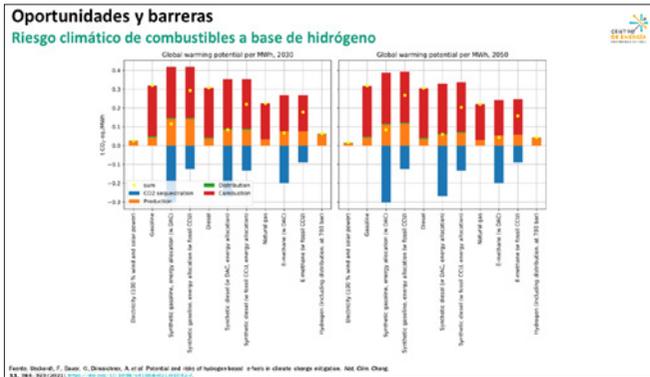


Figura 20

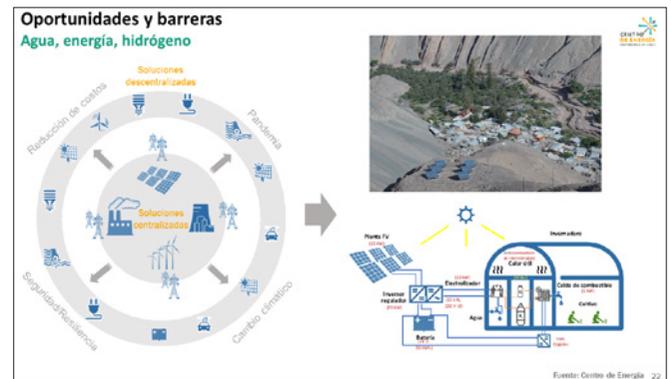


Figura 22

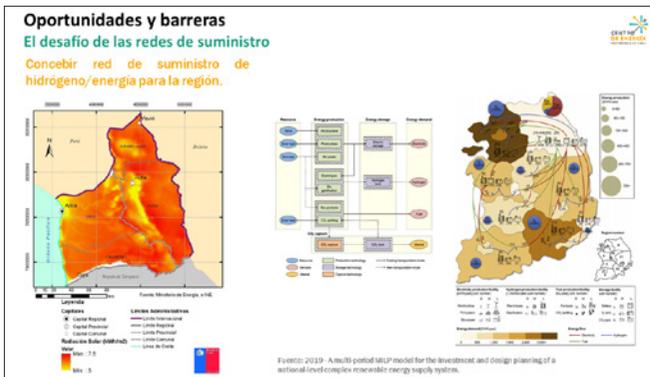


Figura 21

Habiendo dicho todas estas cosas grandilocuentes, también hay un nexo muy potente de esto para las soluciones energéticas descentralizadas. Por lo menos, pienso que no hay una contradicción en hablar de un futuro con la importancia mucho mayor de la generación distribuida de las microrredes; en general, de soluciones energéticas, no solo eléctrica, sino que, multienergéticas descentralizadas por la vocación que tenemos los territorios y la valoración que se le ha dado hoy día a la resiliencia del territorio. Con la pandemia, crece la valoración de un territorio que sea autoabastecido en alimento, energía, que tenga por supuesto condiciones sanitarias y que tenga agua. Esa ecuación hoy día es muy relevante, acá les muestro el ejemplo de Huatacondo, solución que creamos en el año

¿Y cuál es el factor que quiero resaltar acá? Lo que a nivel de exportación es una pérdida neta, que son las transformaciones de electricidad en hidrógeno, a nivel local es una ganancia. Cuando ustedes tienen el calor que es en el fondo la pérdida de los procesos de transformación de electricidad en hidrógeno y de vuelta de hidrógeno a electricidad, ese calor se puede usar en un contexto local para alimentar un proceso, por ejemplo, en un invernadero, agua caliente, entre otros procesos. La energía no se pierde, y darse cuenta de eso, de todo lo que ha explorado este mundo de conexión del agro con la energía en este mundo de hidrógeno, parece ser muy importante. Para qué decir que el hidrógeno es material base para fertilizante, entonces ya no hablamos solo de energía, sino que también de otras aplicaciones.

Ya hacia el final, para dejar el tiempo de conversación, hemos explorado varios caminos de uso del hidrógeno. Acá nuevamente una Planta Fotovoltaica y una Central Hidráulica combinada con la planta fotovoltaica, como el caso de Chapiquiña en Arica, que podría ser una fuente interesante fabricación de hidrógeno. Un hidrógeno especial, que usa aguas continentales, ya que puede ser un aspecto crítico. Pero la gracia es que el agua continental en nuestro ciclo de los embalses, en el caso de Chapiquiña es un pequeño embalse con túnel, que le da una altura de 1000 m y tendríamos la producción de hidrógeno a

100 Bar. Uno puede producir a distintas presiones, pero podría ser una ventaja y un nicho de Chile, después de producir hidrógeno de alta presión, donde la presión la están dando las centrales hidráulicas que tenemos. Eso podría constituirse en una ventaja en la producción del hidrógeno de Chile, dado que a mayor presión del agua se necesita menos energía de producción (Figura 23).

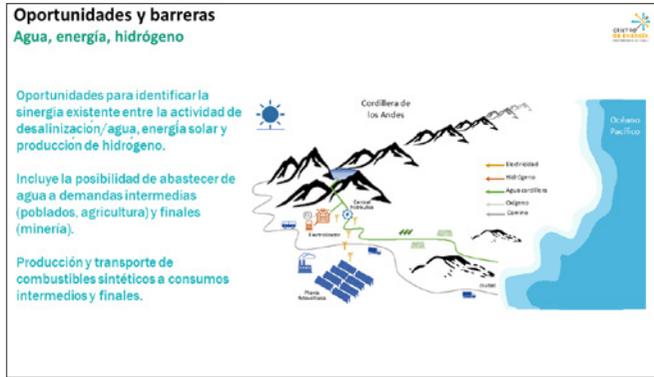


Figura 23

Pensamos que esto debería articularse con mucha fuerza, a través de lo que se denominan proyectos demostrativos, que son proyectos que están entre los pilotos, por supuesto lejos de una prueba de concepto. Eso hay que habilitarlo con otros recursos. Se requiere de proyectos que sean más que un piloto, menos que proyectos comerciales donde en ese espacio, la acción del mundo académico, del mundo privado, del sector público podría lograr soluciones, incluso con impactos sociales súper interesantes si se focalizan en la aplicación de proyectos demostrativos con impacto social; creemos que ahí hay una clave (Figura 24).

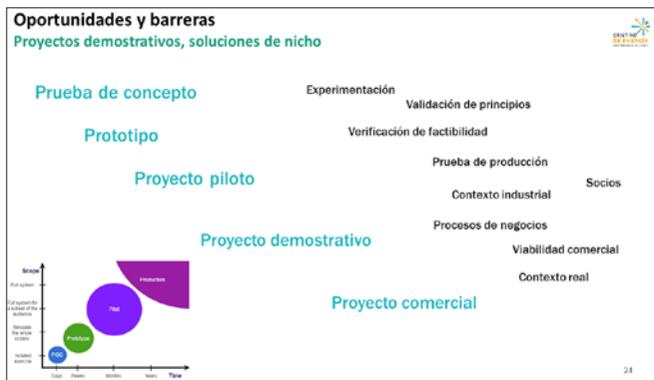


Figura 24

Hemos hecho un estudio interno, del cual les presentamos solamente un extracto. Se analizaron distintas dimensiones, no hay tiempo como para aunar en esto: políticas ambientales, sociales, tecnologías, económicas, institucionales y legales con respecto al hidrógeno. Hemos obtenido algunas conclusiones interesantes y hemos querido compartir, particularmente acá, de los posibles usos comerciales del hidrógeno del ámbito nacional (Figura 25).



Figura 25

Uno es el cabotaje nacional en el mundo marítimo, otros, reactivos para la minería, fertilizantes, camiones mineros, etcétera. En aplicaciones de gran escala existe ventaja hoy del hidrógeno sobre las baterías de litio, entonces en el cabotaje podría ser un espacio donde cambiemos el paradigma. Existe una lista larga de hallazgos de posibles desarrollos en calidad de proyectos demostrativos que podrían explorarse, para ver cómo se van plasmando las ventajas de esta aventura del hidrógeno y no el uso directo de electricidad, porque el plan “A” debiera ser uso directo de la electricidad.

Paso a mi lámina final para dejar los tiempos. Chile se encuentra en una fase de transformaciones relevantes en distintas dimensiones. Estamos viendo un momento único con la nueva constitución, con elecciones, con la necesidad de convertirnos o de poder pasar a un cambio en nuestra estructura económica. Entonces es un momento donde aparece esta temática del hidrógeno, con nuestras energías renovables que han demostrado su calidad y proyectan una eficiencia desde el punto de vista económico que puede ser muy potente.

La energía renovable ofrece esta oportunidad; se han logrado compromisos y establecido metas de mediano y largo plazo, Chile está haciendo una apuesta hacia un mundo sostenible como un acuerdo que existe en la sociedad, ha trascendido los gobiernos y las soluciones de hidrógeno a gran escala creo son sinérgicas con la de pequeña escala. Por lo tanto, ahí hay un impacto local que se podría lograr con esto que es súper relevante, no es en contra. La integración a través de un proyecto educativo que derribe las barreras actuales, parece clave. Asimismo, crear centros de investigación y también las universidades, que cumplen un rol importante para articular este desafío futuro. Esto también es válido para el mundo privado y las instituciones públicas que tienen responsabilidad en esta temática. Finalmente, instituciones como el Instituto de Ingenieros que también cumplen un rol articulador en esta materia (Figura 26).

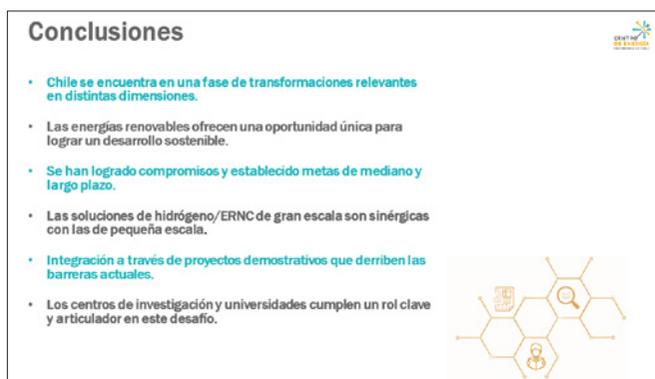


Figura 26

Muchas gracias.

A continuación, el Sr. Rodrigo Palma responde a los comentarios y preguntas de los asistentes.

Sr. Luis García.

—Una excelente información de la generación renovable. ¿Estos datos están disponibles en alguna plataforma abierta?

Sr. Rodrigo Palma.

—Bueno, la generación está toda disponible en el Coordinador Eléctrico Nacional, de hecho, de ahí bajamos

nosotros la información. Lo que no está disponible es el trabajo que tuvo que hacer el memorista y esperamos poder tenerlo ahora a finales de año. Se trata de un Estudio sobre la complementariedades y sinergias de las energías renovables. Esperamos contribuir desde la universidad con una memoria que va a tocar este tema. Probablemente hay otros trabajos en estas temáticas.

Sr. Diego López.

—¿De qué manera los municipios pueden promover el desarrollo del hidrógeno verde?

Sr. Rodrigo Palma.

—Bueno, ahí les entregamos, la lista de posibles aplicaciones en Chile que es como muy sensible a no generar políticas regresivas, del tipo: “si le dieras fomento a unos autos eléctricos privados” ¿quién puede comprarse hoy día un auto eléctrico sobre veintitantos millones de pesos? muy poca gente. Entonces, si además tiene beneficios, se perpetua esta sensación de inequidad. Entonces los municipios tienen que buscar aplicaciones que tengan impacto social y ha sido clave lo que ya se ha hecho en los colegios, en el mismo municipio, en las ferias locales; aplicar, buscar aplicaciones demostrativas que tengan una lógica económica, pero que impacte positivamente a la sociedad, yo creo que es clave. Siempre va a tener que tener un subsidio en las primeras aplicaciones para que funcionen, pero van a lograr un doble efecto: uno, validar remover barreras y otro que la sociedad tenga una sensación que indique qué tipo de avances les pega directamente. Un buen ejemplo fueron los buses eléctricos del transporte público, porque eso va directo a quienes lo usan, en lugares donde se notó mucho el cambio entre la calidad de un bus eléctrico a un bus tradicional. La lista de iniciativas está y por supuesto si quieren podemos conversar más en detalle sobre posibles aplicaciones locales.

Sr. Germán Millán.

—Me gustaría que profundizará un poco más en un tema particular; ¿cuán competitivo es, o puede llegar a ser el hidrógeno en resolver los desafíos de almacenamiento de energía eléctrica, a qué velocidad como complemento de la intermitencia de la energía renovable?

Sr. Rodrigo Palma.

—Potente la pregunta, y la voy a frustrar porque no voy a poder responder con la claridad que se desea, porque no tenemos todavía los números como para hacerlo.

Lo primero que hay que tener claro es que el hidrógeno como lo presenté, en la ida y vuelta hacia la electricidad no es un buen almacenador. Hoy día con baterías de litio ustedes pueden llegar a producciones de carga-descarga que entregan resultados sobre el 90%, las centrales de bombeo tipo Valhala están en torno al 75-80%, o sea si ustedes utilizan 100 para bombear después van a poder volver a fabricar 80. En el caso del hidrógeno, con las tecnologías actuales de celda de combustible y electrolizadores estamos en torno al 55%. Entonces, claramente ahí hay un desafío. Como decíamos, ese calor que se produce en las pérdidas se puede usar para otros procesos como el uso de calor en invernaderos o industria. Lo que sí creo, y que es muy potente, es que el hidrógeno nos entrega resiliencia porque si vamos a tener mucha exportación, vamos a tener que tener almacenaje intermedio que va a dar a Chile la posibilidad de responder bien, por ejemplo, frente a sequías. Porque tenemos producción de hidrógeno y necesitamos energía, va a salir un poco más cara por esta ida y vuelta, pero no tendríamos tema de racionamiento y estaría acotado a menos del doble del precio en términos de la ida y vuelta. Creo que puede ser un habilitador muy potente el tema la exportación, porque generaría un stock de hidrógeno y una capacidad de fabricación incuestionable con el recurso eólico, que no tiene señales de acabarse y el sol que tampoco tiene señales de acabarse. Se daría un círculo virtuoso que hay que estudiar en mucho más detalle. Sin embargo, como almacenamientos hay que ser bien claro que existen alternativas que presentan números más atractivo por hoy.

Sr. Alejandro Steiner.

—*¿Se ha avanzado en Chile en el diseño de electrodos que soporten el agua de mar?*

Sr. Rodrigo Palma.

—Entiendo que, si estamos hablando de los electrolizadores, definitivamente no pueden trabajar directamente con agua de mar, por lo menos los comerciales. Entonces

se obliga más que el trabajo de los electrodos, a un tratamiento previo del agua y de ahí la conexión con las plantas de desalación por ósmosis inversa. Con bajos costos de energía calza por tanto el uso de energía para desalar el agua y esa agua es la que entra al electrizador. Entiendo que esa es más bien la apuesta, pero puedo pecar acá de ignorante porque no soy especialista, exactamente, en esos temas. No he escuchado de desarrollo ultra eficiente directo de uso de agua de mar con electrolizadores, pero quizás alguien puede clarificar más el tema.

Sr. Rodrigo Osorio.

—*¿Existe claridad respecto al impacto medioambiental en la construcción e implementación de una planta de hidrógeno?*

Sr. Rodrigo Palma.

—Sí, existen análisis de ciclo de vida y de hecho esto es lo que les mostraba del Global Warning Potential, toma todo eso en cuenta. Cuando uno mira la fabricación completa del electrolizador y todo lo que se requiere, asociado también a la planta que no puede dissociarse de la planta renovable pertinente, si es eólica o solar, uno empieza a ver los impactos. Sobre todo, la planta de desalación que tiene que estar conectada como parte de la ecuación para poder proveer del agua si es que no dispongo de aguas continentales. Yo creo que hay temas que se deben ver en mucho más detalle y acá podemos pecar de sobre entusiasmo. Tenemos profesionales muy calificados en Chile hoy día para hacer evaluaciones ambientales, por lo que hay que someterse como sociedad a los análisis de estos especialistas. Así, yo adelantaría que sí bien creo que todo esto se mantiene dentro de márgenes controlables no tengo una postura a priori sobre los límites que enfrentamos. Pero sí tengo claro que este proceso se puede hacer muy mal o se puede hacer muy bien, y eso va a depender de como tomemos en serio el tema medioambiental.

Sra. Ximena Guzmán.

—*Creo que se comentó poco sobre la fuente de abastecimiento. ¿Realmente sigue siendo verde la producción de hidrógeno, si se utilizan aguas continentales si ya escasean y vivimos en sequía?*

Sr. Rodrigo Palma.

—Sí, tiene toda la razón de que el verde, probablemente aparezca un verde claro y un verde oscuro, porque acá los colores obviamente clasifican, pero no corresponde a una ciencia exacta. Se refiere a la fuente de energía si es renovable o no, no significa que el verde tenga un certificado de no impacto, todo va a tener impacto ambiental y acá hay que ver los números y ver si es que está dispuesta la sociedad a soportar estos efectos. Lo que tenemos es una buena oportunidad en algunos casos específicos de usar aguas continentales, sobre todo si se usa ahí mismo el hidrógeno. Uno puede apelar a que la combustión va a liberar de nuevo el agua. Ese círculo del agua como concepto que queda en el territorio, parece que permite tener una mirada positiva a ese uso. Obviamente cuando se exporta el hidrógeno a nivel global no hay pérdida del átomo, pero podría haber un impacto en que yo voy a estar usando esa agua, uso consumitivo, a diferencia de lo que sucede en una central hidráulica. Asimismo, la priorización en el uso del agua como agua potable para las personas pasa a tomar un rol relevante. También existe la posibilidad de extraer el agua de los océanos, en que no hay cuestionamiento de la cantidad de agua que hay en el océano, pero sí de los impactos locales por la toma y punto de entrega del agua. Sin duda, va a tener impacto en la biodiversidad cuando bombeo el agua para desalar y cuando devuelvo la salmuera también voy a tener un impacto. Si se hace bien pueden mitigarse los impactos, es algo que hay que entender en detalle, así que no tengo una respuesta categórica, pero quería agregar esos elementos.

Sra. Andrea Armijo.

—Respecto al uso de hidrógeno verde en el campo automotriz, ¿existe disponibilidad de homologación de tecnología con el 3CV por ejemplo?

Sr. Rodrigo Palma.

—Entiendo que justamente lo que no se hace en Chile es certificar, tampoco se hace con los vehículos convencionales. Lo que se hace es homologar. La homologación es bastante más fácil que la certificación, entonces yo no sé hoy día de autos a hidrógeno que estén siendo homologados en Chile. Así es que no puedo responder esta pregunta.

Pero creo que, si llegamos a desarrollar tecnología local, que es a lo que deberíamos aspirar como país, en nichos de innovación, podríamos tener la capacidad de certificar. De manera que esta no sea una tremenda barrera de millones de dólares para poder innovar en el país. Creo que ahí todavía queda mucho por hacer en Chile, si es que queremos cambiar la estructura económica en términos de los procesos de certificación. Ustedes ven que hoy día no se puede; en principio, estamos en una zona gris, quedamos parados con la crisis social y política, se suspendió la posibilidad de reconvertir autos de combustión activa a eléctricos que están en un limbo, y eso desde los grupos de investigación y desarrollo lo vemos como otra barrera que aparece, sabiendo lo que significa, que se está tratando de atender a que se hagan vehículos seguros, y después la gente no termine dañada por vehículos que no cumplen con la certificación, entonces yo creo estamos al debe en una buena institucionalidad para fomentar la innovación local, pero creo que la homologación de vehículos de hidrógeno, me imagino que sería algo bastante más fácil y rápido.

Sr. Cristóbal Sarmiento.

—¿Me gustaría saber qué rango tendría la temperatura del calor remanente de los procesos de producción de hidrógeno?, quería hacerme una idea de la calidad de la energía térmica desde el punto de vista termodinámico para posibles usos.

Sr. Rodrigo Palma.

—Interesante, porque ahí va a depender de la tecnología de electrolizador. La que se viene al futuro, que es de óxido sólido, opera sobre los 500 grados y la gracia es que no requiere de materiales especiales, que son los que se les critica a los de más baja temperatura y la de más baja temperatura entiendo que el rango es 40-60 grados si no me equivoco. En este último caso, no es calor de proceso de alta temperatura al que se accede, pero sí puede ser muy útil para algunos casos. No tengo los números como para darle en este momento información más detallada.

Sr. Ignacio Aguirre.

—Se habla de varias posibilidades de transportar hidrógeno en carriers como el amoníaco, por ejemplo. ¿Cómo se ve

el futuro en la exportación de hidrógeno entre carriers o en estado puro?

Sr. Rodrigo Palma.

—El atlas lo trata, y los invito a que lo visiten porque justamente incluso calcula los costos diferenciados de producción de los distintos productos, directamente del metanol y de Fischer Tropsch para poder fabricar diésel, kerosene. Esos son los tipos de productos que se están pensando. El compromiso que se explora cuando uno fabrica estos productos, es que sube el valor de fabricación, pero baja el del transporte. Justamente uno lo grandes problemas del transporte de hidrógeno en su formato licuado o gaseoso es que hay pérdida y se requiere de una infraestructura naviera especial que incrementaría los costos. Y ahí está el balance, pero son tecnologías en desarrollo. Entonces todo esto entra un poco en discusión, pero yo quiero comentarles algo que va más allá, de hecho, nosotros tenemos que pensar si nuestra energía renovable más allá de los subproductos derivados del hidrógeno como acabamos de mencionar, puede incluir:

- Materiales para industria de componentes específicos que no son combustible,
- Exportación de energía renovable a través de redes eléctricas interconectadas en Sudamérica, o
- Atraer industrias del extranjero para producir localmente con baja huella de carbono.

No olvidemos que las energías renovables son nuestra singularidad, no tenemos ninguna singularidad por el lado de querer agregar un poco de litio, de cobre, porque la singularidad es la energía renovable.

Sra. Grecia Pérez de Arce Jaramillo.

—¿Se ha evaluado la utilización de las aguas grises?

Sr. Rodrigo Palma.

—Cuando uno quiere hacer productos derivados del hidrógeno, se necesita saber dónde se encuentra el carbono; que no sea de las plantas carboneras y entonces cualquier fuente natural de emisión de carbono puede servir para crear, metanol, kerosene o diésel, a partir de energía renovable. Entonces uno proporciona el hidrógeno, lo

fabrica con el agua y después tiene estos otros elementos que necesita para armar las moléculas que corresponden.

Y ahí se ve, por ejemplo, en la planta en La Farfana acá en Santiago, que es emisora de metano, una forma de que esa emisión no termine en metano en la atmósfera como gas de efecto invernadero con un potencial de efecto invernadero 21 veces mayor al del CO₂, puede ser usar estas emisiones para fabricar in situ, por ejemplo, combustible de aviones y abastecer el Aeropuerto que está en Pudahuel. Entonces para todas esas opciones, hay personas y grupos que lo están pensando. También están los volcanes que son emisores naturales. Si alguien lograra sacar de ahí las emisiones que pudieran ser útiles para productos de valor a base de hidrógeno también es otra forma. Pero hay que buscar una fuente natural, y las aguas grises que son parte de un proceso antropogénico, de nuestra sociedad, podrían, en vez de pasar directo a la atmósfera integrarse como productos derivados del hidrógeno.

Sr. Ricardo Nicolau del Roure.

—Extraordinario Profesor, realmente se abren dimensiones desconocidas con todo esto, pero como resumen el gran potencial de Chile con su energía renovable, no es el hidrógeno verde sino la energía renovable, y lo que te decía recién respecto a traer industria, yo recuerdo que el famoso proyecto de HidroAysén, nació como un potencial de energía renovable para producir aluminio, que requiere una enorme cantidad de energía y la bauxita venía de Australia, así que no era un ejemplo anticipado de lo que podemos hacer con nuestra energía renovable.

Sr. Rodrigo Palma.

—Claramente hay un desafío tremendo, yo creo que todos somos parte de esta aventura, donde entran las ciencias sociales y nosotros como ingenieros; yo hace mucho tiempo entendí que mi mundo reduccionista es interesante y potente para abordar temas sociales. Hoy podemos actuar por medio de y con la tecnología. Sin embargo, a partir de la experiencia en el centro de energía, en que hay muchos saberes participando, uno se da cuenta que en los proyectos en terreno tenemos que articularnos con las otras ciencias, particularmente las ciencias sociales para que esto funcione (soluciones socio-técnicas), ese quizás es el mensaje más importante.

Sr. Ricardo Nicolau del Roure.

—No podemos descuidar esa lista, esa pata de la mesa de tres patas.

Bueno don Rodrigo, muchísimas gracias por esta interesante e ilustrativa y didáctica presentación, así que repito que ésta va a ser parte de la Revista Chilena de Ingeniería, que publica

el Instituto, así que van a poder repasar la conferencia cuando aparezca en nuestra página web. No me queda más que volver a agradecer al Profesor Rodrigo Palma, y al resto de nuestros socios y espectadores que siempre nos acompañan, hoy recibimos más de 100. Les agradezco la presencia y será hasta nuestra próxima conferencia mensual.

Fin de la conferencia.

LA DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR COMO UNA OPCIÓN ESTRATÉGICA PARA EL FUTURO DE CHILE

Conferencia del Sr. Carlos Foxley, Presidente de la Asociación Chilena de Desalinización A.G., ACADES



Sr. Carlos Foxley.

El día martes 26 de octubre de 2021 a las 11:00 horas, vía Zoom, ante una alta asistencia de personalidades del ámbito público y privado se realizó la conferencia del Sr. Carlos Foxley, Presidente de la Asociación Chilena de Desalinización – ACADES, quien expuso sobre el tema “La Desalinización de Agua de Mar como una Opción Estratégica para el Futuro de Chile”.

El Sr. Carlos Foxley es Ingeniero Civil Mecánico de la P. Universidad Católica de Chile.

Representante en Chile de IDE Technologies de Israel desde 1993, con participación en los proyectos de plantas desaladoras de Michilla (ex Minera Lince); Minera Escondida en Puerto de Coloso en proyecto de lixiviación con amoniaco; Edelnor en Mejillones, Norgener en Tocopilla; Plantas I y II de Guacolda en Huasco; Electroandina en Tocopilla; El Tesoro; Nueva Ventanas; Central Santa María en Coronel; Central Andina en Mejillones; Gasatacama en Mejillones, Proyectos de Desulfurización Andritz en Guacolda y Norgener, ECL en Tocopilla, Quebrada Blanca Fase II en Patache, Proyecto AIROP en desaladora de Coloso de Minera Escondida Limitada, Proyecto Aconcagua de Aguas Pacífico en Quintero, además de las desalinizadoras de Fundición de Ilo, de SPCC y Central Eléctrica de Enersur en Ilo, Perú.

A continuación, el Sr. Luis Nario, Vicepresidente del Instituto de Ingenieros de Chile presenta al Sr. Carlos Foxley en los siguientes términos.

El Vicepresidente.

—Buenos días a todos y bienvenidos. El Instituto de Ingenieros de Chile tiene en esta ocasión como conferencista a don Carlos Foxley, quien nos va a informar sobre la desalinización del agua de mar como una opción para Chile.

Carlos Foxley es ingeniero civil mecánico de la Universidad Católica de Chile y es representante de una empresa israelí de reconocido prestigio mundial. Le ha tocado participar en muchos proyectos de Plantas desaladoras, muchas relacionadas con la minería; por ejemplo, Minera Escondida en Puerto Coloso, la Planta 1 y 2 de Guacolda en Huasco, la Planta de la Central Andina en Mejillones, en Perú la Fundición Ilo y el Proyecto Quebrada Blanca en fase dos.

Actualmente es presidente de la Asociación Chilena de Desalinización ACADES, así es que tenemos, creo yo, al experto máximo en Chile para el tema de la desalinización.

Sr. Carlos Foxley.

—Don Luis Nario, muchas gracias por su presentación, pero soy simplemente un ingeniero al que le entusiasma y le gusta el tema, le apasiona, pero hay muchas cosas que ignoro y que vamos a seguir investigando y aprendiendo con el tiempo.

A nombre de la Asociación Chilena de Desalinización, queremos darles las gracias porque nos ayuda con el objetivo de nuestra Asociación que es difundir esta tecnología, para tener una fuente de agua adicional en muchos lugares de Chile (Figura 1).

Hablaremos sobre lo que es la Asociación Chilena de Desalinización, unas breves palabras sobre el cambio climático y efecto en particular en la zona central de Chile, una introducción muy sencilla de qué es lo que entendemos por desalinización, un poco sobre qué ocurre en el mundo y particularmente en Chile. Algunos aspectos ambientales y lo que nosotros denominamos “mitos” respecto de la desalinización.

Una pregunta que nos hacen muchas veces es: ¿cuánto cuesta el litro, los metros cúbicos de agua desalinizada? Y eso para nosotros es muy importante porque va a definir cómo se desarrolla esta tecnología, esta industria hacia el futuro, el marco regulatorio y los cambios que vamos a tener para Chile.

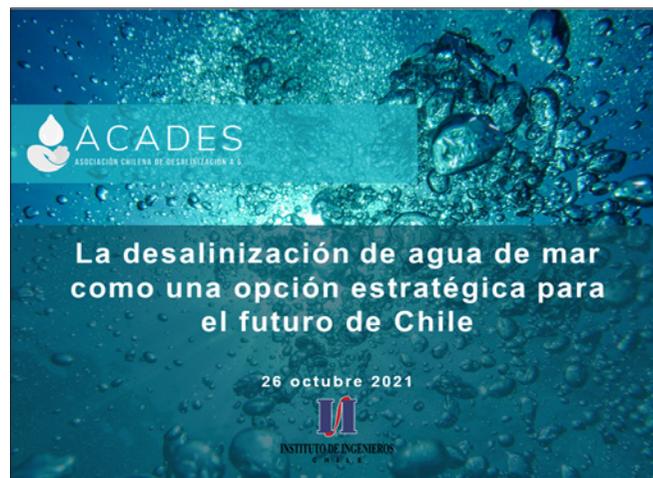


Figura 1

Y finalmente la conclusión de por qué creemos que la desalinización es una opción estratégica que Chile tiene que adoptar (Figura 2).

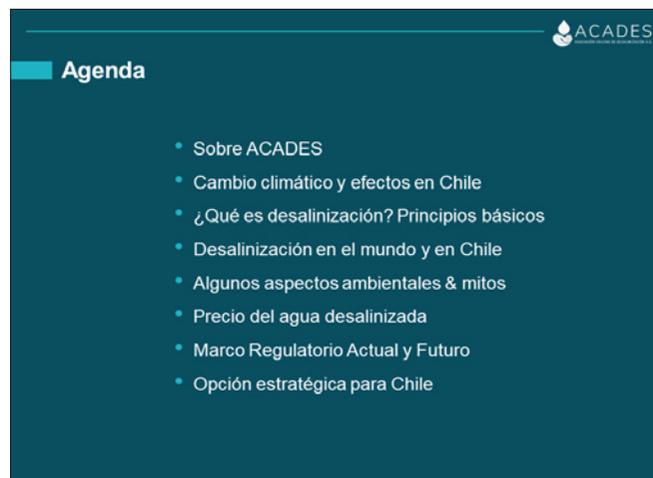


Figura 2

ACADES es la Asociación Chilena de Desalinización, que está formada por organizaciones y particularmente empresas de diferentes áreas o enfoques relacionados con esta tecnología. Hay empresas de tecnología que desarrollan la ingeniería y los procesos de Plantas desalinizadoras como GS Inima, como Acciona, como IDE Technologies, como Suez, de España, de Francia, de Israel, de varios países, como empresas de ingeniería como pueden ver Pares & Álvarez empresa nacional de ingeniería que es socia, empresas de ingeniería como Black and Veatch,

CDM Smith e Idom también hay usuarios o dueños de Plantas desalinizadoras importantes de Chile como lo son sanitarias, hay dos grupos muy importantes: está la desalinizadora de Aguas Antofagasta y está el grupo Aguas Nuevas que tiene Tarapacá, Caldera, Copiapó, con Plantas desalinizadoras, algunas pequeñas pero que les ha ido muy bien y algunos desarrolladores chilenos como la empresa Bloom Alert que usa, por ejemplo, tecnología satelital para prevenir fenómenos de “algae bloom”, marea roja en el mar que permite ajustar y optimizar la operación de las plantas desalinizadoras. También hay estudios de abogados de mucho prestigio como Barros y Errázuriz, Prieto, y otros que se están incorporando que tienen relación con proyectos de desalinización, tanto de los permisos ambientales, hasta cómo ayudar a conseguir el financiamiento por medio de los contratos y hay firmas, inversionistas o desarrolladores como el proyecto Enapac o la gente de Oceanus que tiene un proyecto bien interesante que combina, almacenar energías renovables y producir aguas desalinizadas y compañías que aportan tecnologías como TDM, Simtech, etcétera.

Esto va a seguir creciendo, pero me he detenido un poco en este tema, para mostrarles el amplio espectro que abarca la desalinización (Figura 3).



Figura 3

Vamos a tener también usuarios nuevos, estamos firmando convenios con Universidades, Centros de Investigación, porque queremos que esto abarque a toda la sociedad. Básicamente nos formamos con la misión de promover el desarrollo de la desalinización como una fuente de

agua fresca para Chile, y que sea mediante una solución eficiente, sustentable y asequible para todo el mundo.

Y vemos a futuro, y en un futuro no muy lejano, cómo contribuir mediante la desalinización a que todas las personas de Chile, mediante esa opción, puedan tener acceso al agua mediante de procesos que se desarrollen en armonía con las comunidades, sean queridos y que las comunidades sean parte de esto. Y, por otro lado, que respetemos y que exista total transparencia con respecto a los impactos en el medioambiente (Figura 4).



Figura 4

La ONU sacó hace algunos meses un Informe sobre Cambio Climático que fue categórico respecto a sus efectos en todo el planeta, y las fotografías que se muestran en la Figura 5, son algunas que vamos a empezar a ver y algunas que ya estamos viendo todos los días. Grandes sequías en algunos lugares del mundo, lagunas, reservorios, etc. A los que viajen a la costa desde Santiago, cuando pasen por el camino a Viña y Valparaíso, deténganse un poquito a mirar cómo está el Embalse Peñuelas. Y a la derecha un poco de contraste, esto fue hace un par de meses en unas inundaciones enormes en varios sectores de Europa, las fotos corresponden a Bélgica y Alemania, de manera que estamos enfrentando fenómenos con mucha frecuencia e intensidad, respecto de los que ocurrían anteriormente, están empezando a pasar todos ahora.

En Chile en particular (Figura 6), como en otras partes del mundo, se está produciendo una desertificación, esto significa que son varios años de sequía continua y con esto

empieza a cambiar la flora y fauna de ciertas regiones. Se empieza a producir inseguridad alimentaria, aumenta la pobreza y se empieza a producir el fenómeno de que la gente no puede seguir viviendo al no tener ni ella ni los animales alimento, se empieza a producir también contaminación en el agua subterránea y empieza a aparecer con mayor salinidad; eso se ha experimentado en Chile y muchos agricultores hoy día ven con mucha preocupación que hace 15 años funcionaban perfecto con un caudal determinado y hoy tienen menos caudal y mayor salinidad.

va a dar con mayor dureza, la sequía se va a convertir en nuestra próxima pandemia, y esto va a tener un impacto no solamente en el acceso al agua sino también en el clima de estas regiones y con ello se van a agrandar los conflictos sociales, agrandar la desigualdad entre el que tiene acceso al agua y el que no, y va a exigir de nosotros como sociedad un esfuerzo por solucionar esta nueva problemática que va a seguir sucediendo.



Figura 5



Figura 6

Y como lo plantea la ONU (Figura 7), ya es una realidad que en muchas regiones del mundo, y Chile está entre las regiones definidas como en las que este fenómeno se



Figura 7

En la Figura 8, las precipitaciones al 31 de Julio de este año en Chile, desde Copiapó hasta Puerto Montt. Se observa en rojo, las cifras de déficit como porcentaje con respecto a un año normal a esa misma fecha, lamentablemente al 30 de septiembre estas cifras no son distintas, varían marginalmente y en algunos casos, empeora. Solamente en el extremo norte de Chile hay un superávit, que es un fenómeno muy puntual y muy acotado que trae otros problemas, trae problemas de avalanchas y aluviones, pero si uno toma la zona central de Copiapó a Concepción, por ejemplo, vamos a ver un déficit del orden de alrededor de 40-60 o hasta 80%.

La Figura anterior era un periodo muy corto de este año, sin embargo, la foto (Figura 9) cubre 70 años. Y en 70 años lo que está en verde corresponde a los años cuando hemos tenido precipitaciones en la zona central de Chile, por sobre lo que se denomina un año promedio, un año normal y lo que está en amarillo muestra déficit. Y observando la sequía que hubo a mediados de los 60', tuvimos 5 años seguidos de sequía y a finales de los 90' también sequías muy extensas En el año 99 tuvimos incluso racionamiento

eléctrico debido a la sequía, pero fueron sequías que duraron 3 años; lo que hoy tenemos y lo pueden ver en la parte derecha del gráfico, son 13 años, aunque el gráfico muestra 12, pero si agregamos el 2021 llevamos 13 años seguidos de sequía con unos déficits muy importante. Más que hablar de sequía tenemos que hablar de que hay un cambio climático permanente y qué, además, cuando uno ve las curvas, se da cuenta que no es una sequía que se mantenga estable, por cada década la sequía va aumentando algunos puntos porcentuales y eso debe llamarnos la atención y tomarlo en cuenta, no podemos ignorar el tema de la sequía.

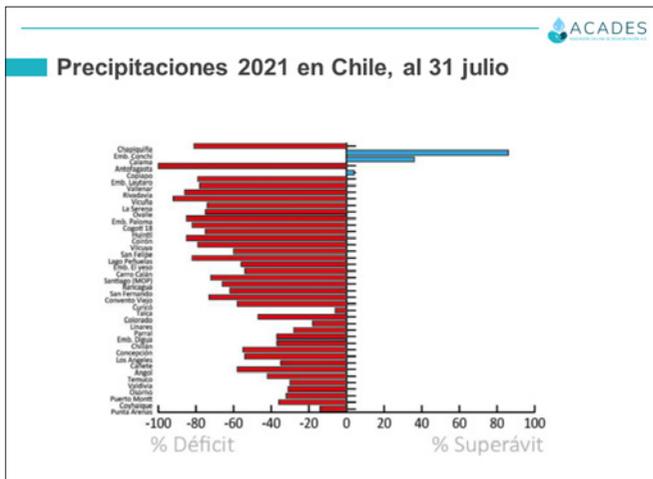


Figura 8

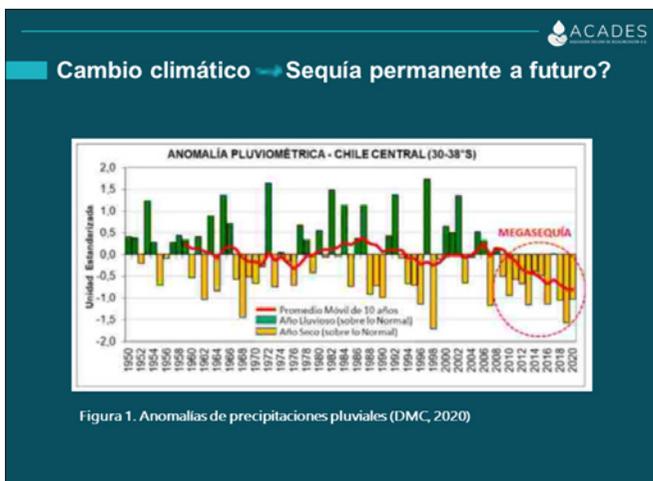


Figura 1. Anomalías de precipitaciones pluviales (DMC, 2020)

Figura 9

Por lo tanto, vale la pena que nos hagamos la siguiente pregunta: ¿y si la sequía continúa o crece en los próximos años? (Figura 10). ¿Qué pasa si se hace permanente este déficit? Y si en el 2022 y 2026, los próximos 5 años llueve 5% menos como sufrimos en la última década, y si llueve 10% menos, ¿qué vamos a hacer?, ¿habrá agua para regar?

¿Y si la sequía continúa o crece en los próximos años?

¿Qué sucede si el déficit de lluvias se hace permanente?

¿Y si entre 2022 y 2026 llueve 5% menos que entre 2017 y 2021?

¿Y si llueve 10% menos?

- ¿Habrá agua para regar en Petorca, La Ligua, Quillota?
- ¿Tendrán agua potable Viña del Mar, Valparaíso o Maitencillo en el verano de 2023? Y en 2024?
- ¿La Serena & Coquimbo?
- ¿Codelco Andina, Codelco Teniente, Los Bronces?

¿Santiago?

Figura 10

En Viña del Mar, Valparaíso, Maitencillo, estas preguntas se las hizo el Gerente General de la Sanitaria de la V Región, por medio de la prensa y él habló de mayo de 2022 y dijo que si no llovía y la ciudadanía no cambiaba sus hábitos y no empezaba a cuidar el agua de manera urgente, a partir de mayo del próximo año, esto es en siete meses más, nadie puede asegurar que no haya racionamiento en Viña del Mar. Vale decir, en el Congreso Nacional podría haber racionamiento mientras se discuten temas relacionados con el agua.

Hay que hablar de La Serena, Coquimbo y sin llevarlo a más ciudades, sino que, por ejemplo, a faenas mineras, Codelco Andina, Los Bronces, Codelco Teniente, ¿van a seguir produciendo cobre, aunque no haya agua en la zona central? Son preguntas que nos llevan a los que vivimos en Santiago: ¿Y Santiago? Si no llueve o si llueve menos, ¿va a bastar con las aguas tradicionales o con las fuentes del Maipo utilizadas hasta ahora?

Entonces, ahí entramos a lo que denominamos desalinización. Y para decirlo de manera muy simple, cuando hablamos de desalinización nos referimos a disminuir las cantidades de sales disueltas que hay en una solución, en este caso el agua de mar, también puede haber agua de pozo, digo esto para tener un orden de magnitud (Figura 11).

Desalinización o desalación: una parte importante de la solución!

La desalinización (o desalación) es un proceso mediante el cual se remueve las sales del agua de mar o salobre.

Normalmente el agua de mar contiene una concentración típica de sales disueltas, por ejemplo:

- Océano Pacífico < 36,000 ppm de TDS (3,6%)
- Mar Mediterráneo < 40,000 ppm (4%)
- Mar Muerto < 370,000 ppm (37%)

El agua potable en Chile (NCh 409):

- TDS < 1500 ppm **(24 veces menos que el agua de mar)**
- CL < 400 ppm **(50 veces menos que el agua de mar)**

Figura 11

El océano Pacífico tiene en la Costa de Chile en promedio 36.000 ppm de Sólidos Totales Disueltos (TDS) 3,6% de sales, el mar Mediterráneo tiene 40.000 ppm, tiene 10% más TDS, y si nos vamos al mar Muerto tiene 10 veces más sales disueltas que lo que tenemos en el Pacífico.

Y de lo que se trata cuando uno quiere producir agua potable a partir del agua de mar, es cumplir con la Norma Chilena que está en concordancia con la Organización Mundial de la Salud, por lo tanto, tenemos que bajar de 36.000 ppm a 1.500 ppm en sólidos totales disueltos, y particularmente en los cloruros, tenemos que bajar 50 veces con respecto a lo que tiene el agua de mar.

Así que hay un desafío importante, ahora ¿por qué nosotros hablamos de que la desalinización de agua de mar es una fuente a la que uno puede acceder y en una fuente “inagotable”? (Figura 12). De toda el agua que hay en el planeta el 97,5% está en los diferentes mares, solo el 2,5% es agua dulce, ahora de ese 2,5%, 2/3 es agua que el humano no puede usar de forma directa porque son glaciares o aguas que están congelada en los polos; de toda el agua que hay, aproximadamente un 0,8% es el agua que está en ríos, lagos, humedales y subsuelos, incluyendo las

aguas subterráneas, el mar tiene 100 veces más que todos los ríos, lagos, aguas subterráneas juntas, o sea, hay una fuente a la cual afortunadamente Chile tiene acceso, y que es “inagotable”.

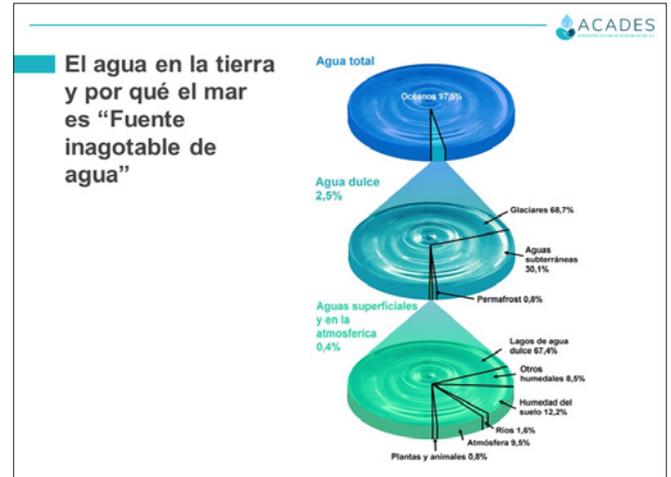


Figura 12

Para esto el hombre ha desarrollado tecnologías de desalinización, que las vamos a ver en dos grupos: las que son térmicas y las que son de membranas o filtración (Figura 13).

Tecnologías de desalinización

Térmicas

MED | MVC | Flash

Membranas

Osmosis Reversa

Figura 13

Y en las térmicas que es una Planta desalinizadora ubicada en Ventanas, V Región. A la derecha, algún ejemplo de una Planta de Osmosis de tamaño grande, específicamente, un arreglo de las membranas.



Figura 17

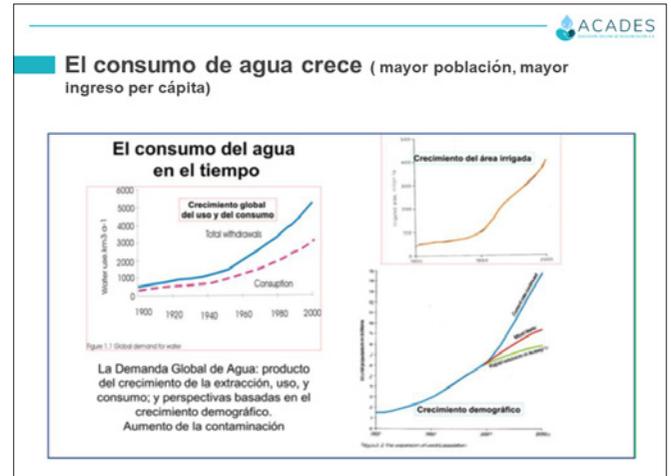


Figura 18

Lo que nos muestra la historia es que el consumo de agua en el planeta sube por dos razones: sube de forma directamente proporcional por el crecimiento de la población y de los ingresos, es decir, cuando aumenta la población aumenta el consumo, no solo porque cada persona necesita cierta cantidad de agua para tomar, sino que cada alimento que consume, cada prenda de ropa, cada bien tiene una huella de agua muy importante y, a pesar de que el tiempo nos ha permitido mejorar la huella de agua, ella está claramente inserta en todos los aspectos mencionados, pero el mayor consumo se ve por la combinación de mayor riqueza en el mundo y de una mayor población.

Cuando aumenta el ingreso per cápita también aumenta el consumo de agua (Figura 18), y se da en términos de que la gente consume más agua, más alimento, se ducha o riega jardines, en fin, se va haciendo proporcionalmente.

¿Qué pasa en Chile? (Figura 19). Cuando hablamos del consumo de agua por tipo de usuario, es importante tener en consideración los porcentajes de consumo por actividad.

Cuando hablamos de la desalinización en Chile, la minería tiene un rol muy importante, que vamos a ver más adelante. El consumo de agua de mar en la minería, particularmente en el norte de Chile, desde el año 2010 al 2020 ha crecido 17 veces. Una parte importante de esta agua de mar la utilizan algunos proyectos mineros, cerca de Antofagasta, pero después han seguido varios otros proyectos que utilizan agua de mar. Pero la gran mayoría de los proyectos, sobre todo proyectos futuros, van a tener que utilizar agua

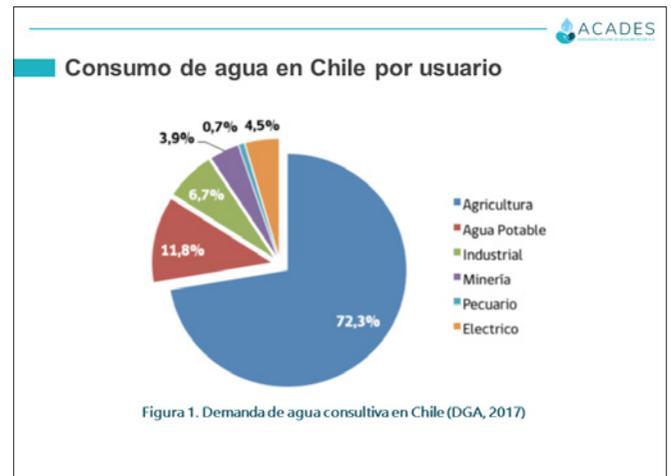


Figura 19

de mar. Ayer salió en el Diario Financiero un artículo que nos da mucho optimismo, relataba que el consumo de agua desalinizada ha crecido 30% en la década y ha permitido que la minería empiece a disminuir el consumo de agua fresca de fuentes convencionales o superficiales. A mí me gustaría mencionar en particular el esfuerzo que ha hecho Minera Escondida, que ha usado en su desarrollo minero agua desalinizada (Figura 20).

Un pronóstico para los próximos años y podemos ver que el agua continental va a bajar en forma un poco más marginal y el agua de mar va a seguir creciendo; nosotros creemos que va a crecer a una tasa por sobre el 10% en la próxima década y probablemente el uso del agua continental va a bajar (Figura 21).



Figura 20



Figura 22

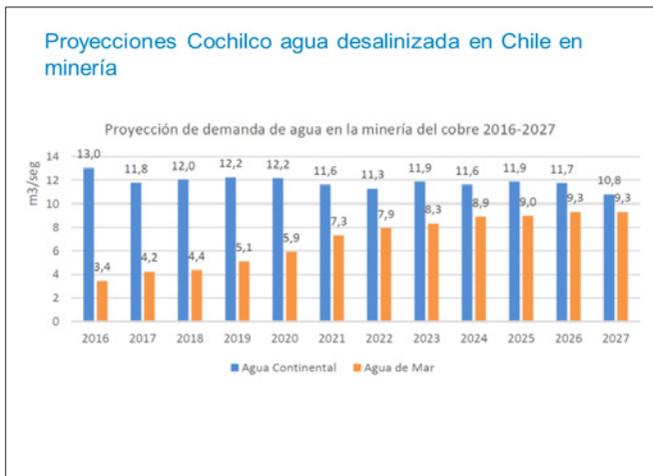


Figura 21



Figura 23

Algunos ejemplos de Plantas “pequeñas y medianas”, Plantas que realizan el proceso de desalación con flujos entre 5 y 50 litros por segundo, pero hay muchas otras, si uno va a un extremo, los que navegan podrán saber que hay algunos veleros que tienen sus propias Plantas desaladoras, así que Plantas desalinizadoras hay desde el tamaño de una casa, tipo “Home Center” hasta Plantas para grandes ciudades como es el caso de Antofagasta, por ejemplo. Y esto lo vamos a ver en todo Chile, las hay en Arica, Iquique, al sur de Punta Arenas, incluso en Cabo Negro (Figura 22).

La desalinización en Chile, veamos las grandes desalinizadoras que están instaladas (Figura 23). Escondida es el principal actor con 4.000 litros por segundo instalados

al sur de Antofagasta, en Coloso, el segundo actor, por volumen, es Aguas de Antofagasta que tiene una Planta en la parte norte de Antofagasta, en la Chimba, y también tiene Plantas en Tocopilla y en Tal Tal. Caitán que es un emprendimiento de empresas privadas que le suministra agua a un tercero, firmaron un contrato para producir agua desalinizada y venderle a Spence de BHP, hasta un total de 1.000 litros por segundo. De modo que BHP juntando Escondida y Spence tiene 5.000 litros por segundo de un total de 8.600 que tiene Chile, así que BHP Billiton es, sin duda, el líder en esta materia en Chile. Pero también está Candelaria, Aguas Cap, Manto Verde, son proyectos que hoy día generan para la minería alrededor de 6400 litros por segundo y, en conjunto, representan el 75% de lo que está instalando. Las sanitarias, Aguas Nuevas y Aguas

Antofagasta, unos 1.750 litros por segundo que representan un poquito más del 20%, agua de mar, las sanitarias de todo Chile tienen varias Plantas desalinizadoras de osmosis reversas para desalinizar agua de pozo, pero aquí estamos hablando de agua de mar principalmente.

Las principales desalinizadoras que están en construcción: Quebrada Blanca Fase 2 al sur de Iquique, tiene un proyecto muy grande, 1200 litros por segundo que va a estar produciendo agua el próximo año. Minera Los Pelambres está en construcción, una Planta de 400 litros por segundo, cerca de Los Vilos, que en este momento está en el proceso de pedir permiso para duplicar su tamaño. Aguas Pacífico es una Compañía privada que tiene capitales brasileros, con un proyecto en la V Región en la Bahía de Quinteros, para montar una Planta de 1000 litros por segundo, una Planta multipropósito. Ellos están tratando de vender el agua a terceros y ya iniciaron la ingeniería de la Planta desalinizadora y la construcción de la subestación eléctrica que la va a alimentar (Figura 24).



Figura 24

Y en licitación, que son proyectos que ya tienen sus permisos o que están obteniendo sus permisos, y que van a adjudicar la construcción de Plantas desalinizadoras, vemos en la lámina son proyectos muy importantes, como la Planta de Collahuasi de 1600 litros por segundo que queda al sur de Iquique.

Aguas de Antofagasta va a aumentar el tamaño de la Chimba para satisfacer todo esto, y muy importante, CODELCO, para su distrito norte, tiene una licitación que está en proceso

de negociación y que según ha declarado su Presidente Ejecutivo se espera adjudicar a fin de este año y firmar contrato por el suministro de agua por hasta 1956 litros por segundo, en una primera etapa de 840 litros por segundo.

Si sumamos la producción de la ampliación de Manto Verde lo que vamos a tener a fines del próximo año es aumentar de 8000 y algo, a 11.000 litros por segundo y hasta el 2026 estamos hablando de duplicar el agua desalinizada que tenemos hoy día.

Hay algunos proyectos (Figura 25) que están con sus permisos ambientales en regla y con sus concesiones marinas, sin embargo, todavía no se ha iniciado la construcción por diversas razones, siendo la principal que están esperando clientes que permitan que los proyectos sean financiados y cuenten con contratos de venta de agua a largo plazo, del tipo "take or pay"; si se fijan hay proyectos en la III, V, VI Región.



Figura 25

Ahí aparece Aguas Pacífico porque todavía está en proceso de firmar contratos de venta de agua, a pesar de que el inversionista tomó el riesgo de partir construyendo sin tener totalmente firmados los contratos.

Alguno de ustedes habrá escuchado o tendrá la idea de que si bien, la desalinización provee agua dulce o potable, no es una buena opción para el consumo humano, porque produce ciertos efectos que no necesariamente son positivos, y se repiten cuatro, lo que nosotros llamamos, en la asociación, "mitos".

Primero, la toma de agua de mar para que tengan una idea en términos generales, por cada litro de agua que yo tomo del mar produzco medio litro de agua desalinizada, un poquito menos. Y medio litro de salmuera, agua más salada.

La duda es bastante legítima. Es decir, si yo estoy tomando una gran cantidad de agua, a veces miles de litros por segundo, ¿qué pasa con toda la fauna marina, esto se aspira, es una especie de sifón que me va a aspirar todo y va a matar la vida? Hoy día se estudia y se diseña para que ese efecto se minimice, para eso se hacen estudios sobre las bahías, sobre donde van a estar las instalaciones, las tomas de agua de mar son a bastante profundidad y se hacen también a varios metros de distancia del fondo marino, lo cual minimiza el efecto y sobre todo se diseña para que la succión sea a una velocidad menor a 0,15 metros por segundo, velocidad que es normalmente menor que las corrientes naturales de las bahías en las que se instalan las tomas de agua de mar.

Segundo: Se van a utilizar químicos y esos químicos van a ser devueltos al mar y van a ser contaminantes. Y es efectivo, el proceso de desalinización requiere hipoclorito, cloruro férrico u otro coagulante, ácido, por nombrar los principales, y en el pasado tal vez cuando no se sabía mucho, cuando no había mucha regulación en el mundo, en varias partes efectivamente tu podías arrojar un químico en el mar y se produjo contaminación y se produjo daño, pero ese riesgo hoy prácticamente no existe, porque todo el uso de químicos en las Plantas de mediano y gran tamaño están muy regulados y si se utiliza hipoclorito, por ejemplo, en el mismo proceso de la osmosis reversa el hipoclorito no puede estar en contacto con las membranas y por lo tanto se neutraliza y uno garantiza finalmente que lo que retorna al mar son las mismas sales que estaban originalmente en el mar y lo que uno sacó del mar es lo que va a devolver y la diferencia es que en vez de tener 3,6% de sales disueltas, voy a tener las mismas sales por alrededor del 7% (Figura 26).

Mito: el consumo de energía (Figura 27). Efectivamente las Plantas de osmosis reversas, particularmente, consumen energía para poder llegar a la presión osmótica, pero no es más que lo utilizado en otros usos ...si yo lo veo para una familia de cuatro integrantes, si toda el agua que se consumiera en ese hogar fuera desalinizada, la energía eléctrica necesaria para producir el agua que consume ese hogar sería el equivalente de usar una hora el horno

microondas, una hora la plancha o 40 minutos un hervidor eléctrico, una estufa eléctrica una hora, en fin, hay ejemplos con todos los aparatos eléctricos que utilizan en sus casas y, si ponemos en la balanza, si no hubiera otra fuente de agua habría que optar por utilizar la plancha más de una hora o tener el agua para toda la familia, por eso decimos que es relativo.

Principales dudas & mitos ambientales

Toma de agua mar
 → La toma de agua de mar se "chupa" a los peces?
 Velocidad del flujo de agua / Corrientes / Profundidad / Rejas / Otros

Químicos
 → Se utilizan químicos en la desalinización?
 Si, los principales son hipoclorito, metabisulfito, coagulantes, etc. Se deben neutralizar luego de utilizarlos

Consumo mucha energía?
 3 a 3.5 KWh/m3 agua desalinizada

La salmuera, contamina el agua de mar?
 Con un buen diseño (estudiando las especies que habitan naturalmente en la zona de la descargar) con difusores no se percibe el cambio de salinidad en el agua de mar y a muy pocos metros

Figura 26

Energía

Energía requerida para desalinizar agua de mar

La energía eléctrica necesaria para desalinizar agua de mar y cubrir el consumo diario de una familia de cuatro integrantes, es similar a la que se requiere para mantener un refrigerador de bajo consumo.

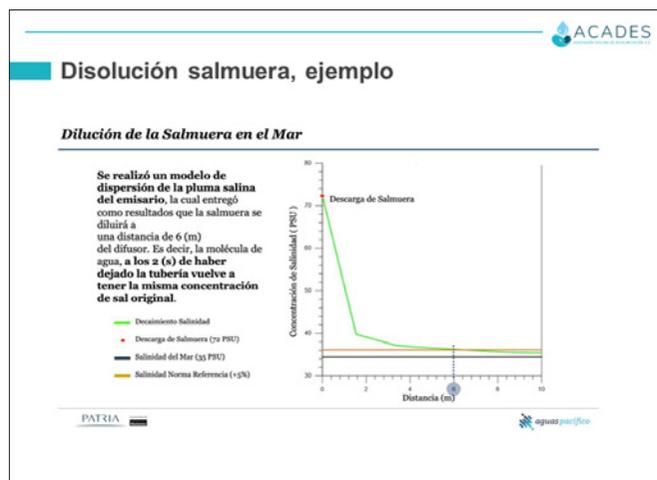
Esta energía es también comparable con el uso de algunos minutos de otros electrodomésticos:

Secadora: 38 minutos	Microondas: 72 minutos	Plancha: 60 minutos
Estufa eléctrica: 60 minutos	Hervidor: 40 minutos	ACADÉS

Figura 27

Afortunadamente, además en Chile, en particular, las desalinizadoras van a ir progresivamente y casi exclusivamente utilizando energía renovable, además vamos a tener una huella de carbono muy baja en el agua de mar.

Y otro “mito”, que tal vez es el más común y que más preocupación causa y con bastante razón, es lo que llamamos salmuera, ¿contamina el agua de mar?, ¿mata la vida, cambia el ambiente? Entonces, básicamente para un buen resultado, hay que dedicarle tiempo y estudios para ver bien cómo es el medio ambiente donde va a ser vertida esa salmuera, en diferentes Estaciones, en fin, y hay que diseñar para que se haga de una manera tal que a pocos metros de donde está siendo descargada la salmuera, el efecto ya prácticamente no se note. En la Figura 28, se puede ver para un proyecto concreto, ellos hicieron los estudios en Chile para que a seis metros de distancia de donde están los difusores de la tubería de la salmuera, básicamente no se perciba la diferencia en salinidad.

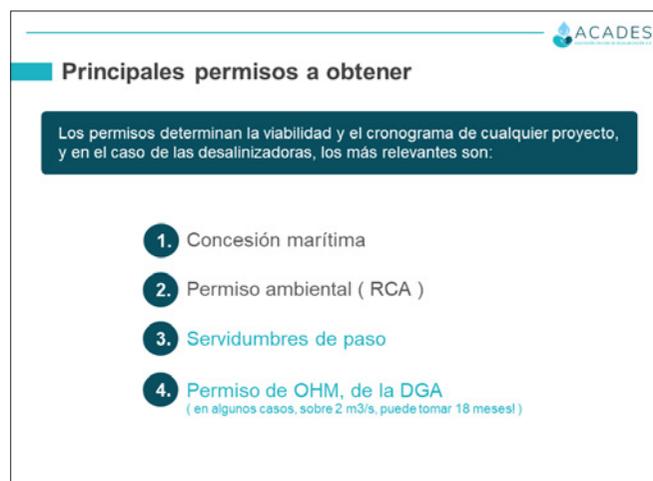


Entonces, destruyendo estos mitos y compartiendo con ustedes la conclusión de la desalinización bien hecha, con un estándar adecuado es compatible con un medio ambiente sano y sustentable, y es compatible con comunidades de pescadores, por ejemplo, que siguen desarrollando sus actividades de manera como lo han hecho históricamente.

Lo que viene ahora es preguntarse: ¿Cuáles son los pasos a seguir, para asegurarse que esto se haga bien y para tener la autorización? Básicamente dos permisos son fundamentales: la concesión marítima, que si bien es cierto hoy como está la Ley no es una concesión para desalinizar específicamente sino que es para instalar infraestructura en el lecho marino, tuberías, tomas de agua de mar, etc, y el permiso ambiental que, de nuevo, la normativa chilena no exige a las desalinizadoras tener un permiso específico

para actividades de desalinización como está hoy, pero se acoge de forma indirecta para tuberías, o para una actividad industrial.

Estos son los permisos más importantes para poder desarrollar desalinizadoras y hay otros dos permisos que se relacionan fundamentalmente con el transporte de las aguas, desde la desalinizadora hasta donde va a estar el uso (Figura 29). Quien instale la desalinizadora no tiene un régimen especial para poder tener cierta facilidad para imponer servidumbres como lo tiene una empresa sanitaria o como lo puede tener una concesión minera. Y lo otro, es que cuando se atraviesan con estas tuberías de transporte, accidentes geográficos como quebradas, o cuando el flujo es mayor a 2 metros cúbicos por segundo, o atraviesa zonas urbanas, se pide un permiso de obra hidráulica mayor que depende de la DGA.



Cuando se estudia el timing de una desaladora, los estudios y los permisos ocupan un tiempo muy importante, de 1 a 3 años, cuando son marítimas 2, 3 o más años, tenemos casos que se han demorado más de 6, los permisos ambientales, 2 años o un año y medio si no 3 años, los permisos de obra mayor de los que hablamos, 1 a 1,5 años. Y después viene ya el proceso de la construcción propiamente tal, porque ningún inversionista, ningún desarrollador va a adjudicar contrato sin tener los permisos ambientales, la licitación de éstos al menos toma un año, hacer los estudios de ingeniería, preparar y evaluar las ofertas toma un largo tiempo, la construcción y la puesta en marcha si se hace en proyectos pequeños, estamos hablando de dos años,

tal vez un poco menos, proyectos de gran tamaño, 3 años fácilmente (Figura 30).

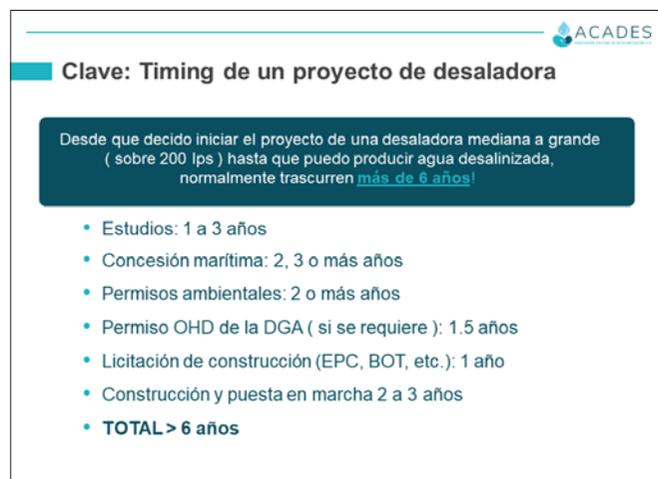


Figura 30

Estoy hablando de que, si don Luis Nario y yo nos ponemos de acuerdo para construir una Planta desalinizadora hoy para llegar a solucionar el problema que enfrenta el Gerente General del ESVAL, que es tener problemas de abastecimiento para mayo del próximo año, no hay forma de hacerlo, porque nos demoraríamos 6 años, estamos hablando de 2027 y para lo que pase entremedio habrá que buscar otro tipo de soluciones.

La desalinización del agua de mar es un tema incipiente, que no avanza o que no avanza con la velocidad que muchos de nosotros quisiéramos, y aquí viene un poco lo que planteaba hace 60 años el Presidente de Estados Unidos, John Kennedy, que decía: “si pudiéramos encontrar la manera de transformar el agua de mar en agua potable para el consumo humano a bajo costo, sería un logro de la comunidad, de la comunidad científica y un logro para la humanidad”. Eso planteaba Kennedy en el 62, pero hoy día es una realidad (Figura 31).

Cuando se plantea cómo asignar un costo o precio al agua desalinizada, hay dos aspectos: el Capex y el Opex. El Capex son básicamente los costos fijos, la inversión que hay que realizar y el Opex va más bien por los gastos que hay que realizar en energía y operación y mantenimiento, que son costos variables.

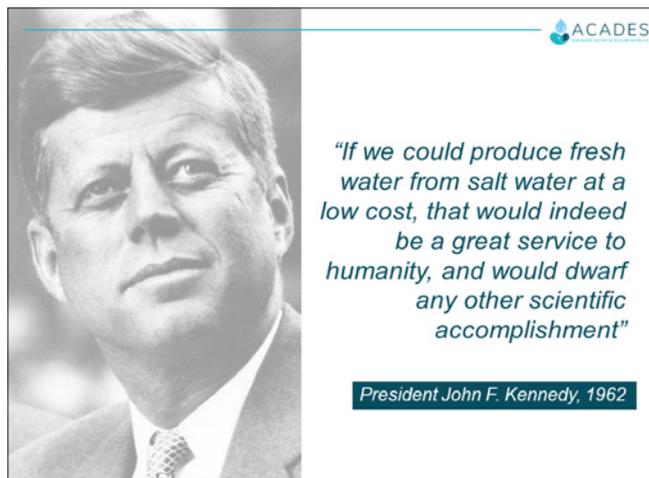


Figura 31

Cuando usted le pone precio al agua desalinizada, lo que hace es amortizar la inversión en el horizonte de tiempo que estudie 10, 20, 30 años y se divide por la producción anual que va a tener, y eso le va a dar en el fondo un flujo que va a decir: la amortización de la inversión más el costo fijo dividido en un número equis de años, equivaldrá a equis dólares por cada m³ de agua desalinizada producida, eso normalmente representa el 50% del costo del metro cúbico. Si alguien dice: si el metro cubico en la costa cuesta \$1, por orden de magnitud puedo pensar que el 50% representa el Capex y el 50% lo va a representar el Opex. De estas dos opciones deben tenerse en cuenta un montón de factores y tamaños, la economía de escala es muy importante, la ubicación, que esté cerca del mar, que la bahía sea amigable, que las obras marinas sean sencillas, que esté cerca del lugar de consumo, y también aspectos financieros; ¿qué tan bajas son las tasas de interés, cómo se puede conseguir financiamiento, qué tan largo es el plazo de financiamiento, qué tanto hay que poner de patrimonio versus deuda?, en fin, y también después de calcular el Opex que representa el 50%, donde la energía es la componente principal de la Opex, y puede representar un tercio o la mitad del Opex o más dependiendo del precio de la energía. Afortunadamente en Chile los precios de la energía van a la baja, así que el Opex va a ir bajando y eso en el agua desalinizada implica que su costo también baja.

Y otro muy importante que está en rojo, es el transporte de agua, y eso bien lo saben los mineros, por ejemplo, si para desalinizar el agua para Escondida, en Coloso el agua le cuesta \$1 el metro cúbico, transportarla de Coloso a la mina Escondida, podría costar alrededor de \$3. El

transporte puede ser 3-4 veces y en el caso de Quebrada Blanca o Collahuasi me atrevería a decir más de 4 veces el costo del agua desalinizada en la costa (Figura 32).

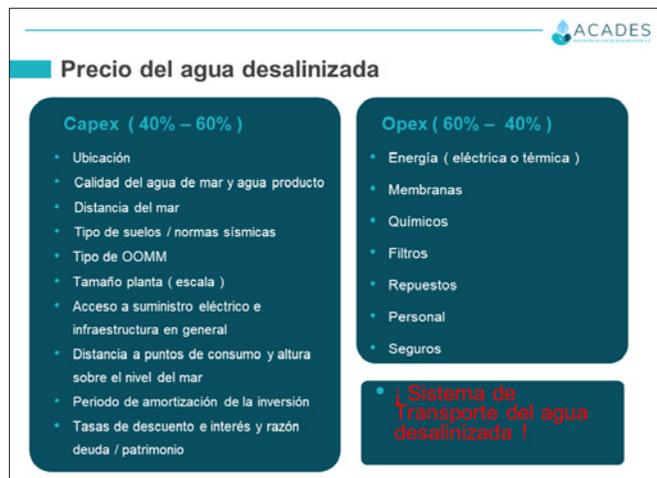


Figura 32

Básicamente para poder tener el menor precio del agua, hay que tener energía barata, hay que tener un sitio con buenas condiciones a la orilla del mar, hay que tener una demanda pareja de invierno y verano, y de día y noche; y para que esto sea “bancable” en términos baratos, debe tener un contrato del tipo “take or pay”, que asegura a los financistas el retorno sobre su inversión y para poder desarrollar estos proyectos de interés, la certeza jurídica es muy importante; porque estas son inversiones que para que puedan ser realizadas, para que el costo del agua no sea estratosférico, tienen que ser hechas con un horizonte de tiempo largo, 10, 20 e idealmente 25 años, esa es la condición más importante para obtener precios competitivos (Figura 33).

La desalinización para la agricultura es una pregunta que nos hacen a cada rato.

Depende: en países como Israel donde gran parte de la agricultura utiliza agua desalinizada, pero indirectamente; el agua desalinizada se utiliza primero para consumo humano e industrial, luego el agua se trata, se tratan las aguas grises y esas aguas grises se utilizan para la agricultura.

Aquí hay dos ejemplos con cultivos cíclicos como naranjas y paltas, donde uno pone la huella hídrica, eso significa el

número de litros de agua, que se consumen para producir un kilo de naranja o de palta (Figura 34).

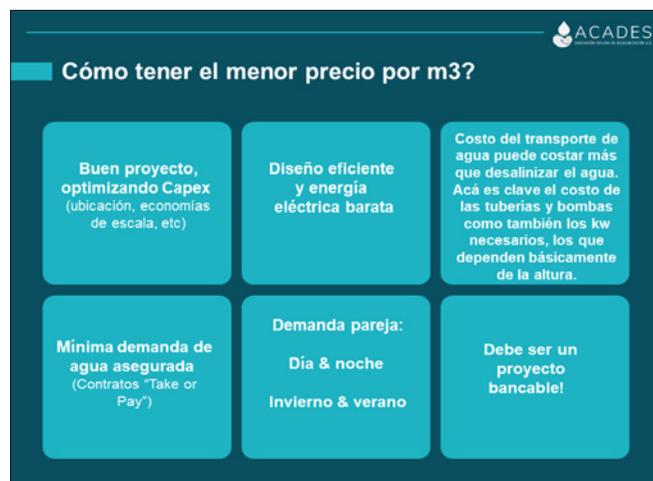


Figura 33

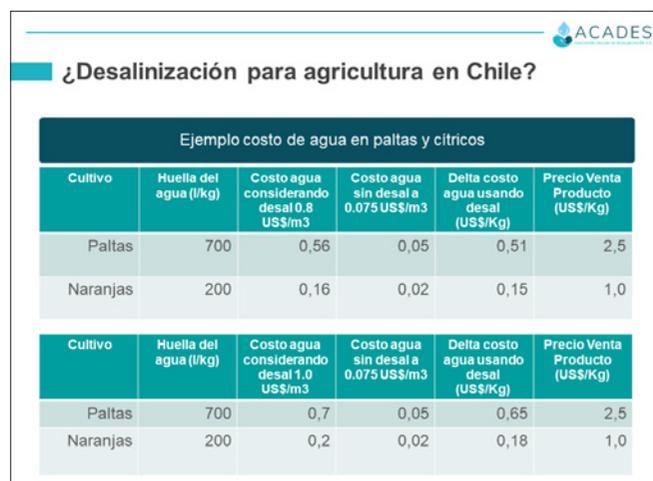


Figura 34

Nosotros lo que hemos hablado con algunos agricultores es que nos dicen que ellos hoy en día el agua que utilizan a \$0,7 el metro cúbico; 7 centavos de dólar el metro cúbico y si uno proporciona todo el escenario, el agua de mar desalinizada en el campo donde está el cultivo, queda a \$0,8 o a \$1, que son dos valores relativamente optimistas, o sea, esto es pensando en cultivos que estén a baja altura, 100-200 metros sobre el nivel del mar y a no más de 40 km de la costa; esto significa multiplicarle al agricultor lo que él considera el precio del costo del agua para hoy día entre 10 y 15 veces. No es un cambio de 10-15%, insisto

es un aumento de entre 10 y 15 veces en el costo del agua para producir un kg de producto.

Sin embargo, si yo tomo el precio de venta de las paltas, por ejemplo, a \$2,5, y veo que el delta al utilizar agua desalinizada versus aguas de fuentes superficial, tradicional cuesta 50 centavos, si es que mi margen de estos precios da para absorber esos 50 centavos de delta que representan un 20% del precio de venta, podría ser que la decisión fuese “ok, voy a consumir agua desalinizada, aunque me cueste un 20% del precio de venta porque la alternativa es eliminar el cultivo y suprimirlo”. Se requiere idealmente, que el cultivo sea de extensiones grandes, puesto que el agua desalinizada a mayor escala normalmente es más barata; como es un agua que va a ser cara su uso tiene que ser optimizado, con riego tecnificado, esto no va a ser factible en lugares demasiado lejanos de la costa y/o que estén a mucha altura. Esto tiene que ser para cultivos que estén a nivel del mar a poca altura, porque el transporte es una parte importante y significativa del costo del agua y además el ideal es que la demanda de agua sea pareja entre invierno y verano, lo que no siempre ocurre así en la agricultura, porque si detengo la Planta en invierno, por ejemplo, la amortización va a ser más alta y más alto el valor del metro cúbico de agua, va a salir más caro.

Y también es importante que el agricultor entienda que el compromiso que va a tomar con quien le entregue el agua es a largo plazo y a todo evento, no pueden tomar un contrato de: “yo te compro el agua cara mientras haya sequía y no te compro cuando llueva” pues para que tenga financiamiento deben tener garantizada la demanda (Figura 35).

Aquí hay unas fotos de ejemplos de Plantas, esto está al norte de San Diego, en una playa muy bonita que se llama Carlsbad (Figura 36). Se construyó una Planta de 2500 litros por segundo para reforzar el abastecimiento municipal, esto se hizo en la mitad de una sequía muy importante en California, en total armonía con el medio ambiente.

Cómo está la Planta hace un par de meses en Quebrada Blanca, al sur de Iquique, de 1200 litros por segundo (Figura 37).

Una foto bien interesante, también en el sur de Iquique, un sistema de agua rural, APR, con el apoyo estatal, lo construyó para apoyar a una caleta de pescadores de 1000 personas, una Planta de 12,5 litros por segundo, y esto se

ACADES

¿Desalinización y agricultura, es posible en Chile?

- Qué porcentaje del costo es el agua en el cultivo? Y más importante, qué porcentaje del precio de venta representa el agua?
- ¿Qué flujo de agua requiere? ¿Qué sistema de distribución de agua & riego tiene instalado?
- ¿A qué altura y a qué distancia está el cultivo de la desaladora?
1 km de tubería puede costar entre 500KUS\$ y más de 2MMUS\$
Cada 100 m de altura se requiere aprox 0.3 KWh/m3.
- ¿es la demanda de agua pareja en invierno & verano?
- ¿puede el agricultor comprometerse a esquemas “take or pay” por 10 o más años?

Figura 35

ACADES

Ejemplo planta 2500 lps
Carlsbad, San Diego, USA



Figura 36

ACADES

Ejemplo planta 1200 lps
Quebrada Blanca Fase 2



Figura 37

hizo en base a Plantas modulares, con contenedores, con operaciones básicamente automáticas, de manera que esto es posible en cualquier escala (Figura 38).

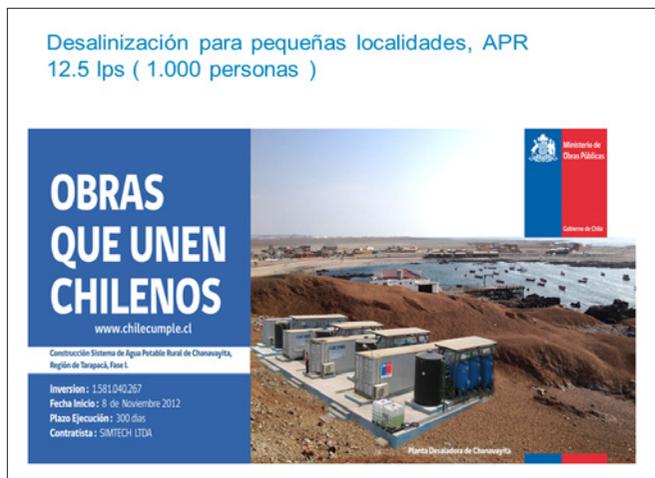


Figura 38

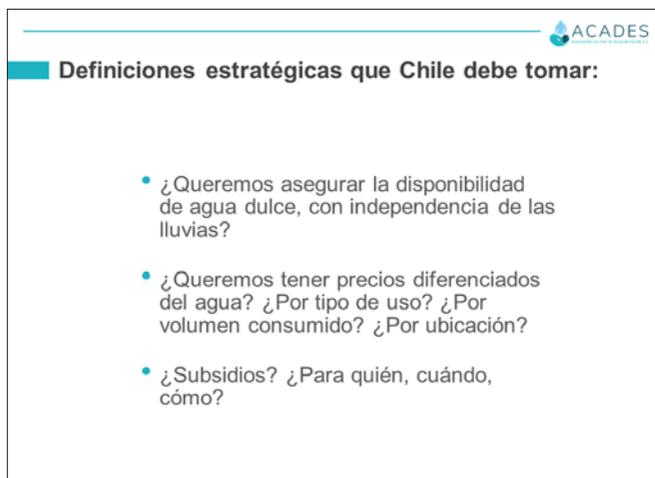


Figura 39

Aquí viene un poco la conclusión de esta conferencia (Figura 39). Definiciones que Chile debe tomar: ¿queremos asegurar la disponibilidad de agua dulce, con independencia de las lluvias? O creemos que es muy caro y mientras tanto vamos a cruzar los dedos para que llueva. ¿Queremos tener la estructura tarifaria como tenemos hoy día o hay que pensarla de nuevo y ver cómo se hace en otros países? En que el consumo no tiene un precio diferente para una casa, si se consumen 10 m³ al mes tienen un precio, pero si se consumen 200 se va incrementando

el precio marginalmente, de manera que incentive al final a la persona que tiene un lindo jardín a que reemplace el pasto que es muy intensivo en verano en el uso de agua, por ejemplo, por cultivos que consumen menos agua, por estación. ¿Vamos a cobrarle más caro el agua a un habitante de una ciudad que tenga utilización de agua desalinizada o que no tenga otra fuente, como Antofagasta versus un habitante de una región que tenga agua de la lluvia?, ¿vamos a hacer subsidios cruzados o no? Por tipo de uso, ¿vamos a cobrarle distinto al agua potable domiciliaria que al agua potable industrial o minera?, ¿vamos como sociedad a decidir que nuestros impuestos vayan a ese tipo de consumidores?, ¿con qué fin?, ¿cuándo?, ¿en qué forma? Son preguntas que vamos a tener que respondernos en la Asamblea Constituyente, y parte en el Congreso y en parte también en lo personal, por ejemplo, que cada uno de nosotros tome como meta disminuir la duración de la ducha que me doy todos los días.

El Marco Regulatorio que hoy tenemos en Chile no regula el agua desalinizada directamente, básicamente toda la regulación de aguas que hay en el código de aguas y en la legislación chilena hace referencia principalmente a aguas continentales.

El agua de mar que es un bien nacional de uso público y la desalinización no está tipificada hoy día. Hay un proyecto en el Congreso, además del Código de Aguas que se está modificando, pero fundamentalmente lo que se piensa hacer y se lleva pensando un tiempo, es definir el agua de mar como bien de uso público, el agua desalinizada sigue siendo agua definida como bien nacional de uso público.

El Proyecto plantea fijar una concesión marítima para la desalinización, que va a tener ciertas obligaciones y ciertos derechos, se va a dejar explícitamente definido que caudal de agua desalinizada se producirá, el agua de mar desalinizada va a tener prioridad para consumo humano, y también se va a tipificar que los proyectos de desalinización requieran pasar o sean sometidos a evaluación ambiental, cosa que en principio hoy no ocurre de forma directa. Hoy una desalinizadora no necesariamente tiene que pasar por un proceso ambiental, podría ser que desaladoras pequeñas no lo requieran por las tuberías que utilizan.

Y la pregunta subrayada es: ¿estos cambios que se están pensando a nivel legislativo hoy, ayudan a viabilizar nuevos proyectos de desalación? (Figura 40).



Marco Regulatorio

Hoy el uso de agua de mar para desalinización no está regulado. (pues no es agua continental)

Se plantean cambios importantes:

- Agua de mar como bien nacional de uso público
- Agua desalinizada como bien nacional de uso público, pero los titulares de la concesión marítima podrán aprovechar las aguas resultantes en la cantidad y con la finalidad que fueron autorizadas
- Concesión marina especificaría para qué tipo de uso será el agua desalinizada producida, debe ser definido al solicitar la concesión.
- Siempre prevalecerá el uso para el consumo humano, doméstico y el saneamiento, y para la mantención de un caudal ecológico en los acuíferos
- Todos los proyectos deben someterse al sistema de evaluación ambiental

Estos cambios, ayudan a viabilizar nuevos proyectos de desalación?

Figura 40



Artículo 2º.- Existirá una Estrategia Nacional de Desalinización, la cual tendrá por objeto:

- a) Definir las prioridades para el uso del agua de mar, entre las que destacarán el consumo humano, doméstico y el saneamiento.
- b) Procurar la eficiencia de su tratamiento y aprovechamiento.
- c) El uso armónico y sustentable del borde costero.
- d) Evitar daños ambientales.
- e) Recuperar acuíferos sobreexplotados.
- f) Coordinar los esfuerzos públicos y privados que apunten hacia dichos objetivos.
- g) Elaborar planes vinculantes y participativos.
- h) Elaborar y actualizar un inventario categorizado de plantas desalinizadoras, según ubicación, tecnología y otros componentes.
- i) Establecer una mesa técnica para discutir las tecnologías disponibles, el rendimiento energético y sus implicancias.
- j) Generar incentivos para la innovación y desarrollo tecnológico.
- k) Considerar, en el caso del aprovechamiento para fines productivos, compensaciones de agua desalada para pequeñas comunidades costeras con déficit de agua para consumo humano.
- l) Considerar flexibilizar criterios de rentabilidad social por parte del Ministerio de Desarrollo Social para financiar proyectos de desalinización de aguas. La referida estrategia será definida a partir de un proceso participativo que incorpore consultas a las comunidades y entidades que tengan un interés afectado, realizado en cada región del país que tenga acceso al litoral.

Figura 42

Aquí está, textual, el proyecto que está en el Senado (Figuras 41 a 44) que es básicamente lo que les decía al principio, la pérdida de salinidad producida por el trabajo e ingenio humano con la desalinización del agua de mar no la hace perder su carácter de bien nacional de uso público y aquí se abre una interrogante que el mismo proyecto trata de aclarar, diciendo que la desalinización marítima, la instalación, va a poder hacer uso del agua desalinizada, pero todas maneras incluye este concepto de agua desalinizada como bien de uso público, que vale la pena tener presente porque hay un montón de implicancias en el uso del agua, en lo que puede suceder con el agua en oportunidades especiales. Se va a desarrollar una estrategia nacional de desalinización, que nos parece muy bueno que haya una estrategia, que se aborde el tema integralmente.



Proyecto en el Senado

Artículo 3º.- Modifícase el decreto con fuerza de ley N° 340, de 1960, del Ministerio de Hacienda, sobre concesiones marítimas, del modo que sigue:

- 1.- Agrégase en el inciso primero del artículo 3º, la siguiente oración final: "Los solicitantes de agua de mar destinada al funcionamiento de plantas desalinizadoras deberán señalar la cantidad de agua que requieren, expresada en litros por segundo y justificar su finalidad."
- 2.- Incorpórase el siguiente artículo 3º bis, nuevo:
"Artículo 3º bis.- Siempre prevalecerá el uso para el consumo humano, doméstico y el saneamiento, y para la mantención de un caudal ecológico en los acuíferos."

Figura 43



Proyecto en el Senado

La concesión que se autorice para instalar una planta desalinizadora, incluye la autorización para extraer agua de mar, desalinizarla, distribuirla y aprovecharla por el plazo y las cantidades que para este efecto se determine.

La pérdida de salinidad producida por el ingenio humano, no provoca la desnaturalización del agua de mar y su carácter de bien nacional de uso público, pero los titulares de la concesión marítima podrán aprovechar las aguas resultantes en la cantidad y con la finalidad que fueron autorizadas, sin requerir de otra concesión. Podrán también aprovechar las aguas de descarte, en la medida que su aprovechamiento no implique intrusión salina en acuíferos o corrientes de agua natural.

Figura 41



Proyecto en el Senado

Artículo 4º.- Los proyectos sobre instalación de plantas destinadas a la desalinización de agua de mar deberán someterse siempre al sistema de evaluación ambiental establecido en la ley N°19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente y su reglamento.

Figura 44

Los solicitantes de agua de mar van a tener que explicitar al momento de una concesión cuál es el uso que se le va a dar a esa agua, y eso nos parece que puede ser complicado porque, si yo como desarrollador hoy día digo que por ejemplo, quiero hacer un proyecto para dar agua potable a la población “X” y en el intertanto aparece un proyecto agrícola que quiere comprarme agua para regadío, no le voy a poder vender el agua porque mi concesión no lo va a permitir, esto va a obligar a que, para financiar los proyectos, van a tener que tener los contratos firmados con el tipo de usuario y el usuario va a tener que decirme para que tomé el agua.

Podría darse el caso que una sanitaria que le venda agua a una industria diga: no, no le voy a vender porque no va a estar tipificado, de todos los proyectos van a pedir las concesiones marinas diciendo que le van a vender agua de la A a la Z, muy posiblemente siguiendo los modelos de las escrituras, cuando para estar cubiertos, se enumeran poderes para un sinnúmero de acciones posibles.

Y un artículo muy importante que se ha puesto es que siempre prevalecerá el uso para el consumo humano, doméstico y saneamiento, y para la mantención del caudal ecológico en los acuíferos.

Este es un artículo que consideramos muy importante aclarar, si se va a definir así, si hay consenso de nuestra sociedad de que sea así, parece de sentido común, pero hay que darse cuenta de que esto podría implicar, por ejemplo, de que en un escenario como el que tenemos hoy, una Compañía Minera que haya hecho su inversión, podría decidirse que dada a la condición de emergencia, la tubería que le lleva el agua a la mina se va a intervenir, y esa agua se va a desviar de la sanitaria para que le dé agua a la población. Y si es así eso debería quedar explícito, el mecanismo, el procedimiento, todos los detalles, de lo contrario las Plantas de desalinización, no van a ser financiables por la banca privado y se van a tener que limitar a proyectos estatales.

Y todos los Proyectos deberían pasar por evaluación ambiental, creemos que esto también será una dificultad bien grande para proyectos de caletas de pescadores pequeños.

Como ACADES, lo que hemos hecho es ponernos a disposición de la autoridad, de los gremios, de los usuarios para, en conjunto, tratar de proponer un marco regulatorio que, cuidando el medio ambiente, a las comunidades y

poniendo como prioridad el consumo humano; al mismo tiempo nos permita garantizar que cuando se requiera agua desalinizada, va a poder construirse la infraestructura necesaria para producirla. Y para eso vamos a mirar todo el sistema, no solamente de agua desalinizada, sino la generación, la transmisión y la distribución. La idea es que entre todos poder incentivar esto (Figuras 45 y 46).



Figura 45



Figura 46

Y como conclusión (Figura 47). Chile no tiene otra opción que invertir en desalinización y transformarlo en una política pública que incentive la desalinización, que ayude con imaginación a destrabar, acortar plazos de permisos sin bajar la calidad de los proyectos, la información de lo que se requiera, educar a nuestra gente para que cuide el

agua, la desalinización es la última herramienta a la que vamos a echar mano y consumir menos agua en todo. La minería, a propósito, da un muy buen ejemplo de cómo ha ido haciendo más eficientes sus procesos racionando cada vez más el agua, pero es una industria a la cual todos tenemos que mirar, la agricultura tiene que mirar lo que ha hecho la minería, la industria en general tiene que hacerlo, ¿por qué no el usuario domiciliario también?, tiene que cuidar el agua y a futuro se pudiese pensar en recuperar aguas grises a nivel de departamentos, a nivel de urbanizaciones.

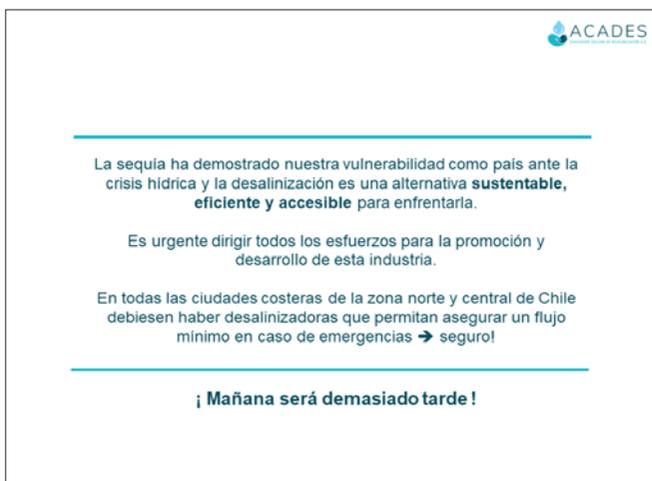


Figura 47

El agua es y será cada día más escasa en la zona central de Chile como la conocemos, y, por lo tanto, al ser más escasa, va a ser más cara y va a ser más disputada, y como una manera de mitigar el problema, vamos a tener que traer agua de mar desde la costa a ciudades como Santiago, sin lugar a duda. Para eso tenemos que trabajar juntos desde ya en todo.

Gracias.

Al término de su Conferencia, el Sr. Carlos Foxley respondió consultas y comentarios de los asistentes. A continuación, reproducimos lo más relevante de estas intervenciones.

Sr. Esteban González.

—¿No sería mejor controlar/regular a la industria ganadera y minera en su consumo de agua y retención, ya que estás

mismas al retener el agua provocan una sequía aguas abajo? Netamente desalinizar el agua de mar es una opción saludable para empresas mayores que necesitan mayores cantidades de agua, pero la población pagará ese precio por la falta de control que se tiene en la industria (ganadera y minera).

Sr. Carlos Foxley.

—Muchas gracias por la pregunta; ella engloba varias otras. Si vamos un poco atrás, uno de los problemas que tratamos en Chile, particularmente en regiones, como la región de Atacama, por ejemplo, lo ven muy seriamente. Tenemos hoy día el otorgamiento de derechos de agua y que se está cambiando en el nuevo código. Básicamente antes se otorgaban derechos de agua que eran perpetuos; con el tiempo nos fuimos dando cuenta que se otorgaron en Chile más derechos de agua de los que eran compatibles con la sostenibilidad de las cuencas, entonces aquí hay una realidad, y es que en Chile hay más derechos de agua otorgados que los que en realidad hay existentes, nosotros creemos que más que poner cuotas o poner restricciones, como el agua de mar es prácticamente infinita, no debiésemos tener restricciones en términos de dar acceso, no habría que tener restricciones, solo asegurarse de que los proyectos cumplan con los estándares exigidos.

Sin embargo, las señales de precio son muy importantes para reflejar escasez, cuando un bien es gratis su uso es indiscriminado, cuando un bien comienza a ser escaso y tiene un precio relativamente alto, su consumo empieza a ser optimizado y cuidado. Y, en segundo lugar, tenemos un tema de la ley de gravedad, bombear agua del nivel del mar hacia la punta del cerro donde están las mayorías de las minas en Chile, es un tema y lo mencionaba al principio. Por ejemplo, si el agua de mar en Collahuasi cuesta \$5, a nivel mina, es muy probable que a nivel del mar cueste \$1 o menos, y por lo tanto lo razonable sería, si Collahuasi hoy día tiene agua de pozo, que saca de la cercanía de la mina a 4000 metros de altura, y para liberar esas aguas va a construir una desaladora que va a bombear agua hasta la mina, no sería racional que toda el agua que se utiliza más cercana a la costa, ya sea por la sanitaria de la primera región, ya sea por otro nacimiento minero que esté aguas debajo de Collahuasi, utilizar agua desalinizada que tuviera menos bombeo y por lo tanto menos consumo de energía y así su costo fuera menor y todos ganáramos haciendo óptimo el uso de agua, eso se hace (hoy día) en algunas zonas.

Lo que hay que hacer, es facilitar el acceso al agua, eso se puede hacer de varias maneras: una de ellas es como lo hizo el Estado de Chile, a través de la empresa Econsa, subsidiando la inversión y con la construcción de infraestructura de una Planta de desalinización, así que de ese modo, el agua potable que va a tener la gente de Copiapó o Caldera, Tierra Amarilla, por medio de la desalinización no va a pagar el 100% de costo real que representa, sino que va a tener un subsidio directo a través de la inversión que hizo el Estado en la inversión de dicha Planta.

Lo que creo que no debe pasar es que alguien que quiera hacer una Planta desalinizadora, que cumpla con las leyes ambientales y con todos los requisitos, y después pagar el costo de esa Planta desalinizadora, con los impuestos, los royalty, las regalías que definamos, no pueda hacerlo, o sea si hay voluntad, si se puede hacer técnicamente y convertirlo en viable, como sociedad pudiésemos proponer hacerlo y hasta incentivarlo, siempre cuidando el medio ambiente, y esto no se refiere solo a las Plantas desaladoras propiamente tal, sino que también tratar de tener fuentes de energías renovables, a ser muy eficientes, etcétera.

Sr. Matías Pinto.

—¿Existen iniciativas de proyectos conjuntos entre minería y sanitarias, (a lo que apunta lo que tu acabas de explicar) pero que exista un proyecto conjunto donde haya un comportamiento contractual entre la sanitaria y la minera?

Sr. Carlos Foxley.

—Sí, eso funciona todos los días y hay dialogo permanente de todo tipo, hay dialogo para hacer este tipo de negocio, hay diálogos para que las sanitarias le vendan agua a las mineras, hay diálogos para que las mineras concurren con aportes a ciertas comunidades y ese aporte muchas veces se hace en que, si bien el agua es para la comunidad, la manera de administrarlo es a través de la empresa sanitaria que distribuye esa agua, de manera de que ella no sea dueña de esa agua sino que funcione como especie de puente entre la minera y la comunidad, se hace ahí y se debiese hacer no solo con las mineras sino con la industria en general.

Sra. Francisca Jalil.

—¿Tienen proyectos con descarga seca? ¿Cuánto aumenta el costo del metro cubico del agua desalinizada con descarga seca?

Sr. Carlos Foxley.

—Muy buena pregunta, uno cuando habla de salmuera tiene la sensación de que está hablando como si fuera un camión con sal y no es así. Si yo les mostrara dos vasos de agua, uno de agua de mar y otro de salmuera, no notarían la diferencia. Estamos hablando que es agua de mar con 3,6% y de 7% en caso de la salmuera, entonces la descarga seca implicaría básicamente dos procesos: uno evaporar la salmuera, lo cual requiere superficies extremadamente grandes y además debe estar cercana a la Planta desalinizadora, y eso es muy poco factible porque no hay espacios disponibles de esa magnitud. Y segundo, porque en la costa de Chile, el fenómeno de la vaguada costera disminuye mucho la radiación solar con respecto a lo que es la radiación en el interior, entonces el agua de mar desalinizada se torna inviable económicamente si, por ejemplo, hay que ir a Proyectos de cero descarga líquida. Los proyectos que se llaman de cero descarga. Se puede hacer y se hace en aplicaciones industriales donde los flujos son muy pequeños y se colocan, por ejemplo, cristalizadores, se colocan segundos o terceros pasos de osmosis y después los residuos sólidos se disponen en vertederos autorizados pero para que tengan un orden de magnitud según, si el proceso de osmosis de reversa consume en un orden de 3 kw hora por metro cúbico, un cristizador podría requerir 50 kw hora por metro cúbico, de manera que estamos hablando de consumir 15 o 20 veces más energía eléctrica para poder tener 0 descarga, es demasiado caro.

Sr. Erwin Plett.

—¿Existen algunos estudios de lo que ha ocurrido en lugares como Antofagasta? donde hay Plantas que están operando desde hace tiempo, ¿si ha habido cambios medidos en la biodiversidad tanto superficial como aves o en los peces y en el fondo marino?

Sr. Carlos Foxley.

—Sí, muy buena pregunta y la voy a vincular con otra pregunta que no sé si han hecho.

Voy a partir un poco al revés, hoy para obtener la aprobación, básicamente cuando se vierte salmuera al mar hay que preocuparse de cumplir con el Decreto Supremo 90; el Decreto Supremo 90 no establece requisitos para la desalinización, lo que la mayoría de las Plantas desalinizadoras hacen es que toman la Norma que hay en otros países del mundo donde sí lo tienen normado como es el caso de España, Australia, y normalmente se usan estas que son las más exigentes. Establecen que antes de hacer una Planta hay que simular la pluma de la dispersión y asegurarme que a cierto número de metros la salinidad no aumente más de un 5%, en el caso australiano y un 10% en el caso español, y eso es lo que se hace para obtener el permiso. Después se debe monitorear a veces en línea, a veces en forma discreta, tiene ciertos parámetros para asegurar lo que se está descargando es lo que se prometió. Pero es algo que tenemos que ir más allá y tenemos que, efectivamente, y de hecho varias desalinizadoras lo están haciendo, aquí hay que desarrollar conocimiento, tenemos muy buenas universidades, tenemos institutos como el oceanográfico de Chile, tenemos universidades, como la Universidad Católica del Norte, la Universidad de Antofagasta, la Universidad de Playa Ancha, en fin, podría nombrar a muchas universidades que están ubicadas en ciudades costeras y tienen que integrarse, tenemos que hacer estudios. Idealmente debiésemos partir haciendo estudios de todas las bahías hoy mismo, tener caracterizada la biota, la fauna marina, y después tener el estudio de lo que sucede a la salida de los emisarios, a la cercanía, en las cercanías de las tomas de agua de mar, eso deberíamos difundirlo o que la población pudiese obtener un sitio web donde acceder y ver de manera online lo que está sucediendo, hay dos caminos que tenemos que trabajar. Yo creo que como sociedad tenemos el derecho y el deber de exigir que sea así, que cuidemos nuestro medio ambiente, la industria está muy en línea con eso y hoy además tenemos el acceso a la tecnología, tenemos los profesionales en Chile y esto hay que incentivarlo.

El Estado tiene que jugar un rol, la empresa privada tiene que jugar un rol y creo que a ese momento habrá que modernizarlo y hacer los cambios necesarios para que todo quede más allá de una declaración imposible, y sea exigible.

Sr. Javier Aguirre.

—*¿Existe reales posibilidades para pequeñas y medianas empresas que buscan desarrollar la desalinización?*

Sr. Carlos Foxley.

—De todas maneras, ahora voy a poner un depende, si la empresa está en la costa definitivamente, y de hecho podemos darle varios ejemplos de empresas que hoy lo hacen, sin ir más lejos en Mejillones, uno puede encontrar por ejemplo compañía como Molymet, que están desalinizando hoy día; Gasatacama tiene una desalinizadora de 30 litros por segundo, hay pesqueras que tienen desalinizadoras de 5 litros por segundo que son del tamaño de contenedor, esto es factible. Las empresas eléctricas, las carboneras, por ejemplo, o las generadoras de ciclos combinados son grandes empresas, consumen poca agua porque recirculan la mayoría, pero consumen lo que se llama “make up water” de las calderas y eso es poco. Pueden ser 6 litros por segundo 8 litros por segundo y no hay problema. El problema es si está lejos de la costa, porque ahí el transporte va a ser muy caro, entonces hay que anotar varios consumidores, varias empresas medianas, varias PYME, algunos agricultores de cultivos muy específicos que, con riegos tecnificados y con alta tecnología, entre todos sumen un caudal que permita amortizar la inversión en transporte desde la costa, entonces sí va a ser posible tener a precio económicamente factibles la desalinización en Santiago, por ejemplo.

Sr. Javier Aguirre.

—*¿Las tecnologías que estamos usando son las más modernas y las más adecuadas para ofrecer protección?*

Sr. Carlos Foxley.

—Le podría contestar rotundamente que sí, definitivamente las Plantas desalinizadoras que se están construyendo hoy y con mayor razón aun las que se proyectan a futuro, si ofrecen protección. Normalmente los desarrolladores, los propietarios de los proyectos van mucho más allá de lo que la legislación exige en Chile hoy día y de hecho toman acuerdos voluntarios con las comunidades, fomentando la participación temprana, en fin, porque lo que se da en

Chile y en casi todos los proyectos es que, una vez que uno tiene la aprobación ambiental, hay que estar preparado para lo que es la judicialización de los proyectos.

Si no es por convicción va a ser por experiencia de que más vale invertir, de hacer un esfuerzo hacerlo bien, mucho más allá de lo que me exija la ley; hacerlo bien con el estado de arte de la tecnología, si no es por convencimiento por último va a ser para evitar problemas futuros, y eso se está haciendo en Chile hoy día; yo me atrevería a decir que el estándar de Chile en la actualidad no tiene absolutamente nada que envidiarles a los países más desarrollados del mundo.

Sr. Jorge Saldías.

—*¿Las Plantas desalinizadoras flotantes energizadas con energía renovable son una opción técnica, y económicamente viable para implementar en nuestras costas?*

Sr. Carlos Foxley.

—Sí, técnicamente no hay lugar a dudas. El proceso de la desalinización se puede hacer flotante, de hecho, en el mundo existen disponibles con Plantas desalinizadoras instaladas y hay de tipo osmosis reversas y también hay de tipo técnico, es decir, que evaporan y condensan agua de mar y funcionan con energías renovables, con energías tradicionales, así que técnicamente no hay ningún problema.

Comercialmente por ahora son más caras que las Plantas que están en tierra firme y por lo tanto ahí va a ser relativo, pero efectivamente es una opción técnica disponible y cuando hay huracanes y eventos de la naturaleza que destruyen la infraestructura del suministro de agua para la población, por ejemplo, en algunas islas del Caribe, se ha utilizado esta solución y permanecen instaladas no solo por semanas sino por años, como la opción mientras se construye la estructura definitiva. Pero hasta ahora en términos generales responden más bien a situaciones específicas, normalmente es más barato hacerlo en tierra firme.

Sr. Francisco Javier Provoste.

—*Las dos principales Plantas desalinizadoras del mundo están en Israel, SOREK B y utiliza tecnología membrana ID y IDAN que opera con tecnología de osmosis inversa, ¿Cuál es la diferencia entre una y otra tecnología? ¿hay un importante costo diferenciador?*

Sr. Carlos Foxley.

—Podría agregar que, efectivamente, la tendencia en el mundo ha sido que las Plantas desalinizadoras han ido aumentando de tamaño de forma muy importante, de hecho, para que tengan una idea la Planta que menciona, SOREK B, que es una Planta que está en construcción va a tener una capacidad cercana a 10000 litros por segundo, es más de la capacidad que tiene Chile instalada hoy día con una sola Planta.

Hay otras Plantas, no solamente en Israel, Medio Oriente, en muchos países hay Plantas de tamaño similar y Plantas con tecnologías híbridas, que mezclan tecnologías de evaporación o térmicas y tecnologías de osmosis reversa o de membranas, en general como concepto cuando hay calor residual. Cuando la energía térmica es barata, por ejemplo, cuando yo tengo un proceso ambiental exotérmico, que libera calor y ese calor lo libero en forma de gases por una chimenea, como por ejemplo una chimenea de salida de una turbina de gas, lo que yo puedo hacer es aprovechar por medio de calderas recuperadoras o intercambiadores de calor, ese calor lo utilizo como energía motriz para evaporar agua de mar y con eso obtengo agua de mar desalinizada y a un costo de energía más barato. Consumir un tercio o la cuarta parte que iba a consumir una Planta de osmosis reversa, entonces desde ese punto de vista una Planta térmica puede ser muy competitiva si es que tengo “energía gratis”.

De manera que hay Plantas con la tendencia que crezcan en tamaño y eso permite que la Planta de SOREK B, por ejemplo, se adjudicó la concesión, el Estado de Israel por medio de la Planta de servicio sanitario Estatal, compra el agua a un privado, el Estado coloca el terreno y el permiso ambiental y es el privado el que invierte esa ingeniería,

construye, opera y mantiene y la vende a 25 años a 43 centavos de dólar el metro cubico de agua a la empresa sanitaria que, a su vez, la distribuye. Este es un costo que es de los más bajos que hay en el mundo y se hace porque es un gran volumen, tiene un marco legal muy sólido, se dan una serie de factores de eficiencia energética, en fin, que permiten llegar a hacer eso. No sé si eso responde a la pregunta, pero efectivamente entre más grande la Planta, y es la tendencia de Medio Oriente, en Australia, en España, en Israel, más barata va a salir el agua.

Sr. Dante Bacigalupo.

—*¿Qué hizo Israel para resolver este problema del manejo de la salmuera?*

Sr. Carlos Foxley.

—Israel es un Estado que tiene corta data, nació en el año 1948, que tuvo un crecimiento demográfico muy, muy grande, con mucha inmigración de diferentes partes del mundo y desde muy temprano el gobierno israelí se dio cuenta que si quería desarrollar, que si quería recibir a la gran cantidad de gente que estaba llegando a Israel, no tenía otra opción de tener acceso al agua, tanto para el consumo humano, como también para la agricultura, para alimento y por lo tanto tuvo que desarrollar una política pública que apuntó a realizar acciones e inversiones para salvar el suministro de agua. Invirtió enormes recursos en educación, educación desde los primeros años de vida en cuidar el agua, en recircularla, en que el agua que usted utilizaba para lavar la ropa no la tiraba al alcantarillado, sino que la utilizaba para lavar otras cosas, la trataba y después la regaba, el agua del inodoro, en fin, le daban varias vueltas al litro de agua. De hecho, hoy día Israel tiene récords mundiales en reutilización del agua y tiene una política que va a cumplir casi 20 años, de instalar Plantas de gran tamaño a lo largo del país para desalinización. Hoy día el agua potable de Israel es un 70% abastecida con agua desalinizada, y está en camino de aumentar fuertemente ese porcentaje con las licitaciones que vienen, incluso van a empezar a exportar agua a otros países y ahí un poco va a depender de la especial situación geopolítica que tiene Israel.

Voy a contestar una pregunta que es súper interesante por el tema normativo que viene, nos preguntan sobre el tema de la zonificación, ¿si tienen valor para la desalinización que el Estado priorice zonas donde se instale la desalinización?

Definitivamente, tenemos más de 4000 kilómetros de costa, lo que haría pensar que tenemos lugares infinitos para colocar desaladoras, no es así, si yo tengo una zona donde el uso del suelo al costado de la desalinizadora no permite la instalación de la desalinizadora, limita automáticamente la posibilidad de construir nuevas fuentes de agua desalinizadas para Chile. Y, normalmente esas áreas, son las que tienen menos bahía, donde las olas marinas van a tener menos corrientes, las que tienen mejores condiciones son disputadas por todo tipo de industrias, muchas veces son colindantes o disputadas por reservas naturales, por pescadores artesanales, por turismo, por ciudades, por desarrollo inmobiliario, entonces hay que tomar definiciones para que uno pueda como sociedad pueda decidir y planificar con tiempo, no improvisar; tenemos que planificar con un horizonte a 5, 10, y también a 30 años plazo, cómo va a ser nuestro borde costero, porque si yo hoy día doy permiso a un tipo de industria y mañana me doy cuenta de que pude instalar una desaladora, el conflicto va a ser muy grande y voy a tener que instalar desaladoras a lo mejor a cientos de kilómetros de donde van a estar los usuarios, acrecentando innecesariamente el costo del agua.

Sr. Luis Nario.

—*Bueno Carlos, agradecemos muchísimo tus explicaciones, se ve que tienes mucho corazón puesto en el tema, así que muchísimas gracias a nombre del Instituto y muchas gracias a todos los que han participado con sus preguntas.*

Sr. Carlos Foxley.

—Muchas gracias a ustedes como Instituto, creo que la labor que hacen de difusión de este tipo de temas es muy interesante y, además, urgente porque cuesta creer que por el desarrollo que tiene Chile, estemos pensando que Viña va a tener restricciones de agua algunos días o algunas horas a la semana en pocos meses y a mí me aterra, y por eso hay mucho por cambiar.

En segundo lugar no solamente a ustedes, el Instituto, sino también dar las gracias a los que participaron, a todos los que tuvieron interés, ayúdenos a difundir esto, los que tienen contacto con universidades, ayúdenos a que haya cursos de manejo eficiente del agua, a nuestros jóvenes profesionales, futuros líderes de la sociedad que les enseñen a cuidar nuestros recursos, a aprovecharlos, a ser responsables, los colegios enseñan, el Estado mediante

sus organismos que fomente cuidar el agua. El agua es escasa, somos afortunados, tenemos los recursos, pero por lo mismo tenemos que ser responsables, tenemos que dejarles a nuestros nietos y bisnietos un país mejor a lo que recibimos, y eso es educación, educación y educación.

Fin de la Conferencia.

PREMIO “MEDALLA DE ORO – AÑO 2021”

Al Sr. Nicolás Majluf Sapag



Sr. Nicolás Majluf Sapag.

El pasado jueves 28 de octubre de 2021 a las 11:00 horas en el Salón de Actos de nuestra Corporación, se realizó la ceremonia de entrega del máximo galardón de la ingeniería chilena, el premio “Medalla de Oro – Año 2021” a don Nicolás Majluf Sapag.

El Presidente del Instituto, Sr. Ricardo Nicolau del Roure, dio inicio a 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, como es tradicional, la presentación del galardonado estuvo a cargo del ingeniero que obtuvo esta distinción el año anterior, don Álvaro Fischer Abeliuk.

El Presidente.

—Sr. Nicolás Majluf Majluf, premio Medalla de Oro 2021. Sr. Álvaro Fischer Abeliuk, Premio Medalla de Oro 2020, Directores, Socios del Instituto, Familiares y Amigos, Señoras y Señores.

Hoy 28 de octubre, el Instituto cumple 133 años de existencia. Esta fecha, por su relevancia para los miembros del Instituto, tradicionalmente se hace 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 tempranamente en la década de los 30 en informes escritos con la política eléctrica chilena y el plan de electrificación del país; la propuesta de creación de ENDESA también propuesta por el Instituto de Ingenieros y más tarde para las telecomunicaciones de ENTEL; los estudios base del primer código de aguas, luego la política nacional de riego, la ley de medio ambiente y más recientemente solo en las últimas semanas hemos publicado un informe sobre ingeniería Biomédica, ciencia de insospechada proyección para el futuro de la salud del país y del mundo. Y también publicamos el informe “Glaciares. ¿Qué queremos proteger?” tema de extraordinaria relevancia actual y en discusión en el congreso de la nación. Lo que muestra que el Instituto con 132 años a cuestas continúa muy activo y fiel a sus principios fundacionales.

Es importante destacar que estos estudios son el fruto del esfuerzo de grupos de trabajo de profesionales altamente calificados que se reúnen para estudiar las materias que el directorio del Instituto ha estimado como relevantes para el desarrollo del país y de la ingeniería.

Por otra parte, dentro de sus actividades, nuestra Corporación tiene también entre sus labores más importantes, el reconocimiento a aquellos ingenieros que se han destacado por sus contribuciones a la profesión y a la sociedad.

En el día de hoy se da término al proceso de elección y premiación que realizamos cada año, entregando hoy

nuestro más importante galardón, la Medalla de Oro en el día del aniversario del Instituto.

La Medalla de Oro constituye la máxima distinción que otorga anualmente el Instituto de Ingenieros de Chile y 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 y al propio Instituto.

En el panel de honor que se encuentra en el Salón de Actos del Instituto, se consigna la lista de todos aquellos que han sido merecedores de este premio desde el año 1931, y que incluye los más selectos ingenieros que ha producido este 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.

El procedimiento para designar los candidatos a este premio consiste en que cada año, el Directorio del Instituto designa anualmente 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, quienes reunidos en sesión solemne y votación secreta disciernen la persona del premiado. Cabe destacar que los candidatos no tienen que ser socios, basta que sean ingenieros civiles titulados con más de 40 años de profesión.

Este año, al otorgar la Medalla de Oro del Instituto de Ingenieros a **don Nicolás Majluf Sapag**, hacemos honor, por una parte, al aludido prestigio que precede a este galardón, y por otra, a su enriquecimiento, con la incorporación de otro ingeniero de excelencia este exclusivo grupo. Su nombre ya ha sido incorporado en el panel que se luce en este salón.

Una de las tradiciones más respetadas y queridas de nuestra institución es que se delega el honor de presentar formalmente a nuestros premiados, al galardonado con la distinción el año anterior. En esta ocasión, le corresponde a don Álvaro Fischer, premio Medalla de Oro 2020, hacerlo.

Estimado Nicolás, mis felicitaciones.

Sr. Álvaro Fischer A.

—Sr. Ricardo Nicolau del Roure, Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, señores directores y socios del Instituto, Sr. Carlos Gauthier, Secretario General del Instituto, estimados familiares y amigos de nuestro homenajeado de hoy, Nicolás Majluf.

Querido Nicolás, flamante Medalla de Oro de nuestra Institución, versión 2021:

Siguiendo una vieja tradición, nos reunimos en este Salón de Honor, como todos los años – salvo el año pasado, en que la pandemia obligó a realizarlo de manera virtual – para reconocer y celebrar al ingeniero que se hizo acreedor en el 2021 a la máxima distinción que entrega este Instituto, su Medalla de Oro. Como ya se ha dicho, ella se otorga a los méritos y a la excelencia del trabajo del galardonado desplegado a lo largo de al menos 40 años de trayectoria profesional, escogido de entre el selecto grupo de candidatos que son presentados cada año. Para discernir el premio, el Consejo Directivo y Consultivo del Instituto atiende a los servicios que el premiado haya entregado al país, a la ingeniería o a la enseñanza de la ingeniería. Nicolás Majluf ha hecho extraordinarios aportes a todos ellos y esta Medalla de Oro así se lo reconoce.

La misma tradición que nos convoca a esta ceremonia, me otorga hoy el honor de presentar al homenajeado.

No es una tarea fácil. Las personas como Nicolás tienen tantas facetas, han hecho tantas cosas, han imaginado tantos proyectos y llevado a cabo tantos otros, han tenido una tan rica vida familiar, académica, profesional y espiritual, una vida que los ha hecho reflexionar sobre diversos temas, desde distintos ángulos y bajo distintas circunstancias, que escapa a mi capacidad de síntesis recoger en escasos minutos todo su valor, ni menos hacer justicia a todos sus merecimientos. Aun así, lo intentaré.

Déjenme comenzar diciendo que tanto en los antecedentes sobre su persona, que surgen de la lectura de una extensa entrevista que el propio Instituto le hiciera el año pasado, y también en las conversaciones que sostuve con él para preparar estas palabras, me quedaron resonando dos ideas que condensan una parte importante de los intereses, motivaciones y personalidad de Nicolás, y que quisiera compartir con ustedes en esta ocasión.

La primera es la idea acuñada por él mismo y que sirvió para titular uno de sus tantos libros, uno publicado en el 2011: “Desafíos de la Gestión: De lo Formal a lo Sutil”. La referencia que se hace del tránsito “de lo formal a lo sutil” resume lo más relevante de la aproximación con que Nicolás ha enfrentado su vida académica y profesional.

La otra idea es aquella con que me respondió a la consulta sobre cómo se había desarrollado su carrera. Con mucho candor y sin ninguna arrogancia me contestó. “es que a mí las cosas me fueron ocurriendo”, queriendo decir que no fue él quien fue intencionando ese desarrollo, sino que fueron más bien las circunstancias que enfrentó las que lo determinaron, apoyadas, y esto lo digo yo, en sus talentos y capacidades, sin los cuales esos hechos fortuitos no hubiesen dado los buenos resultados que hoy le reconocemos. Quizás por eso, Nicolás se refiere a su trayectoria como la de un “ingeniero a la deriva”, es decir, uno que dejó a las circunstancias de la vida la conducción de su trayectoria académica y profesional, pero que, haciendo buen uso de esas circunstancias a lo largo de los años, y dicho en sus palabras, fue “avanzando paso a paso, en un proceso de maduración permanente”, hacia la comprensión de los problemas de la ingeniería y de la vida.

Permítanme escudriñar un poco más en esas dos ideas, porque a través de ellas se dejan entrever reveladores aspectos del ingeniero que hoy premiamos, y muestran aspectos muy interesantes de su persona:

Comencemos por ese enigmático “de lo formal a lo sutil”.

Nicolás fue desde chico una persona muy despierta e inteligente, que entró a primera preparatoria con tan solo cinco años, ya adelantado un año, y que luego extendió a dos, al saltarse sexta preparatoria. Por ese motivo egresó de la educación media, en ese entonces llamadas humanidades, con escasos 15 años. Su gusto, y también su talento para las matemáticas, además de las recomendaciones de una prima, quien vivía en ese entonces con su familia y que le recomendó estudiar Ingeniería Química - sugerencia apoyada por el Inspector de su colegio - lo instó a seguir ese camino. Y aunque quería hacerlo en la Universidad Federico Santa María, las aprensiones de Silvia, su madre, a quien no le atraía la idea de que su hijo, de tan solo 15 años, se fuera a vivir lejos de la casa, lo hizo cambiar de idea. Las recomendaciones de otros parientes lo dirigieron a la Universidad Católica.

Para el joven estudiante de ingeniería, y luego para el incipiente profesional que combinaba su actividad en la Universidad Católica con su trabajo en Petroquímica Chilena, empresa Corfo, en la que trabajó en sus inicios profesionales, la capacidad que tenían las matemáticas para modelar aspectos de la realidad física, le resultaron muy estimulantes. Parecía un camino que podía extenderse más allá de las materias que había estudiado, y aplicarse a otros problemas que surgían en su vida profesional. La posibilidad de “formalizar” mediante ecuaciones, u otros planteamientos matemáticos, aquellas materias o problemas que estudiaba con ahínco, y así resolver problemas reales que impactarían positivamente en la vida de las personas, ya sea produciendo bienes de manera más eficiente, o concibiendo procesos para mejorar esos mismos productos, ejerció un atractivo poderoso en su mente y en su espíritu.

Sin embargo, a corto andar, algo comenzó a modificar esa manera tan estructurada de ver las cosas. Luego de terminar sus estudios de ingeniería, y al volver de Stanford, donde hizo un Magíster en Investigación Operacional, comenzó a aplicar esos conceptos en el Departamento de Ingeniería de Sistemas de su Facultad. En esa época, la visión sistémica de los problemas estaba muy influenciada por los enfoques cuantitativos y los modelos matemáticos para optimizarlos. Aun así, Nicolás se dio cuenta de que su aplicación práctica siempre requería de gestión, y la gestión estaba íntimamente ligada a lo que hicieran las personas. Eso implicaba adentrarse en las complejidades de las ciencias del comportamiento, lo que gatilló un prologando proceso de reflexión, cuyas conclusiones comenzaron a cristalizar años después, cuando debió hacerse cargo del curso de Organización y Comportamiento en la Empresa, luego del fallecimiento de su profesor titular. En efecto, para acometer el desafío de ese curso, debió, o más bien, se propuso, tomar contacto con una profesora de Psicología y otro de Sociología. Rápidamente comprendió que los fenómenos asociados al comportamiento de las personas son de una complejidad mayor que aquellos representados por los modelos que él conocía. No era posible hacer modelos simples de situaciones tan complejas. Constatar aquello, y pensar intensamente en los problemas de organización y gestión de empresas, fue lo que lo llevó a hacer la transición “de lo formal a lo sutil”, siendo lo sutil el intrincado andamiaje de las conductas de las personas, difícilmente susceptible a las formalizaciones de los modelos físicos. Esa forma de describir las cosas es muy similar a la que hizo el Premio Nobel de Física, Murray Gell-Mann, descubridor de los quarks e invitado por el Instituto de

Ingenieros a Chile en dos oportunidades, en su libro “Del Quark al Jaguar: Aventuras en lo Simple y lo Complejo”. En él afirmó que la física es el mundo de lo simple – todos las partículas, en cualquier lugar del universo y en todo instante de tiempo siguen las mismas y pocas simples reglas –, en cambio el mundo de los sistemas adaptativos intrincados, como son los seres humanos, es el mundo de la complejidad, o de “lo sutil” en el lenguaje de Nicolás, por la vastedad de componentes que interactúan para conformarlos, lo extendido del tiempo evolutivo necesario para que surgieran y el permanente recalibramiento de las reglas de interacción que los definen. Esa afirmación de Gell-Mann y la conclusión a la que llegó Nicolás, de manera independiente, tuvo vastas repercusiones en su desarrollo profesional, como mencionaremos más adelante.

Examinemos ahora la otra idea, la del “ingeniero a la deriva”.

Aunque eso suene desmerecedor, en realidad, no lo es, porque cuando uno comprende que fueron los talentos y capacidades de Nicolás las que aprovecharon de manera creativa y valorativa la “deriva” que siguió, y, además, fueron esas mismas capacidades las que le permitieron llevar la multifacética vida de múltiples motivaciones, intereses y logros que intento presentarles, se concluye que, por el contrario, el camino seguido por Nicolás tiene un inmenso mérito.

Esa deriva comenzó con su ingreso a estudiar ingeniería, pues, como ya vimos, fue el resultado de los consejos de terceros. Del mismo modo, la partida a Stanford, que inició su camino hacia la mezcla académico-profesional con que fue desarrollando su carrera a continuación, surgió del ofrecimiento de un Profesor del Departamento donde había estudiado, con el que luego tuvo un muy cercano intercambio profesional e intelectual. Pero esos casos no fueron los únicos.

Al regreso de Stanford, y luego de cinco años en Chile, Nicolás sintió que necesitaba renovar su repertorio de ideas, y surgió la posibilidad de salir a hacer un doctorado. Por sus méritos académicos fue aceptado en el exigente y prestigioso MIT. Partió en 1975 con su esposa y los dos hijos que ya habían nacido. A propósito de eso, cuenta Nicolás, no sin una sonrisa, que justo antes de partir a Stanford se había tenido que casar “apurado”. Pero no por el significado que normalmente se da a ese término, sino porque entre la carta de aceptación y la llegada a

Stanford tuvo muy poco tiempo para efectuar los preparativos de la boda.

La experiencia en MIT fue transformacional. Interactuó con grandes nombres de la economía, entre ellos varios premios Nobel. Con Stewart Myers, su futuro profesor guía en la tesis, escribió un artículo que tuvo, y sigue teniendo, amplia repercusión en el mundo de las finanzas. Asimismo, tomó un curso de Ciencias del Comportamiento, que también debe haber impactado en la mencionada transición de “lo formal a lo sutil”. Pero más importante que lo anterior, fue que tuvo la oportunidad de conocer a Arnoldo Hax, destacadísimo ingeniero de la Universidad Católica, ex Director de su Escuela, que había emigrado a EEUU, donde estaba desarrollando una gran carrera académica y profesional. Mientras hacía su doctorado, Nicolás realizó algunas asesorías profesionales en conjunto con Hax. Y luego, ya de vuelta en Chile, Hax vino de visita y le propuso que escribieran juntos un libro sobre estrategia. Ese hecho fortuito – otro de esos que “le ocurrieron” - fue el inicio de una duradera, gigantesca y decisiva colaboración. En 1981 partió a la casa de verano de Hax y durante algo más de un mes escribieron ese libro. Luego vinieron otros dos más, siempre en inglés y un cuarto en español. En 1989, cuando la Universidad Católica cumplía 100 años, organizaron un gran seminario al que trajeron a grandes invitados, entre ellos, al Premio Nobel de Economía Franco Modigliani. El enorme éxito del seminario los llevó a repetirlo 18 veces en años consecutivos, y más tarde hicieron dos seminarios más para llegar a un total de 20. Hasta el día de hoy esos encuentros se recuerdan como grandes hitos en la discusión estratégica de la gestión de negocios en el país.

Así, el joven bueno para las matemáticas, al que su padre ponía problemas y él los resolvía, el que se adentró en los modelos formales que proveía la matemática para enfrentar los temas ingenieriles, el que se fascinó con las finanzas y la cuantificación necesaria para describirla, el que hizo un programa de magíster en Stanford y de doctorado en MIT, el que mostraba una trayectoria que parecía tradicional, se fue transformando en un ingeniero atípico. El mismo dice que se considera “en el margen del mundo de la ingeniería tradicional”, y que ese tránsito de “lo formal a lo sutil” lo llevó a tener “un potente sesgo hacia la parte soft de la disciplina”. Esa forma de enfocar la profesión lo ha llevado a pensar que una de las cosas más importantes en ingeniería, y quizás en la vida, es “aprender a ver” los problemas. La mayoría de ellos, dice Nicolás, no tienen una estructura clara. Esforzarse

en identificarla, o quizás, en construirla, y de esa manera dar con el nudo del problema, es la parte más difícil en el trayecto para encontrar su solución, porque una vez definido, el resto del trabajo se puede hacer recurriendo a técnicas conocidas o ya desarrolladas. Por eso, examinar una determinada situación y extraer de ella el nudo que la define, o buscar el marco conceptual que permita darle estructura a aquello que parece no tenerla, o, en algunos casos, que está oculta, es una habilidad escasa pero muy necesaria de desarrollar para la ingeniería y la gestión moderna. Ese es un talento que Nicolás ha aprendido a desplegar a lo largo de los años.

La postura no tradicional que Nicolás ha adoptado frente a la ingeniería, al transitar de lo formal a lo sutil, siguiendo una también no tradicional deriva, constituye un tremendo aporte intelectual que él, a su vez, ha transferido a muchos de sus alumnos, otra razón por la que su trayectoria profesional despierta tanto reconocimiento.

Pero la vida de Nicolás está lejos de agotarse en el tránsito de lo “formal a lo sutil”, o en su extraordinaria capacidad para sacar el máximo provecho de las circunstancias a las que fue expuesto. Es mucho más que eso.

Su vida como profesor universitario y como director de empresas le permitieron tanto desmenuzar analíticamente el funcionamiento, la organización, el financiamiento y la gestión de las empresas, haciéndolo en su capacidad de académico, como asimismo aplicar a continuación esos conocimientos en empresas de gran relevancia, tomando decisiones cruciales para su futuro, cuando participaba en sus directorios.

Por otra parte, en la Universidad enseñó Estadística, Control de Calidad, Investigación Operacional y Procesos Estocásticos. También enseñó Finanzas, cuando volvió del MIT precedido de las publicaciones que, como mencioné, habían alcanzado notoriedad mundial. Y, por supuesto, el ya referido curso de Organización y Comportamiento en la Empresa, tan importante en la sugerente aproximación que le fue dando a su forma de ejercer la ingeniería y la docencia.

A su vez, en el mundo de la empresa, aparte de trabajar inicialmente en ENAMI y en Petroquímica Chilena, fue invitado en 1986, a los pocos años de volver del MIT, al directorio de CTC (actual Movistar). Allí vivió el proceso de venta de la Compañía, entonces estatal, al empresario

australiano Alan Bond, y luego de este a la empresa española Telefónica. Desde entonces, y hasta ahora, ha participado en directorios de empresas tan emblemáticas como Codelco, Falabella, Empresas Copec y Celulosa Arauco, aportando su mirada analítica, inquisitiva, integradora y conciliadora a situaciones muy disímiles: la millonaria pérdida por especulación en futuros de cobre que sufrió Codelco, y las implicancias políticas que eso puede tener en una empresa pública; las complejidades de la fusión entre Falabella y Sodimac; la profunda diferencia en el estilo de gestión entre Bond y Telefónica, y luego, cuando esta última se transformó en la controladora, entre el estilo de administración cuando todavía era una empresa estatal española y el nuevo que se instaló, cuando fue privatizada.

Su paso por el mundo de la empresa ha sido una enriquecedora experiencia para Nicolás. Lo obligó a combinar la mirada emocionalmente desapegada con que un académico o profesor universitario estudia esos temas, con la responsabilidad que recae sobre quien, aplicando esos mismos conocimientos, debe tomar decisiones al interior de un directorio atendiendo a las consecuencias reales que ellas provocarán. Nicolás aprendió que esto último, marca una gran diferencia con lo que ocurre en el mundo académico, porque en el mundo real la ausencia de certezas sobre cuáles serán esas consecuencias, no puede ser una excusa para evitar la toma de decisiones.

Esa virtuosa combinación de academia que analiza y desmenuza los problemas, con la experiencia práctica de aplicar ese análisis al mundo real y aprender de sus resultados, la ha realizado por más de 35 años. Ilustra, una vez más, las capacidades y talentos que Nicolás ha desplegado en su vida profesional, y es otra muestra de lo merecido del premio que hoy le otorgamos.

En su faceta más íntima, Nicolás está casado por más de 50 años con Lichy. Con ella ha formado una extensa familia compuesta por 6 hijos, Lichita, Nicolás, Javier, Cristóbal, María Paz e Ignacio, y numerosos nietos, con una intensa y muy unida vida familiar, a la que también se incorporan sus hermanos Ricardo, Juan, Mildred, Patricio y Evelyn. Ese profundo sentido de familia proviene, a su vez, de sus padres, Tito y Silvia, y sus abuelos, especialmente su abuela Rosa, y de cómo vivió su infancia en la calle Loreto, donde asistía al colegio Patronato de Santa Filomena. Sus abuelos, inmigrantes palestinos provenientes de Beit Jala, y también sus padres, vivían en el barrio Patronato, junto a muchos otros familiares y muchas otras familias “paisanas”, como

le gusta decir a Nicolás, como si fueran una gran tribu, muy cercanos todos, haciendo vida de barrio, tanto en las respectivas casas, como en la calle con amigos, jugando a la pelota, andando en patines o en bicicleta, comprando en el almacén de la esquina o asistiendo al colegio cercano. Su familia, su padre Tito, y especialmente su madre, Silvia, le transmitieron un profundo sentido religioso que cultivó primero en el colegio, luego en la universidad y posteriormente desarrolló con madurez en su vida adulta. La estrecha y cálida vida familiar con que Nicolás vivió su infancia, quedó simbólicamente cimentada muy temprano. Recibió el nombre de pila de su abuelo paterno, quien había fallecido pocos meses antes de que él naciera. Su viuda, la abuela Rosa, renació con el nacimiento de este nieto, con quien mantuvo una estrecha relación por siete años, antes de partir ella también.

Por todos estos antecedentes, no es de extrañar entonces que en estos momentos lo más relevante para Nicolás sea la profundidad del sentido de la vida y el misterio que hay tras ella. El espacio de inspiración que Nicolás se da para indagar en esos temas lo busca en diversas fuentes, incluida la lectura y relectura de los evangelios. Incluso un ateo como yo, que tiene una aproximación tan distinta a esas interrogantes, admira la sinceridad de sus convicciones y la profundidad con que aborda su reflexión sobre estas materias. Los rasgos de su personalidad y carácter, algunos de los cuales he intentado retratar en esta ceremonia, así como la consistencia y coherencia con que sustenta los valores fundacionales de sus convicciones, así lo avalan.

En fin, hay tantos otros recovecos de su vida en los que no he podido adentrarme, porque recorrerlos todos excedería los tiempos de esta presentación.

Aun así, y especialmente por aquellos que sí he podido relatarles, quiero decirte, estimado Nicolás, que para mí ha sido un verdadero privilegio tener la oportunidad de presentar estas modestas pinceladas de tu vida y tus logros, y de destacar tus facetas de ingeniero, académico y ser humano que te han hecho acreedor a la Medalla de Oro del Instituto de Ingenieros de Chile. El reconocimiento que hoy te conferimos no solo realza tú ya merecido prestigio, sino que la institución de la Medalla de Oro se prestigia al incorporarte entre sus galardonados.

Muchas gracias.

(Aplausos).

Después de la presentación, el ingeniero don Nicolás Majluf Sapag, recibió de manos de don Ricardo Nicolau del Roure, la Medalla de Oro y Diploma de Honor.

A continuación, tomó la palabra para agradecer la distinción recibida en los siguientes términos:

Sr. Nicolás Majluf.

—Quiero comenzar agradeciendo a don Ricardo Nicolau, Presidente del Instituto de Ingenieros y, por su intermedio, a la Junta Ejecutiva y al Directorio del Instituto que me han otorgado este reconocimiento que me sobrecoge, porque me lo entregan los más distinguidos de entre mis colegas ingenieros.

Agradecer también a Álvaro Fischer, Medalla de Oro de 2020, por su generosa presentación de mi trayectoria académica y profesional.

Y agradecer a ustedes, que hoy me acompañan presencialmente y de manera virtual, en estos difíciles tiempos de pandemia.

En 2013, al recibir el Premio Raúl Devés, les dije que tenemos la esperanza que todo lo que hacemos contribuya a hacernos mejores personas y a tener un mejor país; y que nunca estamos seguros de nuestro trabajo, porque tenemos una apreciación que resulta a veces tan dolorosa de nuestras limitaciones y carencias.

Un reconocimiento como éste me comunica que lo que he hecho en la formación de personas y en mi práctica profesional, a pesar de mis carencias, es visto con generosidad por ustedes, los mejores entre mis colegas ingenieros. Esto da sentido al esfuerzo de toda una vida. Me da conformidad y paz. Muchas gracias por ello.

Y les pido excusas, porque ahora tengo que dirigirles algunas palabras. Las traté de hacer breves, pero no lo son tanto. Les pido su comprensión. Es que me han obligado a repasar mi vida completa, que ya se extiende por varios años, con el favor de Dios. Pretendo compartir algunas pinceladas sobre mi vida y pensamiento, y algunas de las muchas lecciones de mi vida académica.

Ojalá que estas reflexiones tengan algún valor para ustedes y para quienes el día de mañana tengan la generosidad de interesarse por estos mensajes.

PINCELADAS DE MI VIDA

Tuve la oportunidad de repasar recientemente mi historia en una larga entrevista que me hiciera la Comisión “Ingenieros en la Historia Presente”, presidida por Ricardo Nanjarí, la que se publicó resumidamente en diciembre de 2020, en la Revista Chilena de Ingeniería, del Instituto de Ingenieros. De allí tomo algunas pinceladas.

SOBRE MI FAMILIA

Soy nieto de inmigrantes palestinos. Hoy tengo 76 años, 6 hijos y 15 nietos. Celebré mis “bodas de oro” el 23 de agosto de 2019. La familia es, para mí, de un valor inestimable. De niño era la familia ampliada, con abuelos, tíos, primos y amigos cercanos. En la actualidad es la familia formada por mis padres y la familia que hemos formado con mi señora. Seguimos muy unidos con mis hermanos y sus familias. Y nosotros con las familias de nuestros hijos, incluyendo nuestros nietos.

LECCIÓN 1: El valor y sentido de familia en mi vida. Sin ella, yo no sería yo. No podría haber desarrollado ningún proyecto personal, laboral o académico en mi vida.

SOBRE MIS ESTUDIOS

Entré a primer año de preparatorias en 1950, a los 5 años de edad. Entré al primer año de Ingeniería en la Universidad Católica el año 1961. Tenía 16 años recién cumplidos. Mi decisión de estudiar ingeniería y entrar a la Universidad Católica es el resultado de situaciones más bien circunstanciales. No son el fruto de reflexiones profundas ni de análisis acabados.

Mi título es el de Ingeniero Civil Industrial mención Química. Los compañeros de curso de las especialidades Civil e Industrial, de las especialidades Mecánica y Química, pasamos a ser una comunidad a partir del segundo año de la carrera.

Mis estudios transcurrieron entre 1961 y 1966. En esta época, vivimos eventos que cambiaron profundamente nuestra forma de ver la vida, como el Concilio Vaticano II, la Crisis de los Misiles de Cuba y la promoción de una forma de vida ejemplificada en el movimiento hippie y la música de los Beatles. Además, los acontecimientos políticos que terminaron con el asesinato del Presidente Kennedy y el del líder del movimiento civil en Estados Unidos, Dr. Martin Luther King remecieron al mundo. Y en Chile, la toma de la Universidad Católica fue un evento impactante. Fue un periodo de gran turbulencia.

Sólo en esta década de 2020 me parece estar experimentando una transformación social con una radicalidad que me hace recordar la década del 60.

LECCIÓN 2: Somos hijos de nuestro tiempo. Las circunstancias nos moldean y afectan profundamente nuestra vida.

PROFESORES QUE MARCARON MI VIDA

Son muchos los profesores que me marcaron en mi paso por la Universidad y en mi vida posterior. Perdón por no reconocerlos a todos. Me limito a mencionar a tres.

El primero es José Saphores, porque a él le debo el comienzo de mi carrera como Profesor de Cátedra. Él nos hacía el curso de Estadística. Aprendí mucho con él siendo estudiante y, posteriormente, asumiendo como ayudante de su curso. El año 1967, ya egresado de Ingeniería, seguía siendo su ayudante. Ese fue el año de la toma de la Universidad Católica por los estudiantes. Fue tan grande la conmoción que esto causó, que él renunció a sus clases. Yo tuve que hacerme cargo del curso de Probabilidades y Estadística en circunstancias muy adversas para mí. Sólo Dios sabe lo mucho que me costó terminar el curso ese año. Seguí con el curso los dos semestres del año 1968 y el primer semestre de 1969. Ya había logrado dominar la materia sin dificultad.

Ese comienzo como profesor en el año 1967 fue muy traumático. Era la época en que los profesores aprendíamos con los alumnos. Pero es un signo de cómo fuimos construyendo este gran proyecto que es hoy la Escuela de Ingeniería de la UC. Por ello, me produce un gran orgullo el haber sido incluido en la publicación conmemorativa de los 125 años de la Universidad Católica como uno de los

cuatro profesores destacados en la historia de la Facultad de Ingeniería. Los otros tres son don Ramón Salas Edwards, don Raúl Devés y el premio Nacional de Ciencias Aplicadas y Tecnológicas, profesor José Miguel Aguilera.

El segundo es Raúl Devés, a la sazón, decano de la Escuela, a quien tuve el privilegio de conocer bien. Cambió radicalmente la Escuela de Ingeniería, y cambió mi vida. Su política de perfeccionamiento de profesores implicó que mi querido profesor, amigo y compadre, *Francisco Negroni*, me invitara a ser uno de los profesores que salía a perfeccionarse al extranjero. Así fue como salí a Stanford en 1969-1970, y posteriormente a MIT en 1975-1979.

La carta de admisión a Stanford me llegó en los primeros meses de 1969. Pero había un problema. Yo estaba pololeando y pensé que lo ideal era irse casado. No tuve mucho tiempo para estos preparativos. Por eso digo que “me casé apurado”. Era el 23 de agosto de 1969. Tenía 24 años y medio. A la semana ya estaba en Stanford.

El tercero es mi querido profesor, amigo y compadre Arnoldo Hax. Aunque no me hizo clases, fue un director clave en el proceso de cambio de la Escuela promovido por el Decano Raúl Devés y corresponde que tenga un lugar preponderante en este relato porque su influencia fue determinante en mi vida.

Cuando llegué a MIT, él no me ubicaba mayormente, pero igual me recibió con los brazos abiertos, como a todos los chilenos.

Es mucho lo que hicimos desde que comenzó nuestro trabajo en MIT. Comenzamos haciendo algunas asesorías mientras era alumno de doctorado. Pero lo más relevante vino después. Se inició una larga y fructífera colaboración en el tema de estrategia. Antes de eso él era profesor de Gestión de Operaciones. Su viraje a Estrategia significó un gran cambio en su vida académica y profesional, que fue muy productivo y provechoso para él en todo sentido.

Yo llegué del doctorado el año 1979. Al año siguiente, él vino a Chile a ver a su padre. Me propuso que escribiéramos un libro en estrategia. En 1981 me fui por más de un mes a Estados Unidos. Empezamos a escribir nuestro primer libro, que ofrece una perspectiva integradora de la estrategia. Para mí fue una experiencia intelectual y humana enorme.

A lo largo de varios años escribimos tres libros sobre estrategia, que fueron traducidos a varios idiomas. Después vino un cuarto libro en castellano. Fui una semana a Estados Unidos y en esa semana lo hicimos. Lo publicamos en Chile.

También colaboramos en otros proyectos de gran relevancia para la Universidad y el país. En el año 1989 la Universidad Católica cumplía 100 años. Decidimos proponer la realización de un seminario de alto nivel para contribuir a la celebración del centenario de la Universidad. A ese primer seminario vinieron el Premio Nóbel Franco Modigliani y el ex Decano de la Escuela de Negocios de MIT William Pounds, que en esa época estaba a cargo de manejar el patrimonio de la familia Rockefeller. No les pagamos honorarios. Aceptaron que los compensáramos con un viaje al sur de Chile. Fue una experiencia inolvidable para todos.

Fue tanto el éxito de este seminario, que decidimos repetirlo. Completamos un ciclo de 18 seminarios consecutivos en los meses de enero de cada año. Luego hicimos dos seminarios más hasta llegar a 20. La contribución de Arnoldo Hax y sus invitados a la excelencia de la gestión en el país es extraordinaria. Nos traía profesores de Harvard, MIT y altos ejecutivos de empresas importantes.

La Universidad le reconoció esto a Arnoldo Hax y le dio un Doctorado Honoris Causa.

Por esta vida compartida y enriquecedora, no debiera extrañar a nadie que el padrino de Ignacio, nuestro sexto hijo, sea Arnoldo Hax.

LECCIÓN 3: Hay personas que se cruzan en nuestra vida y que la alteran profundamente. Debemos estar atentos a los mundos que ellas nos abren.

AMPLIANDO EL MUNDO DE LA GESTIÓN

La experiencia como profesor del que a comienzos de los años 1970 fue bautizado como “Departamento de Ingeniería de Sistemas” fue única. Nos correspondió definir entre todos lo que necesitábamos incluir en nuestro currículo para aportar una visión integral de los problemas de ingeniería o, como la llamamos, una “visión sistémica”. El desafío lo planteo en el prólogo de mi libro “Los Desafíos de la Gestión”.

“La comprensión que teníamos de gestión en esa época era incipiente... Investigación Operacional e Ingeniería Industrial de la Universidad de Stanford nos servían como una fuente de inspiración para lo que queríamos hacer con nuestra Ingeniería Industrial en la UC.

Nuestro Departamento había sido bautizado como Ingeniería de Sistemas mientras estaba estudiando en Stanford, en un intento por reflejar una nueva forma de entender la gestión inspirada en la Teoría de Sistemas de Norbert Wiener del MIT (padre de la Cibernética), William Ross Ashby (principio del requisito de variedad), y Stafford Beer con su ciencia de la organización efectiva.

Los temas de gestión requerían de un enfoque integral que permitiera ir más allá de la propuesta que se encontraba en la Investigación Operacional, y la Teoría de Sistemas proporcionaba una plataforma más completa para entender la dinámica de los sistemas complejos.

Éste es un momento muy importante, porque en el Departamento se empieza a recorrer un camino de lo que hoy llamo el vasto mundo de la gestión. Nada parece ser suficiente para dar cuenta de los desafíos que se enfrentan.

Mientras tanto, con Marcos Lima empezábamos a empujar los límites del Departamento al enfatizar en mayor medida la economía y la centralidad de la persona como temas de gestión que no podíamos ignorar”.

LECCIÓN 4: Si estamos atentos a lo que nos va ocurriendo, la vida se va desplegando frente a nosotros como un horizonte que se ensancha.

EL DOCTORADO EN MIT

En MIT empieza el cambio más relevante de mi vida profesional y académica.

Para mí, el primer año se parecía a una prolongación del máster. Luego de ese primer año en MIT se empieza a ensanchar mi visión. Mi apreciación de la riqueza intelectual del lugar fue creciendo a medida que pasaba el tiempo. Te empiezas a topar con profesores como Robert Merton en Finanzas, quien después obtendría un Premio Nóbel, y con Stewart Myers, quien sería mi profesor guía en mi tesis de doctorado. Con él escribí un artículo sobre Finanzas en la empresa, que sigue teniendo gran visibilidad hasta

el día de hoy. Obtuvimos el premio de “All Star Paper” por haber alcanzado un promedio casi 40 citas anuales en el período 1984-2001. Hoy cuenta con 25.000 citas en Google Scholar.

También asistía a las clases o conferencias de Paul Samuelson, Franco Modigliani, Robert Solow, todos profesores con Premios Nóbel. Además, estudié Economía con Stanley Fisher, Economía Centralizada con Martin Weitzman y Cultura Organizacional con Edgar Schein. Es sólo una muestra de la élite académica de MIT.

Aquí aprendí a ver la multidimensionalidad del mundo de la gestión. Ingeniería Industrial es esa combinación virtuosa de matemática-ciencia-tecnología con gestión. El mundo de la gestión va mucho más allá de la matemática. Además del lenguaje cuantitativo, la gestión incluye otros dos lenguajes: el de la economía, contabilidad y finanzas; y el lenguaje de las ciencias del comportamiento, que incluye Psicología, Sociología, Ciencia Política y también Estrategia.

Por eso digo que MIT produjo en mí un cambio radical. Modificó completamente mi visión de lo que era la ingeniería y cambió el rumbo de mi vida. Todo lo que me ocurre después en la vida tiene sus raíces en la experiencia de MIT.

El tercer año es para escribir la tesis en el tema de fusiones y adquisiciones, estudio que fue la base del artículo con el profesor Myers que mencioné anteriormente.

Cuando ya había terminado la escritura de la tesis, el profesor Myers me dijo que fuera a presentarle el modelo a Fisher Black. Él fue uno de los grandes constructores de las Finanzas Modernas. La fórmula de Black y Scholes para evaluar opciones financieras lleva su nombre. Myron Scholes obtuvo el Premio Nóbel por esto. Fischer Black no lo consiguió porque falleció antes.

La experiencia de presentarle mi tesis a Fischer Black fue exigente. Cuando terminamos la reunión, después de un par de horas, no supe su evaluación. Posteriormente Stewart Myers me diría que Fisher Black tenía dudas del mérito de mi trabajo. Yo no lo supe, pero me tuvo en la cuerda floja.

Las dudas de Fisher Black provenían del hecho que el supuesto de “información asimétrica”, que era el corazón

de mi tesis, rompe el modelo de mercados perfectos. Es lo que le inquietaba. Incluso me dijo que él creía que el mercado manejaba más información que la empresa. Encuentro fascinante su punto de vista.

Pero lo concreto es que finalmente di mi examen de tesis y lo aprobé sin dificultades. Pero faltaba una tremenda experiencia. Después del examen tuve que presentar la tesis en el Seminario de Finanzas, un evento de alto nivel académico al que asistían más de cien investigadores de todas las Universidades. Me sentí muy cómodo y seguro durante mi presentación. En primera fila estaba sentado Franco Modigliani, el Premio Nóbel. Me bombardeó con preguntas durante todo el Seminario. Pero al final, se levantó de su asiento y me dijo que el tema que había presentado era muy importante.

En suma, así fue como me enamoré de Finanzas. Lo que no me di cuenta en ese momento es que MIT era, junto a un grupo selecto de Universidades, la cuna de las Finanzas Modernas. De regreso de mi doctorado armé un curso de Finanzas que enseñé por varios años, hasta que llegaron profesores mejor preparados que yo en este tema.

LECCIÓN 5: El doctorado en MIT es, probablemente, el hito fundamental que marcó todo el resto de mi vida. Ese horizonte que se iba ensanchando explotó en mil direcciones con mis estudios en MIT.

DE REGRESO A CHILE

Regresé a la Universidad Católica en febrero de 1979, al terminar mi doctorado. En ese momento me integré como profesor de tiempo completo de la Escuela y asumí como Subdirector Académico de la Escuela. Simultáneamente comencé a enseñar cursos de Finanzas y a dirigir memorias de los alumnos en este tema. No mucho tiempo después, empezaría mi larga colaboración académica con Arnoldo Hax y mis seminarios y cursos de estrategia.

Además, en esa época me correspondió dirigir, en mi calidad de Coordinador General, el Programa de Evaluación del Rendimiento Escolar, un proyecto de varios años, que fue muy relevante para mí, la Escuela, la Universidad y el país. Dio origen a lo que hoy es el SIMCE. Fue un tremendo trabajo de investigación y de implementación del proyecto dentro de la institucionalidad del Ministerio y hasta el día de hoy está ahí.

En esa época tenía la energía para hacer muchas cosas. Fue, tal vez, el período más productivo de mi vida. No creo que hoy pueda desplegar esa energía.

En 1985-1986 me fui de sabático, como profesor visitante de MIT. Allí hice clases e investigación con Arnoldo Hax.

En 1986-1987, después de llegar de mi año sabático, estuve un año en la Dirección Superior de la Universidad, como Director General Académico. Justo al terminar este trabajo, me llamaron de Provida y me postularon al Directorio de CTC. Ese fue el comienzo de una larga y fructífera carrera como director de empresas, que dura hasta el día de hoy. Fui director de empresas muy relevantes como Codelco, Falabella, Empresas Copec, Celulosa Arauco y varias otras. En Codelco fui Director en dos períodos distintos y completé en total diez años, llegando a ser el primer Presidente del Directorio que no era Ministro de Minería por un período breve de tiempo. En Falabella me correspondió ser parte del Directorio que aprobó la fusión con Sodimac.

Los directorios eran como “mi laboratorio”. Yo enseñaba Finanzas en la Universidad y tomaba decisiones financieras, de endeudamiento, dividendos e inversión en la empresa. Además, me interiorizaba del entorno regulatorio en que funcionan las empresas, lo cual no se incluye mayormente en la enseñanza universitaria.

LECCIÓN 6: Lo que hayamos conseguido en la vida no es para guardarlo, sino para multiplicarlo y ofrecerlo con generosidad, sin restricciones, sin dobleces.

DE LO FORMAL A LO SUTIL

No puedo dejar de referirme a un aspecto muy relevante de mi experiencia académica y profesional. En el año 1991 falleció el profesor Sergio Maltes, que hacía el curso Organización y Comportamiento en la Empresa. En el Departamento me asignaron la responsabilidad del curso. Yo enseñaba en esa época Finanzas y Estrategia. Las Ciencias del Comportamiento no me resultaban muy afines, aunque entendía su relevancia. Por ello, solicité ayuda a la profesora Nureya Abarca de Psicología y al profesor Darío Rodríguez de Sociología. Teníamos que definir el contenido del curso y la forma de enseñarlo a alumnos de Ingeniería, quienes están muy lejos de estos temas.

Comenzamos a trabajar con decenas de alumnos, dirigiéndoles memorias y tesis por varios años. Presentamos proyectos de investigación para ir profundizando y estudiando estos temas de gestión mirados desde el comportamiento. Un ejemplo de ello es el estudio de la confianza, tema que tuvimos que aprender desde cero.

A lo largo de los años, y con la ayuda de muchos profesores, entre los que se incluyen Marcos Lima y el Dr. Sergio Canals, fui dándole un contenido y un estilo al curso. En 2011 publiqué el libro “Los Desafíos de la Gestión: De lo formal a lo sutil”, que recoge las principales materias que incluíamos en ese curso, que enseñé por 25 años. El subtítulo del libro resume la historia de lo que me ocurrió. Me hizo moverme de “lo formal”, que es la gestión entendida como modelos matemáticos, fundada en lo cuantitativo, a “lo sutil”, que tiene que ver con el comportamiento de las personas, su mundo interior y la forma de relacionarse.

Me concentré en el mundo de “lo sutil”, en el “*soft-management*”. Son temas de una complejidad grande, porque tienen que ver con ese mundo interior de la persona, sobre el cual no tenemos mucha idea ni podemos controlarlo. Esta pandemia (2020, 2021) nos está enseñando el valor de las relaciones humanas.

A lo anterior le he sumado el tema de Ética y Responsabilidad Social, que es una materia que por más de 15 años hemos venido enseñando con Monseñor Fernando Chomalí en la Clase Ejecutiva. Y es que la ética es una componente inseparable de la gestión, porque las decisiones que se toman en las empresas y organizaciones afectan el bienestar de las personas.

Por último, en octubre de 2019 publicamos con la profesora Nureya Abarca el libro “Liderazgo Efectivo: Centrado en la persona, basado en la influencia y ejercido con sensatez”. Este libro fue un pretexto para que la profesora Abarca y yo volviéramos a reflexionar sobre la amistad de una vida y sobre lo que ya habíamos escrito.

En 2020, reescribimos completamente el libro en inglés, bajo el título “Sensible Leadership: Human centered, insightful, and prudent”, que fue publicado este año 2021 por la Editorial Routledge.

Tal vez sorprenda a más de alguno este giro hacia “lo humano” que ha tomado mi carrera. Pero, mirando retrospectivamente, no debiera sorprender. Soy ingeniero

industrial, es decir, mi formación es esa combinación que describo como “virtuosa” de la matemática, ciencia y tecnología con la gestión.

La gestión es un mundo vasto. En forma sintética, MIT reconoce los tres lenguajes de la gestión a que antes aludí: la matemática, la economía y las ciencias del comportamiento. Esto último, porque la gestión se construye en ese delicado tejido que es la relación entre las personas. A esto me refiero cuando hablo de “lo sutil”.

LECCIÓN 7: Al avanzar en la vida, la centralidad de la persona es la medida de todo lo que es importante.

LECCIONES DEL MUNDO DE “LO SUTIL”

Esta inmersión en el mundo de “lo sutil” me ha enseñado a mirar los temas, los problemas del mundo, las situaciones que se me presentan, de un modo diferente. Diría que he “aprendido a ver”. Es lo que traté de enseñar por tantos años a mis alumnos en el curso de Organización y Comportamiento: aprender a ver, a mirar con otros ojos, a observar los temas desde distintas perspectivas.

En ingeniería aprendemos a “resolver problemas” que tienen una estructura bien definida. Pero, los problemas con los que nos topamos en la vida profesional y académica no tienen estructura. Lo que debemos hacer es descubrir el nudo del problema, tratar de entender de qué se está hablando. El esfuerzo se pone en la “identificación del problema” y no en la solución del mismo.

A los alumnos les ilustraba esto diciéndoles que el verdadero desafío era escribir los enunciados de los problemas de la prueba más que resolverlos. Pues si lograban escribirlos, es porque habían logrado entender y estructurar la situación.

Hay muchas otras lecciones del mundo de lo sutil que fui aprendiendo con el paso de los años y que son sorprendentes para nuestro mundo de la ingeniería, porque caen fuera de nuestro ámbito cuantitativo-técnico. Pero me fui convenciendo que no las podemos ignorar si es que queremos ser ingenieros que influyen en el devenir de las empresas y el país.

Todas ellas hablan de nuestras limitaciones y sesgos. Ninguna más decidora que las limitaciones de nuestra racionalidad. Pensamos que nuestra capacidad analítica es capaz de

descifrar los mayores misterios. Y sin duda, el avance del conocimiento y la ciencia, nos hace ser optimistas. Pero nuestra mente nos hace trampas. Nuestra racionalidad es limitada nos hace tener una visión distorsionada de la realidad. Y, además, en nuestras decisiones, no podemos evitar que nuestros intereses personales y emociones nublen nuestro juicio.

Estas limitaciones de nuestra racionalidad nos deben hacer más cautos, respetuosos y tolerantes con las visiones de las otras personas. Desgraciadamente, no es lo que veo en los debates políticos en nuestro país.

LECCIÓN 8: Ya lo dije: “aprendamos a ver”, abramos los ojos: el mundo de “lo sutil” añade complejidades que no encontramos en el mundo de las matemáticas, las ciencias y la ingeniería.

EL CONTEXTO DE LA GESTIÓN

La gestión se hace en un contexto bien determinado. Por cierto, hay principios universales, pero es distinto, por ejemplo, hacer gestión en Chile que en Argentina, Perú, Estados Unidos o Europa. También es distinto hacer gestión en una empresa de celulosa o en una de energía. Hay aspectos propios de cada país, que afectan la forma de hacer gestión.

Además, el contexto cambia permanentemente. A los cambios sociales, institucionales, políticos, económicos, demográficos, culturales y legales, se suman los cambios tecnológicos y ambientales, muy particularmente el calentamiento global y sus numerosas implicancias. Esto afecta profundamente la forma de hacer gestión.

Por último, hay una visión del contexto que es muy esperanzadora y que constituye mi lección 9.

LECCIÓN 9: El contexto no es tan sólo algo que se nos impone como una condicionante de la que no podemos zafarnos, y que cambia por fuerzas fuera de nuestro control: podemos ser agentes de cambio; el futuro puede crearse por el impacto de lo que hacemos.

Es una invitación a ser innovadores y creativos, porque esto puede alterar radicalmente la vida de todos en el mundo. Las redes sociales, son un ejemplo de ello. Y las

empresas que se están reinventando para recuperar el medioambiente es otro, por lo demás, muy necesario en los tiempos que corren.

EL FUTURO DE LA INGENIERÍA

La Ingeniería tiene que formar profesionales con una visión de los grandes temas del mundo que hoy vivimos. Son temas de alta complejidad que no sabemos cómo abordar y que afectan enormemente el bienestar de la humanidad, como el calentamiento global, el medio ambiente, el equilibrio social, y otros. El futuro de la ingeniería está en estos temas. De allí la importancia de desarrollar en nuestros ingenieros el talento para “descubrir el problema” e “interpretar los signos de los tiempos”. Ojalá tengamos la capacidad de llegar a identificar, formular y estructurar estos problemas.

LECCIÓN 10: Una buena ingeniería necesita de muchos lenguajes para responder a los desafíos de nuestro tiempo. En mi vida tuve que complementar el lenguaje de “lo formal”, con el de “lo sutil”. No me imagino la ingeniería del futuro sin estos dos lenguajes, al menos.

HOY Y EL FUTURO

La pandemia nos obliga a pensar en el sentido de la vida, del trabajo, de las relaciones. Son las mismas preguntas de siempre, pero hoy nos interpelan con una urgencia mayor. ¿Vamos a volver a la “vieja normalidad” o vamos a atrevernos a explorar una “nueva normalidad”? ¿Qué es lo que hoy corresponde hacer para que nuestra vida valga realmente la pena? ¿Qué es eso que nos va a hacer felices y a tener una apreciación positiva de nuestro paso por el mundo?

Creo que, si no hacemos un esfuerzo de reflexión profunda sobre lo que corresponde hacer a continuación, caeremos en las rutinas de la “vieja normalidad” y desperdiciaríamos un “momento estelar” de nuestras vidas.

Tal vez en la pandemia de la gripe española de comienzos del siglo pasado se vivió un momento similar, pero nadie de nosotros vivió ese momento. Lo que nos ocurre es único en nuestras vidas. La incertidumbre sobre el futuro es inmensa. Nuestra sociedad debe hacer un viraje para enfrentar con éxito el futuro. Se impone una reflexión profunda para no volverse a topar con las limitaciones del pasado.

¿CÓMO ABORDAR ESTA REFLEXIÓN?

Permítanme hacer una propuesta que surge de lo que ha sido mi vida personal y profesional. Es, por lo tanto, una propuesta sesgada, desde mi rincón de mundo, tiempo y espacio.

Para mí, los tres pilares del sano desarrollo de un país son la empresa, la política y los valores. Mi explicación de la situación que hoy vivimos en Chile, y en muchos otros países del mundo, es el debilitamiento de estos tres pilares: la empresa ha perdido el aprecio de la gente, la política parece extraviada y los valores que deben guiarnos se han olvidado.

Por ello, lo que corresponde es reorientar el quehacer de la empresa hacia un modelo que llamo “la buena empresa”. Lo mismo con la política. Necesitamos comprometernos con “la buena política”. Pero no puede haber ni buena empresa ni buena política sin valores mínimos compartidos por todos.

LA BUENA EMPRESA

“La buena empresa” se preocupa del impacto ético de su actuar y se orienta al bien común. Hace suyos los problemas más acuciantes de la humanidad, como el deterioro del medioambiente y la desigualdad. No se limita a la maximización de la utilidad. La utilidad es el resultado y no el propósito de la empresa. Lo que verdaderamente se maximiza es el sentido de lo que se hace, el propósito que se persigue, la búsqueda de la excelencia, el compromiso de trabajadores y ejecutivos, la confianza en las relaciones con proveedores y clientes, el mutuo respeto y admiración de las comunidades, la equidad en las relaciones con las autoridades, y tantas cosas más. La utilidad es la consecuencia de “hacer las cosas bien”.

“La buena empresa” se esfuerza por cumplir con las expectativas que todas sus audiencias relevantes (los “*stakeholders*”) tienen de su contribución a la sociedad, en lo económico, lo social y lo ambiental. Los “*stakeholders*” incluyen trabajadores, clientes, proveedores, accionistas, y las comunidades y sociedad en general.

Lo que distingue a una buena empresa es su capacidad de *crear valor social*, que sea reconocido por las comunidades y la sociedad toda, y de *autorregularse* en todas las circunstancias. Es una empresa que multiplica sus esfuerzos por

transparencia y por erradicar la corrupción, y se preocupa de actuar con justicia siempre.

Una empresa que hace las cosas bien hace un aporte sustantivo a la construcción de una *cultura de integridad* en el país.

LA BUENA POLÍTICA

Al momento de escribir estas líneas (octubre 2021) estamos redactando en el país una nueva Carta Fundamental. También estamos ad portas de elecciones presidenciales y parlamentarias de gran relevancia. Sin duda, es un cambio que va a afectar la marcha del país por muchos años. Ojalá sea para bien, pero podría no ser así. De allí la responsabilidad que les cabe a quienes hoy ostentan puestos de liderazgo político, sean de gobierno u oposición.

Son muchas las definiciones y principios que deben considerarse en este esfuerzo por reencauzar el país mediante una nueva Constitución. Para mí, hay un principio básico de convivencia: la dignidad de otra persona no puede atropellarse, del cual se deduce otro muy práctico: se deben respetar los derechos de las minorías. Son derechos que deben respetarse no sólo por el imperio de la ley, sino por una profunda convicción solidaria. Nosotros debemos saber ponernos nuestros límites. La confrontación para “pelear por lo mío” o “exigir mis derechos” no lleva a ninguna parte: sólo destruye. La regla de oro es orientarnos a “pelear por lo tuyo” y “promover tus derechos”. Es el trasfondo de una “sociedad justa”: Tú no me quitas lo que es mío, sino que yo te lo ofrezco sin condiciones.

LOS VALORES Y EL SENTIDO DE LA VIDA

Quisiera compartir algunas reflexiones que hice hace un par de años, cuando celebramos las Bodas de Oro con mi querida señora Lichy. Son, para mí, lecciones de vida:

Lo primero es qué si bien somos hijos de nuestro tiempo, somos parte de una larga cadena de la cual nosotros somos sólo un eslabón más. Somos herederos de una tradición familiar y cultural que nos legaron quienes nos antecedieron. Por ello debemos ser agradecidos de todo lo que hemos recibido y cuidar el tesoro que nos viene del pasado, pero a la vez debemos abrirnos a las transformaciones y cambios de nuestro tiempo.

Son cambios que nos sorprenden y también nos asustan. Nos sorprenden, porque de pronto se abren mundos maravillosos que no sospechábamos que podían existir; y nos asustan, porque en el frenesí del cambio, se pasan a llevar valores fundamentales de la existencia humana que ha costado tanto depurar.

Lo segundo es reconocer la importancia de aquellos valores que son tesoros de la humanidad y que nos haría bien apreciarlos en todo lo significan para el progreso y la convivencia, con el fin de saber protegerlos y cuidarlos.

Ya me referí a lo que significa *la familia* para mí, sin desconocer que, en los tiempos que corren, tenemos que abrirnos a nuevas y diversas formas de expresión de la familia. Pero sumando, no restando.

También he dejado entrever que nuestra pertenencia no se limita a la familia, sino que se abre a la *comunidad*, los distintos grupos con los que he compartido en las distintas etapas de mi vida. La celebración de la vida no es de una persona, una pareja o una familia aislada, sino de toda una comunidad, porque nuestra humanidad se despliega sólo en relación con los demás. No seríamos seres humanos integrales si no cultiváramos las relaciones con nuestros semejantes.

Me quiero referir ahora a algunas de las *joyas de la enseñanza cristiana*, que para mí han sido fuente de inspiración. En mi opinión, constituyen parte del tesoro de la tradición y enseñanza de la Iglesia que se ha ido integrando a nuestra cultura. Me excuso si a alguien molesto con esta referencia, pero son valores que corren el riesgo de olvidarse por las circunstancias que vivimos, y desconocerlos nos empobrecería como seres humanos y como sociedad.

- *Lo primero:* Admirarnos frente al misterio de nuestra existencia y aceptar en nuestro origen algo que no somos capaces de descifrar, ni logramos entender.
- *Lo segundo:* Apreciar el mensaje de las Bienaventuranzas, que nos plantean lo que era una paradoja en los tiempos de Jesús y es una paradoja aún mayor en los tiempos que corren: Felices los pobres, los que lloran, los humildes, los perseguidos. Y luego nos proponen un código de conducta imperecedero si queremos honrar y respetar a nuestros semejantes: Felices los justos, los misericordiosos, los que buscan la paz, los limpios de corazón.

- Y *la tercera* de estas joyas nos llama a tener un comportamiento que vaya más allá del “no matar, no mentir, no levantar falso testimonio...”. Tal vez es lo más sorprendente y difícil. Propone comportamientos como los observados en las conocidas parábolas del “Buen Samaritano” y la del “Hijo Pródigo”, en las que se da sin esperar nada a cambio y se perdona sin condiciones. No estamos obligados a hacer nada de esto, pero nos hace descubrir la fecundidad del amor.

En suma, es el regalo que significa la familia, el valor de la vida en comunidad, y el tesoro que hay en los valores de nuestra civilización.

CIERRE

He tratado de exponer algunas de las muchas lecciones que la vida me ha enseñado. Ojalá haya en ellas un mensaje que a ustedes les ayude a entender mejor lo insondable del misterio en que vivimos y que se expresa en todas las dimensiones de nuestra vida.

Nosotros somos un misterio. Nuestro mundo interior resulta inescrutable incluso para nosotros mismos. Nuestras relaciones interpersonales están cargadas de emociones y complejidades que no comprendemos. El impacto de lo que hacemos sobre la vida de otras personas no sabemos

cómo dimensionarlo. Y el sentido y trascendencia de toda nuestra vida es la pregunta que ha desafiado a los filósofos de todos los tiempos.

Sólo quisiera creer que he podido contribuir en algo a hacer el mundo mejor. Soy parte de una historia que empezó mucho antes de nosotros y va a terminar mucho después de nosotros. Siempre he tratado de hacer las cosas lo mejor posible. No siempre los resultados acompañan mis intenciones. Pero va a corresponder a quienes tienen la responsabilidad de construir el mundo del mañana enmendar nuestros errores. Ellos tienen la oportunidad de construir el futuro que quieren, pero mirando siempre el bien de todos. Formamos parte de un mismo tejido humano, delicado y precioso, que es en verdad admirable y que tenemos la obligación de cuidar. Todos hemos sido invitados a construir una sociedad en la que prime el amor por sobre el egoísmo y la violencia.

Gracias a Dios por la vida que me ha dado, y a todos ustedes que hoy nos acompañan presencial o virtualmente. Gracias, en particular, a mi querida señora Lichy, mis hijos y mis hermanos, y a sus familias, que son mi propia familia.

Muchas gracias.

(Aplausos).

PREMIO “AL INGENIERO POR ACCIONES DISTINGUIDAS - AÑO 2021”

Al Sr. Hernán de Solminihac Tampier



Sres. Hernán de Solminihac Tampier y Ricardo Nicolau del Roure.

El pasado 14 de octubre de 2021 se realizó en el Salón de Actos del Instituto de Ingenieros de Chile, la ceremonia solemne de entrega del premio “Al Ingeniero por Acciones Distinguidas – Año 2021”. Este año recayó en el Ingeniero Sr. Hernán de Solminihac Tampier.

Don Ricardo Nicolau del Roure, Presidente del Instituto, inició la ceremonia con una breve intervención relativa al significado de este premio y explicó el especial merecimiento del galardonado de este año. En seguida, siguiendo la tradición, el Ingeniero Juan Manuel Casanueva Préndez, quien recibiera este Premio el año 2020, presentó una síntesis de los aspectos más destacados de estas acciones distinguidas, en los siguientes términos.

El Presidente.

—La labor del Instituto, que el 28 de este mes, cumple 133 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 profesional.

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 pocos años después desde su fundación tomó la iniciativa de distinguir a algunos de los ingenieros que se han destacado en determinados aspectos de su ejercicio profesional.

Sin embargo, no debemos olvidar que la mayor importancia que tienen estos reconocimientos es que a través de los mismos, la sociedad y en nuestro caso la comunidad de los ingenieros civiles, proponen un modelo y ejemplo a seguir por las nuevas generaciones de profesionales.

El Premio “Al Ingeniero por Acciones Distinguidas”, que se otorga desde 1984, este año ha recaído en don Hernán de Solminihac Tampier, y como es nuestra tradición, los atributos personales y profesionales de nuestros homenajeados serán dados a conocer por quien los antecedió en este galardón el año 2020, don Juan Manuel Casanueva Préndez, de modo que ello me impide referirme a los especiales merecimientos del galardonado.

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 distinguidas, en el campo público 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.

El Directorio del Instituto designa anualmente una Comisión, que se encarga de estudiar los antecedentes de los postulantes 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.

La lista de galardonados con esta distinción es ya larga y está constituida por algunos de los ingenieros más brillantes de nuestro país. Este año recibirá el Premio “Al Ingeniero por Acciones Distinguidas - Año 2021”, don Hernán de Solminihac Tampier, a quién extendiendo mis más calurosas felicitaciones a Hernán y a su familia.

Sr. Juan Manuel Casanueva P.

—Señor Presidente del Instituto, don Ricardo Nicolau del Roure. Señor Hernán de Solminihac, Socios del Instituto, familiares y amigos.

De acuerdo con la tradición del Instituto, me corresponde el honor de presentar al Ingeniero don Hernán de Solminihac Tampier, a quien se le otorga el Premio Al Ingeniero por Acciones Distinguidas del año 2021.

Hernán de Solminihac es un hombre que durante toda su vida profesional ha sabido conjugar con mucho éxito su vocación de servicio, su actividad académica y sus aportes en las áreas de infraestructura vial, construcción, minería, evaluación social, tecnología e innovación, realizadas estos últimos años, estos logros han trascendido a su ejercicio como ingeniero y lo hacen sin duda acreedor indiscutido de este galardón.

Hernán ha tenido una carrera fructífera, que no hubiese sido posible sin el apoyo y compañía de Alejandra Aranda, su esposa, y su linda familia que la componen 4 hijos, Javiera, Hernán, Antonia y Felipe.

Ya en el año 1982, se recibió de Ingeniero Civil en la Pontificia Universidad Católica de Chile, es MSc y obtuvo un doctorado en la Universidad de Texas (UT), EEUU. Es profesor de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia

Universidad Católica de Chile desde agosto 1982. Fue Decano de esa Escuela entre 2004 y 2010, Ministro de Estado durante el primer Gobierno del Presidente Sebastián Piñera en Obras Públicas y de Minería, siendo uno de sus principales desafíos liderar e impulsar la reconstrucción del país tras el terremoto ocurrido en febrero de 2010.

Es miembro de la Academia de Ingeniería de Chile y de la Comisión de Calificación y Categorización de Ingeniería de la PUC. Participa en los directorios de CODELCO (desde 2018), del Consejo Políticas de Infraestructura (CPI), Acredita CI (Agencia Acreditadora del Colegio de Ingenieros de Chile, desde 2021), APSA (desde 2015), SIRVE S.A (desde 2021), Constructora DESCO (de 2019) y Cruzados SADP (desde 2015).

En los últimos años, a través de su participación en CLAPES UC, ha contribuido con proyectos en torno a políticas públicas, entre los que destacan “Recomendaciones para aumentar la participación laboral femenina en tiempos post pandemia” (2021); el proyecto de “Evaluación del Plan de Desarrollo de Zonas Extremas” (2019); “Desarrollo de Índices de productividad trimestral de las distintas actividades económicas de Chile” (desde 2018). También destaca el impulso de otros proyectos como la “Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Eventos Naturales en la Red Vial Nacional” (FONDEF. 2018 – 2020).

Es director de la Fundación San Agustín (2014 - 2020), director del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Escuela de Ingeniería de la PUC (2014 - 2018) y director de la Fundación Club Deportivo Universidad Católica (2014 - 2020).

Estimado Hernán, recibe mis más sinceras felicitaciones, por este merecido premio.

Muchas gracias.

(Aplausos).

A continuación, el Ingeniero Sr. Hernán de Solminihac Tampier recibió en manos de don Ricardo Nicolau del Roure, Presidente del Instituto, la Medalla Recordatoria y el Diploma de Honor. Enseguida, agradeció la distinción en los siguientes términos.

Sr. Hernán de Solminihac Tampier.

—Muy buenas días, me permito agradecer la presencia física y virtual de todos ustedes que hoy nos acompañan en esta importante ocasión para mí y mi familia, especialmente al Presidente del Instituto de Ingenieros, Sr. Ricardo Nicolau del Roure y su directiva; a quien obtuvo este reconocimiento el año pasado, Sr. Juan Manuel Casanueva, quien hoy me presentó; mi familia, mi señora Alejandra; mis hijos Javiera, Hernán, Antonia y Felipe, mi nieto Mateo; y mis hermanos; y a los representantes de la Pontificia Universidad Católica de Chile; y a todos con los que he compartido y me han ayudado durante mis estudios y estos 40 años de profesión; que, como mencionó Juan Manuel, he desarrollado principalmente en la universidad, el servicio público, empresas privadas y públicas, emprendimientos y entidades deportivas.

En nombre de mi familia y de la Pontificia Universidad Católica de Chile, recibo con agradecimiento y orgullo este premio que entrega el Instituto de Ingenieros de Chile, que han recibido personas destacadas como: Bruno Philippi, Álvaro Fischer, Diego Hernández, André Sougarret, José De Gregorio, Fernando Agüero, Fernando Chomali, Nicolás Majluf, Alfredo Moreno, y, por cierto, Juan Manuel Casanueva.

Antes de continuar, permítanme dedicar este reconocimiento especialmente a mi hija Javiera, que no nos puede acompañar, ya que enfrenta una difícil recuperación de su salud, de la cual tenemos la fe y la esperanza de volver a tenerla en plenitud con nosotros, para que pueda volver a abrazarnos, en especial a su hijo Mateo - mi nieto - que nos acompaña hoy en su representación.

Academia.

Como dijo Juan Manuel soy profesor desde agosto de 1982 en la Escuela de Ingeniería de la Universidad Católica. He dictado clases por cerca de 40 años, ayudando a formar a más 4.000 estudiantes de ingeniería civil y a graduar a varios alumnos de Magister y de Doctorado de Chile y Latinoamérica. Mención especial ha sido mi participación en el Magister en Administración de la Construcción que desarrollamos en conjunto entre la Universidad Católica y la Cámara Chilena de la Construcción, que hoy tengo el honor de dirigir, en el que hemos formado más de 230

profesionales para ser agentes de cambios en esta importante industria del país.

Mi investigación ha estado principalmente orientada al mejoramiento de la industria de la construcción y al desarrollo de la infraestructura nacional, y últimamente proponiendo políticas públicas que mejoren la calidad de vida de los habitantes de nuestro país.

De la Academia al Servicio Público.

Hoy como director del Centro Latinoamericano de Políticas Económicas y Sociales (Clapes UC) y profesor titular de Ingeniería de la Universidad Católica, es un honor recibir el Premio “Al Ingeniero por Acciones Distinguidas” del Instituto de Ingenieros de Chile.

Asumir los desafíos del país a través de la ingeniería, ha sido, es y será una de las mayores motivaciones de esta profesión. No sólo por las herramientas que entrega para transformar la sociedad, sino también por la posibilidad que brinda para contribuir a mejorar la vida de las personas.

Mientras era Decano de Ingeniería de la Universidad Católica, tuve la oportunidad de ser nombrado Ministro de Obras Públicas y luego de Minería.

Parte importante de nuestra gestión en Obras Públicas entonces, fue recuperar la conectividad y normalizar el funcionamiento de las ciudades afectadas por el terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010.

Desde el punto vista de la ingeniería, el 27F puso a prueba nuestra capacidad y creatividad para sacar al país lo antes posible de la emergencia.

En el primer año post-catástrofe, recuperamos en más de un 90% la conectividad y logramos normalizar las actividades productivas que se vieron afectadas. Además, seguimos con el Plan de Obras Nuevas que el país requería para seguir creciendo.

En Minería, en tanto, trabajamos por tener una cartera atractiva de proyectos mineros, una de la más importantes de la década. También fortalecimos la productividad y seguridad, especialmente de la pequeña y mediana minería.

Asimismo, acercamos la minería a las personas, mediante los nuevos usos del cobre en la salud de la población y dar a conocer su aporte más allá de los importantes recursos que entrega al país.

Tras el término de mi labor en el Gobierno, regresé a la Universidad para asumir desafíos en el Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción y en el Centro Latinoamericano de Políticas Económicas y Sociales de la UC, entre otros.

Más allá de la Universidad y el Servicio Público.

Más allá de la Universidad y el Servicio Público, me gustaría destacar lo que me ha tocado vivir en el Directorio de dos empresas: una estatal (Codelco) y una privada (Cruzados).

En ambos directorios hemos trabajado en equipo para modernizar su funcionamiento y mejorar los resultados, con una mirada de corto, mediano y largo plazo, desarrollando estrategias en que todos estamos comprometidos y haciendo seguimiento periódico a su implementación.

En Codelco ha sido una experiencia súper valiosa, en la que hemos contribuido a su organización, perfeccionado los procedimientos en cuanto a probidad y transparencia; y preocupación especial por temas de sustentabilidad, seguridad, innovación, gestión operacional, administración de proyectos y recursos humanos, entre otros temas. Los resultados muestran avances importantes, que nos invitan a continuar avanzando para beneficio del país.

En Cruzados el trabajo ha estado orientado fundamentalmente al logro deportivo, la formación de jugadores jóvenes, a seguir perfeccionando la gestión administrativa y deportiva, al crecimiento de la hinchada y, por cierto, al proyecto de modernización del Estadio.

Me gustaría referirme brevemente a este último proyecto, donde el Directorio me ha pedido liderar la Comisión encargada de llevarlo adelante. Es un proyecto muy desafiante, partiendo por su diseño, financiamiento, relación con el entorno, sustentabilidad, permisos y construcción. El trabajo en equipo, de profesionales internos y externos, nos ha permitido avanzar. Nuestro sueño es tenerlo operativo para los Juegos Panamericanos de Santiago 2023.

Desafíos.

Acercar la experiencia de la actividad pública al ámbito académico y privado, ha sido una de las partes más gratificantes de este proceso, porque nos permite involucrar aún más a las personas a los desafíos que tiene el país.

En este sentido, quienes optamos por ingeniería, decidimos ser protagonistas de las transformaciones y los desafíos sociales.

El desarrollo del país, requiere de profesionales involucrados con los problemas de la gente y con su calidad de vida.

Por ejemplo, cada catástrofe o emergencia pone a prueba nuestra capacidad y creatividad por ayudar a sacar adelante al país. Sin este esfuerzo y compromiso, la ingeniería chilena no sería lo que es hoy en el mundo y en Chile en particular.

La experiencia pública de estos años, sin embargo, nos invita a persistir en aquellos desafíos pendientes, como son la necesidad de involucrar a las personas beneficiadas desde el inicio de los proyectos.

Las iniciativas públicas o privadas deben avanzar en función de las necesidades sociales, de manera participativa. De esta forma, aseguramos un mejor desarrollo para el país.

Desde la universidad, en tanto, la academia es fundamental en el desarrollo de Chile, en la mirada de futuro que buscamos construir como sociedad.

El país demanda que sus instituciones se involucren en sus problemas, en que los ayuden a crecer en un territorio con más y mejores oportunidades.

Para alcanzar un estándar de país desarrollado, no podemos retroceder sobre lo que hemos alcanzado estos

años. Discutir, mejorar o cambiar aquellos obstáculos que dificultan nuestro crecimiento y resolver los desafíos sociales pendientes, son parte de las transformaciones que tenemos hoy, y que requieren de la participación de todos los actores, en especial de quienes abrazamos la ingeniería.

Agradecimiento y palabras finales.

En este breve recorrido de mi vida profesional, me gustaría agradecer a quienes me han acompañado y apoyado en este camino. También a las Instituciones que me han acogido durante estos años.

Este reconocimiento no hubiese sido posible sin el apoyo y cariño de muchas personas, en especial de mi familia, de mi señora Alejandra Aranda, mis hijos, nieto, y hermanos.

Por cierto, también de mis amigos, compañeros de estudio y de trabajo; por su ayuda tanto técnica como humana que me han brindado permanentemente. No pueden faltar a quienes me ha tocado dirigir, los que han entendido la importancia de hacer bien el trabajo técnica, económica y ambientalmente; preocuparse por las personas y su entorno; y ser justos en las decisiones.

Además, de quienes me lideraron en mi formación y mi trabajo: mis padres, mis profesores y los diferentes mentores que he tenido.

Quisiera reiterar mi agradecimiento al Instituto de Ingenieros de Chile por considerar mis aportes a la docencia, la investigación, al servicio público, al sector productivo y al deportivo, como merecimientos para este importante premio.

Muchas gracias.

(Aplausos).

PREMIO “RAÚL DEVÉS JULLIAN - AÑO 2021”

Al Sr. Juan Carlos de la Llera Martin



Sres. Juan Carlos de la Llera Martin y Ricardo Nicolau del Roure.

El viernes 8 de octubre de 2021, en el Salón de Honor del Instituto de Ingenieros de Chile, tuvo lugar la ceremonia de entrega del premio “Raúl Devés Jullian – Año 2021” al distinguido Ingeniero don Juan Carlos de la Llera Martin.

El Presidente del Instituto, Sr. Ricardo Nicolau del Roure, 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 don Juan Carlos de la Llera.

A continuación, de acuerdo con lo que es tradicional, la presentación del galardonado estuvo a cargo del Sr. Aldo Cipriano, quien obtuvo este premio el año 2019.

El Presidente.

—Sr. Juan Carlos de la Llera Martin, premio “Raúl Devés Jullian – Año 2021”.

Sr. Aldo Cipriano Zamorano, premio Raúl Devés Jullian, año 2019.

Sra. Rosita Devés, hija de don Raúl Devés Jullian.

Familiares y amigos, socios del Instituto, señoras y señores.

Nos reunimos hoy en la sede del Instituto de Ingenieros de Chile, con el objeto de entregar el premio “Raúl Devés Jullian”, correspondiente al año 2021.

El Instituto, que el día 28 de este mes cumple 133 años de existencia, incluye entre sus tareas más importantes y estimulantes la de reconocer los méritos de algunos de nuestros colegas que se destacan en su vida profesional y debo manifestarles que para el Instituto, es siempre una gran satisfacción reconocer y valorar a quienes han hecho una contribución importante a la sociedad y a la ingeniería, y en este caso, a la enseñanza de la ingeniería.

El premio RAÚL DEVÉS JULLIAN, 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 del destacado ingeniero Don Raúl Devés Jullian, Medalla de Oro de nuestro Instituto y miembro de su Consejo Consultivo, que fue Decano de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile y que destacara por su espíritu innovador y su liderazgo en la enseñanza de la ingeniería. Fue el impulsor de una de las iniciativas de mayor trascendencia emprendidas en el país con la finalidad de mejorar y modernizar la enseñanza de la ingeniería, determinante para elevar la calidad de la enseñanza a los niveles que exhibe hoy la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica. Esta tarea la realizó con su natural sencillez, expresando: “mi dedicación a la Universidad Católica viene de mi agradecimiento profundo por los valores y herramientas que me entregó”.

Sus actividades académicas fueron desarrolladas en forma paralela a una importante actividad empresarial en la construcción y otros ámbitos del quehacer nacional, tales como su participación en la fundación del Club deportivo de la Universidad Católica, donde más tarde fue su presidente, y la presidencia del Banco del Estado.

Una mención aparte merece su rica vida familiar y sus inclinaciones artísticas. Pocos saben que era poeta y pintor.

De esta forma, don Raúl Devés fue una persona que desplegó un poderoso dinamismo empresarial, docente y servicio público, siempre unido a un gran sentido de sensibilidad social. 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.

Para otorgar este premio, el Directorio del Instituto, conforme a los estatutos del premio, designa una Comisión que se encarga de estudiar los antecedentes de los postulantes, y confeccionar una nómina de no menos de tres y no más de cinco candidatos, que somete a la consideración del Directorio y del Consejo Consultivo de la Corporación, quienes reunidos en sesión solemne y votación secreta, determinan quién es el merecedor del premio.

El Premio Raúl Devés Jullian de este año, ha recaído en la persona de *Juan Carlos de la Llera Martin*, quien es Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Su presentación, como lo dicta la tradición, estará a cargo del galardonado con el premio en la versión anterior, don Aldo Cipriano.

Extiendo mis más calurosas felicitaciones a Juan Carlos y su familia.

Muchas gracias

A continuación, la presentación del galardonado la efectuó el Ingeniero Sr. Aldo Cipriano Zamorano, premio Raúl Devés Jullian, año 2019.

Sr. Aldo Cipriano Z.

—Señor Presidente, directoras y directores del Instituto de Ingenieros de Chile, autoridades, querido Juan Carlos, familiares, amigas y amigos del Premiado, señoras y señores:

Es muy grato cumplir con la tradición de presentar al Premio Raúl Devés Jullian 2021, Ingeniero Civil y Profesor de Ingeniería UC Doctor Juan Carlos de la Llera Martín, tanto por la amistad que nos une como por sus excepcionales aptitudes humanas, académicas y profesionales. Sin embargo, debo advertir que la tarea de preparación no ha sido fácil, justamente por las características propias del

Premiado que le han permitido sobresalir nítidamente en cada uno de estos ámbitos.

¿Debo destacar, me preguntaba, el apoyo de sus padres y familia, su promisoría carrera como tenista, sus brillantes estudios en el Colegio del Verbo Divino y después en la UC, su aporte como ayudante de diversos cursos en la Escuela de Ingeniería, sus inicios como docente, las becas obtenidas mientras realizaba estudios de doctorado en el extranjero y los premios que obtuvo entonces por publicaciones en revistas de primer nivel, el Premio Ramón Salas Edwards, el Premio del Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, el Premio de Innovación Avonni, el Premio Endeavor al Emprendedor del Año, los diversos Premios recibidos en la Universidad Católica por su extensa y variada actividad docente, la creación de programas de postgrado, la formación de doctores, la dirección de numerosos proyectos de investigación, la obtención de patentes en Chile y en el extranjero, o las diversas transferencias realizadas a la industria?

O más bien, ¿debería referirme a su labor como socio fundador de la empresa Sistemas Innovadores para la Reducción de Vibraciones en Estructuras, SIRVE S.A., la que se ha posicionado ejecutando proyectos en Chile, Ecuador, Perú y Nueva Zelanda, y cuyos desarrollos tecnológicos también han recibido diversos premios nacionales e internacionales, o a su labor como integrante del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo, de la Academia Panamericana de Ingeniería, del comité ejecutivo internacional del Consejo Global de Decanos de Ingeniería con sede en Estados Unidos, o señalar que es profesor honorario del University College London y que ha presidido la Comisión Presidencial para la Resiliencia frente a Desastres de Origen Natural?

O quizás, ¿debería centrarme en algunos de sus logros como Decano, entre ellos: la creación de mecanismos alternativos de admisión para estudiantes de liceos públicos y colegios particulares subvencionados, y de estudiantes con intereses científicos y orientación emprendedora, las iniciativas para aumentar el número de mujeres sin asignarles cupos especiales, la creación de las Direcciones de Responsabilidad Social y de Educación en Ingeniería, las que han contribuido la primera a fomentar el interés de lo público entre nuestros estudiantes, y la segunda a desarrollar nuevas formas de enseñanza, la creación del Doctorado en Ingeniería y Tecnología, de la Oficina de Vinculación con la Industria, y del programa de transferencia tecnológica

BRAIN UC, o tal vez elaborar en relación a su liderazgo en el consorcio The Glover, financiado por el programa Ingeniería 2030 de Corfo y en el que también participa la Universidad Técnica Federico Santa María?

Considerando que esta presentación no podía tener la extensión requerida para profundizar en los innumerables méritos del Premiado, antes de iniciarla decidí plantearme dos preguntas definitorias: cuántos elementos destacar y cuáles. Para la primera recurrí a la sugerencia de un académico avezado en estas lides, también Premio Raúl Devés Jullian, quien en todos sus discursos nos advertía: desarrollaré sólo tres aspectos, a fin de mantener la atención de Ustedes. Para responder a la segunda interrogante recurrí a mis intereses personales, los que obviamente están sesgados por la cercanía y el paso de los años. Ofrezco entonces mis disculpas a quienes esperaban una visión más completa sobre la vida y obra del Premiado y paso entonces a bosquejar, a modo de ejemplo, tres de los logros que aprecio de manera especial en la actividad académica de Juan Carlos.

Primer ejemplo. Nos acercábamos al fin del siglo pasado y los ánimos en la Escuela de Ingeniería no eran los mejores. Los estudiantes mostraban un evidente desinterés por la oferta formativa de algunos de los departamentos Civiles, lo que afectaba anímicamente a sus profesores de mayor trayectoria, quienes amenazaban con buscar alternativas para continuar su vida académica. Las opciones que se planteaban no lograban consenso y la Escuela aparecía dividida. En las reuniones algunos honorables académicos, trepados en sus sillas, increpaban a sus contrapartes. Juan Carlos, llegado al país no hacía mucho luego de sus estudios de Doctorado, prefirió seguir el camino difícil de mostrar a los estudiantes la cara amable y motivante de la Ingeniería Civil, impulsando, entre otras iniciativas, la creación del curso de primer semestre Desafíos de la Ingeniería, el cual lideró por un extenso período. Esta asignatura se constituyó en uno de los cursos emblemáticos, permitiendo a los nuevos estudiantes aprender conceptos de diseño, innovación, trabajo en equipo y conocer el potencial impacto de la ingeniería en la calidad de vida de las personas desde los inicios de la carrera. Al poco tiempo el problema que enfrentaba a unos y otros había desaparecido y hoy día, con la colaboración de todos los académicos de la especialidad, Ingeniería Civil UC se ubica en el lugar 32 del ranking QS 2021 y su Doctorado está acreditado por la Comisión Nacional de Acreditación por 8 años, de un máximo de 10.

Segundo ejemplo. Durante décadas el ingreso a las Escuelas de Ingeniería ha sido liderado, en términos de puntajes de admisión, por Ingeniería UC, en parte importante por la madurez, consistencia y empleabilidad de su currículum de 6 años. Estas características facilitaron la decisión de someter los programas de estudio primero a la certificación y luego a la acreditación de ABET, si bien ello se realizó sin la audacia que implicó en Europa el Proceso de Bologna. En el 2013 Juan Carlos decidió ir un paso más allá en materia curricular y planteó la formulación de nuevos programas de estudios, incorporando una serie de modernizaciones que permiten calificarlo como el más innovador de los realizados en el país en las últimas décadas. Este currículum es muy flexible, con majors y minors a nivel Licenciatura, aborda áreas multidisciplinarias de frontera como Ingeniería Biomédica, Ingeniería Física e Ingeniería y Arquitectura, y potencia la investigación y la innovación entre los estudiantes. Tres de estos programas de Licenciatura ya fueron acreditados por ABET, lo que permite que por primera vez en el país una Licenciatura en Ciencias de la Ingeniería sea reconocida internacionalmente como un grado equivalente al Bachelor of Science. Iniciativas como esta han llevado a que el estudio *The Global State of the Art in Engineering Education*, publicado por el MIT, ubicara a Ingeniería UC en el cuarto lugar en un ranking internacional de instituciones emergentes en el área de educación en ingeniería.

Tercer y último ejemplo. El reconocimiento temprano de que muchos de los problemas complejos y acuciantes de la sociedad requieren de investigación y formación avanzada de carácter interdisciplinario, llevó a que Juan Carlos liderara y apoyara fuertemente la creación de centros y unidades con estas características. Así, en el 2013 impulsó la adjudicación del Centro FONDAP de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (Cigiden), y en el que colaboran investigadores de diversas universidades e instituciones, y en el 2019, la creación del Instituto para la Resiliencia ante Desastres (Itrend) que busca hacer de Chile un referente internacional en resiliencia ante desastres, a través de la creación de bienes públicos. A su vez, al interior de la UC y como Decano de la Facultad, impulsó la creación de la Escuela de Gobierno, del Instituto de Ingeniería Matemática y Computacional y del Instituto de Ingeniería Biológica y Médica. La creación de estas tres unidades de carácter interdisciplinario requirió modificar los Estatutos de la Universidad, hasta entonces organizada en base a Facultades de carácter disciplinar. Estas iniciativas están ya generando resultados relevantes,

como lo indica qué a 5 años de la creación del Instituto de Ingeniería Biológica y Médica, la unidad cuenta con un programa de Doctorado acreditado, en el que participa un grupo numeroso de estudiantes, y que uno de los dos Institutos Milenio adjudicados el 2021 por la Agencia Internacional de Investigación y Desarrollo, ANID, sea liderado por académicos de esta unidad.

Los logros descritos son sólo algunos en la extensa y destacadísima trayectoria académica y profesional del profesor Juan Carlos de la Llera. Su liderazgo y empuje han permitido a Ingeniería UC experimentar en estos años un crecimiento sostenido y aportar de forma importante en diversos sectores de la sociedad, a través de diversas iniciativas innovadoras. Juan Carlos ha contribuido también personalmente a la formación de personas, a la investigación aplicada y a la transferencia a la industria, aspectos muy relevantes para Chile y otros países de desarrollo similar. Por todo esto, Juan Carlos de la Llera Martín representa en toda su amplitud los valores y aportes en el campo de la ingeniería que busca destacar el Premio creado por el Instituto de Ingenieros de Chile en recuerdo del Decano Raúl Devés Jullian.

Muchas gracias.

(Aplausos).

A continuación, el Ingeniero Sr. Juan Carlos de la Llera Martín recibió de manos de don Ricardo Nicolau del Roure, Presidente del Instituto, la Medalla Recordatoria y el Diploma de Honor. Enseguida, agradeció la distinción en los siguientes términos.

Sr. Juan Carlos de la Llera M.

—Sr. Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, autoridades de Gobierno y universitarias, académicos, colegas ingenieros, comunidad de Ingeniería UC, querida familia, amigos y amigas presentes.

Muy buenos días y muchas gracias por su presencia hoy. Querido Aldo, muchas gracias también por tus generosas palabras hacia la labor realizada en Ingeniería UC y mi persona.

Debo reconocer que recibí con profunda sorpresa y alegría la noticia de que sería el próximo galardonado con el premio

Raúl Devés Jullian. Desde ese momento, les confieso, no he dejado de pensar en qué sería más apropiado decir hoy en estas breves palabras. Leí harto de la vida de don Raúl, conversé con Rosa Devés y Arnoldo Hax. Espero estar a la altura de la ocasión.

Por una parte, este premio recuerda el inmenso legado que don Raúl dejó en nuestra hermosa profesión, en nuestra Escuela de Ingeniería, y la verdad, en casi todo lo que su vara mágica tocó, diseñó, y gestionó a través de su carrera. Fue y es un modelo a seguir, un hombre sencillo y recto, admirable en muchos sentidos, apasionado en distintos frentes, multifacético y brillante, un gran innovador y emprendedor, pero, sobre todo, un verdadero ingeniero que puso su compromiso social y a las personas en el centro de su quehacer y prioridades.

Y por otra, este premio reconoce específicamente el trabajo realizado y contribuciones en el ámbito de la educación en ingeniería, una de las tres misiones fundamentales de nuestro quehacer universitario y académico, sino la más importante y a la vez gratificante.

Es para mí un enorme honor recibir este reconocimiento que lleva el nombre de quien fuera Decano por 8 años de la Facultad de Ingeniería que actualmente dirijo, y quien la catapultara mediante sus ideas y plan de desarrollo a un nivel superior. Fue ese plan, basado en tres grandes acciones, del cual hoy todos cosechamos éxitos y nos sentimos profundamente orgullosos. Raúl Devés dejó un legado indeleble en Chile y en nuestra Facultad, y sinceramente siento algo de timidez al recibir este reconocimiento que lleva su nombre.

Decidí finalmente que mis palabras tocaran someramente tres aspectos. El primero, la vigencia del legado de don Raúl en nuestra Escuela de Ingeniería. Segundo, los enormes desafíos, y a la vez, promisorio futuro que visualizo para las ingenierías en Chile durante este siglo, y en particular para nuestra Facultad. Y tercero, expresar mi más profundo agradecimiento a todos quienes han hecho posible que hoy esté aquí.

Vigencia del legado de don Raúl Devés

En mi preparación para este discurso, leí el realizado por mi querido amigo, el profesor Aldo Cipriano, y creo que la síntesis que realizó sobre la vida y obra de

don Raúl es muy completa, por lo que solo me queda simplemente aconsejarles que lo lean, si aún no lo han hecho, ya que además de informativo, es muy lúcido y sutilmente gracioso.

Por lo tanto, mi aproximación será ligeramente distinta, un poco más interpretativa y personal de su obra y legado que aún se respira entre los pasillos y aulas de nuestra Escuela e institución y que lleva el nombre de un nuevo campus, un nuevo currículo flexible y académicos formados en las mejores universidades del mundo.

Su obra material por excelencia, fue la nueva infraestructura de la Facultad de Ingeniería en el Campus San Joaquín, proyecto que sabemos fue complejo de llevar adelante, y la que aún es reminiscencia de su increíble voluntad para lograr un nuevo modelo de universidad y facultad. Una, que debía alejarse progresivamente de una excesiva profesionalización, a través de encargarla a académicos, que sabrían establecer en la formación inicial de los futuros ingenieros el rol fundamental del conocimiento matemático y científico antes que el técnico, pero con el objetivo final de impulsar el progreso de la misma ingeniería.

Hoy pareciera ser algo obvio, pero la sola idea de haberse anticipado, entendiendo antes que muchos el verdadero lugar que le correspondía a la ingeniería como eslabón intermedio y vital en esta larga cadena de transformación del conocimiento en valor. Entender a la Ingeniería como una disciplina que inspirada en el conocimiento más fundamental busca continuamente distintas formas de transformarlo en nuevas realidades tangibles y útiles a las personas. En definitiva, se trató de alguien que entendió, adelantadamente, la definición de un proceso que hoy llamamos comúnmente innovación, y que está en el corazón de nuestra disciplina.

Naturalmente, esta visión requería de la creación de una planta académica especializada, ya no bastaba solo con aquellos extraordinarios profesionales, reconocidos ingenieros, que casi como una acción de responsabilidad social y retribución gratuita a la institución, transmitían su conocimiento a las nuevas generaciones. Él planteó un quiebre fundamental, una planta académica especializada en las mejores universidades del mundo, que básicamente enseñara lo que investigaba. Se dio cuenta de que el conocimiento evolucionaba en ritmos que no podían ser capturados exclusivamente por la experiencia obtenida desde el ejercicio profesional.

Es interesante constatar, sin embargo, que no siguió el modelo europeo de universidad, muy dominante antes de la Segunda Guerra Mundial, sino que también comprendió muy claramente que separar la formación de la investigación no era una buena idea, al menos para el concepto de universidad compleja que él tenía en mente. En mi opinión esto demuestra, una vez más, una enorme lucidez en su pensamiento.

Para quienes hacemos gestión universitaria, sabemos muy bien que un cambio de esta envergadura, que va completamente contracorriente, no es para nada simple. Las presiones por permanecer en el *status quo* y las tensiones generadas sabemos fueron importantes, entre aquellos que defendían una visión más conservadora, versus aquellos que enarbolaban las nuevas ideas que proponía una nueva generación, entre los que aparecían ingenieros jóvenes con postgrados recientes en el extranjero, de la talla de Arnoldo Hax y Jaime Wizniak, entre otros.

Es inspirador reconocer el valor y la convicción que hay que tener para impulsar estas ideas, pero también rescato como un hecho muy relevante haber creído en el potencial de esos jóvenes, que hasta hacía poco habían sido estudiantes y ayudantes de la Escuela, y que ahora pasaban a ser actores fundamentales de la transformación completa de un modelo curricular.

Un reconocimiento proveniente de quienes compartieron dicho período con don Raúl en la Escuela, fue su fuerte voluntad de hacer participar a los estudiantes en muchas decisiones relevantes de la Escuela. Por ejemplo, en 1962 los alumnos de segundo año le plantearon una reforma concreta y bastante revolucionaria de la enseñanza de las matemáticas, la que aceptó, aprobó rápidamente, e implementó al año siguiente. Para él, y tal vez a raíz de su paso como presidente del Centro de Estudiantes de Ingeniería UC (conocido como el CAi), la participación creadora de los estudiantes era un aspecto muy relevante en la vida universitaria.

Podría extender este relato también con una serie de otras anécdotas muy divertidas, que el Profesor Hax y otros próceres de la Escuela me han contado por años sobre Mecánica Racional y otros temidos cursos, que refuerzan completamente este aspecto sobre la confianza que tenía en la opinión de los estudiantes y las generaciones más jóvenes.

La verdad es que es prácticamente imposible separar hoy del actual desarrollo del proyecto académico de Ingeniería UC, el profundo legado de don Raúl y de este grupo de jóvenes académicos en los que confió para transformar especialmente el currículo y proyecto educativo.

Mi tributo vaya hacia ellos por haber tenido el coraje suficiente de hacer los cambios y generar 50 años después lo que estamos viviendo como Facultad. Sin duda, eran tiempos distintos, un país radicalmente distinto, pero no menos complejo y curiosamente experimentando niveles de tensión social no tan distintos a los que hoy vivimos.

Los desafíos de Ingeniería UC y la Ingeniería en Chile

Es sobre esta fundación que brevemente he delineado, sobre la que hoy se construye nuestra actual Escuela de Ingeniería. Sin haber tenido la fortuna de conocerlo personalmente, ni haber conocido su historia antes de ser Decano en 2010, puedo decirles que me siento muy identificado con su pensamiento académico, su enorme compromiso social, y su estilo de comprender y llevar adelante el desarrollo en la universidad.

El próximo año Ingeniería UC cumple 130 años, y si bien he destacado con particular énfasis el legado del Decano Devés, como saben, las ideas construyen sobre ideas, y son muchos quienes lo antecedieron y sucedieron que han permitido también que esta organización sea lo que es hoy.

Quiero en especial recalcar la contribución de los decanos que le sucedieron, González, de la Barra, Lüders, Espinosa, Domínguez, Varas, Coeymans, Cipriano y de Solminiach. He trabajado cercanamente con varios de ellos y debo resaltar que, cada uno, en su propio estilo, le ha puesto a este gran volante de inercia que es Ingeniería UC un tremendo impulso. Entiendo el liderazgo en la conducción de nuestra Escuela como simplemente una posta, la que me tocó asumir con mucho orgullo en 2010 y que concluirá Dios mediante, en 2022.

Han sido años de mucho sacrificio personal y familiar, pero poniendo todo en la balanza, han sido años extraordinariamente gratificantes porque hemos sido capaces no solo de diseñar cambios importantes, sino también de implementarlos y vivirlos.

El *leit-motiv* que pusimos como Dirección al comienzo era movernos de una “buena a una gran Escuela de Ingeniería”, y reflejaba simplemente la imagen de que estamos en constante movimiento, siempre con la profunda aspiración de llegar a ser una gran Escuela de Ingeniería para Chile. ¿Pero qué significa ser una gran Escuela de Ingeniería? ¿Y mucho más importante aún, de qué le sirve a nuestro país tener grandes Escuelas de Ingeniería?

Creo que al menos en parte, esta respuesta la puedo esbozar mejor a través de algunos ejemplos, más que teorizar y argumentar sobre el increíble valor que veo en el desarrollo científico y tecnológico y la ingeniería en nuestra sociedad actual y futura. Por supuesto, lo que comento a continuación es un repaso somero sobre solo algunos de los “ingredientes” de esta transformación, remitiéndome a aquellos que tienen una mayor sintonía con este premio.

El primero dice relación con la atracción e inclusión de talento. Atraer talento hacia una Escuela de Ingeniería debiera ser su primer y más significativo propósito. No como una forma de perpetuar cierto elitismo intelectual, que de hecho no nos ayuda en nada como imagen, pero sí por la enorme responsabilidad que descansa sobre nuestros hombros para contribuir de manera efectiva al desarrollo del país, y ser capaces de entregar mejores condiciones de vida a todas las personas.

Como equipo de Dirección, nos sentimos profundamente orgullosos de haber puesto a prueba en 2010 el paradigma que representaba el resultado de una prueba de selección universitaria como único mecanismo para decidir el futuro profesional de nuestros postulantes. Todos sabemos y reconocemos las enormes inequidades del Sistema Escolar Chileno, y aunque nuestra contribución es solo un grano de arena, le probamos al país tempranamente qué en una de las carreras más exigentes académicamente, ese instrumento de selección universitaria, “supuestamente objetivo”, no era infalible para definir quién podía, o no, ser ingeniero. Es increíble que algo tan simple como esto, haya costado tanto para que el sistema lo entendiera.

Los testimonios de egresados del programa de Talento e Inclusión son simplemente emocionantes, y habrá ocasión de relatarlos en otro momento, pero también le han seguido otros mecanismos que han producido cambios importantes, como el crecimiento desde un 17% de mujeres estudiantes en 2010 a un 34% este año, o la nueva

admisión NACE que busca atraer y reconocer el talento científico, innovador, de liderazgo y emprendedor de futuros ingenieros e ingenieras.

Nos importa mucho dar señales muy fuertes al sistema de educación escolar en secundaria y primaria de que, lo que ocurre en esos años será considerado seriamente para definir quién podrá ser, al menos, parte de este proyecto educativo. Este país se juega todo en la educación escolar; lamentablemente, a nivel universitario ya es tarde.

Así, cualquier población que esté subrepresentada en la admisión a nuestra Escuela, la consideramos una fuente enorme desde donde podemos atraer nuevo talento. Y esto corre también para las académicas mujeres, qué, aunque el número aún es pequeño, multiplicamos también por un factor mayor a 5 en estos años, y esperamos que ahora, con un nuevo proyecto que tenemos en carpeta, podamos avanzar sustantivamente en atraer muchas más a las distintas áreas de la ingeniería.

Otro ingrediente fundamental de esta transformación ha sido el cambio curricular, denominado como Nueva Ingeniería en el 2013 y que estuvo a cargo del profesor Mauricio López aquí presente. Fue un cambio inspirado en tres pilares principalmente: (i) una nueva estructura curricular de *Majors* y *Minors* (o concentraciones principales y secundarias) que entregara una versatilidad y flexibilidad muy grande a los estudiantes para escoger distintas trayectorias académicas y profesionales; (ii) el rediseño de dos ciclos muy diferenciados, uno de Licenciatura en Ciencias de la Ingeniería que permitiera una sintonía total con programas mundiales de B.Sc. y una mayor empleabilidad a los 4 años, para luego articular a un segundo ciclo profesional de 1 a 1,5 años de especialización profesional asimilable al grado de Magister; y (iii) la introducción de un currículo visible y otro invisible (o co-curricular) en innovación y emprendimiento de base científico-tecnológica y que ha generado un cambio sustantivo en el *mindset* académico y estudiantil este último tiempo.

Este cambio curricular acaba de ser reconocido por la Agencia Internacional ABET que aprobó en agosto pasado la acreditación de la Licenciatura en Ingeniería UC de 4 años en los *Majors* de Investigación Operativa, Ingeniería de Software, e Ingeniería Eléctrica, como también el título profesional de Ingeniería Civil. Este último, Civil-Estructural, reconocido este año como 32 en el mundo por el ranking QS.

De esta forma, nuestro actual primer ciclo de 4 años de ingeniería pasa por primera vez en su historia a ser equivalente a los 4 años del B.Sc. en cualquiera de las mejores universidades del mundo, lo que les permite a nuestros estudiantes una enorme movilidad internacional académica y laboral.

Por otra parte, el avance que ha tenido también el desarrollo de la innovación y el emprendimiento de base científica y tecnológica en la Escuela ha sido muy relevante. Curricularmente, esta secuencia formativa está marcada por una primera experiencia de diseño en primer año en el curso de Desafíos de la Ingeniería, seguida por el nuevo curso de ING2030 dedicado a la innovación y el emprendimiento de base científica y tecnológica, y una experiencia integradora final de diseño con cursos *Capstone*, que le impregnan una componente fundamental al perfil de egreso de nuestros estudiantes, lleguen o no finalmente a ser emprendedores.

Esta línea curricular es acompañada además por lo que hemos denominado el currículo invisible, un programa que entrega a los estudiantes oportunidades para concebir, incubar, prototipar, y acelerar sus ideas y propios emprendimientos, siendo nuestra Escuela un simple facilitador.

Esta cultura pro-innovación y emprendimiento también ha implicado una transformación en la planta académica, y los casos de éxito, tal como habrán visto recientemente en prensa, comienzan a aparecer, lo que a su vez se transforma en una especie de atractor de nuevo talento de estudiantes cuyo entusiasmo es creciente al ver que es posible impactar globalmente desde Chile, ya sea con sus propias ideas, o bien contribuyendo con su enorme talento al interior de estos nuevos emprendimientos.

Todos estos cambios curriculares fueron además reconocidos por un estudio comisionado por MIT en el 2016 y publicado en 2018, que resaltó a Ingeniería UC como la cuarta Escuela más reconocida a nivel mundial entre las Escuelas emergentes en educación en ingeniería.

Cambios de esta naturaleza requieren recursos importantes y todo fue posible gracias al tremendo impulso del plan de desarrollo de la Escuela de Ingeniería 2011-2015, y al proyecto de Ingeniería 2030 impulsado por CORFO.

Este plan trajo consigo otras transformaciones muy sustantivas, una de ellas el crecimiento de la planta académica en cerca de un 60%, llegando hoy a 164 académicos quienes generamos anualmente casi 450 publicaciones en las mejores revistas indexadas en el mundo, y desarrollamos investigación en los ámbitos más diversos con un presupuesto anual de investigación tres veces mayor al del 2010.

Consecuentemente, todo este motor de creación, que identificara con tanta claridad don Raúl, ya está conectado con nuestra actividad rutinaria formativa en el aula. Creamos además un programa de investigación en el Pregrado, conocido como *IPre*, y que ha permitido exponer y despertar en muchos estudiantes tempranamente el interés por la investigación.

Otro punto muy interesante de este crecimiento ha sido sacar a ingeniería de una cierta lógica de “endogamia académica”, rompiendo barreras que parecían complejas al interior de la misma Escuela de Ingeniería y con otras Facultades de la misma Universidad. Se planteó desde un principio que este desarrollo iba a ser, por una parte, “subiéndose a los hombros de gigantes” en referencia a la relación con las mejores universidades del mundo, como muestra el doctorado conjunto con University College London, ad portas de ser firmado, pero también en profunda armonía y colaboración con otros actores fundamentales de nuestra propia Universidad y de Chile.

Gracias a mis colegas Decanos de Matemáticas, Biología y Medicina, aquí presentes, Economía y Administración, Ciencias Sociales, Historia, Geografía y Ciencia Política, y Derecho, construimos junto a la Universidad un modelo distinto de unidad académica cuyo foco dejará de ser el disciplinar y cruzará Facultades, transformándose en un espacio moderno para la formación y el descubrimiento de soluciones a problemas más complejos que estaban fuera de los márgenes disciplinares convencionales.

Así aparecieron los nuevos Institutos de Ingeniería Biológica y Médica, el de Ingeniería Matemática y Computacional y la Escuela de Gobierno que ofrecen hoy oportunidades enormes y novedosas a nuestros estudiantes y al país. Compartimos todo, vacantes académicas, recursos físicos y experimentales, y también los riesgos académicos, pero lo hacemos con un profundo convencimiento de que esta forma de colaboración interdisciplinaria es fundamental

para apoyar el desarrollo futuro del país. Atrás quedaron los intereses más particulares, que hoy se suman a intereses compartidos, permitiendo escalar nuestro impacto y entregándole a nuestros estudiantes opciones de formación inéditas en nuestra Universidad.

Pero en este camino que les describo, faltaba un ingrediente, que no era tan fácilmente distinguible por nuestro fuerte sesgo histórico hacia lo funcional, la eficiencia en lo operativo, la inteligencia entendida solo a través de la rapidez mental y efectividad en las evaluaciones, o la mayor capacidad de abstracción, entre otras capacidades que residen en nuestro hemisferio izquierdo del cerebro. Tal como acuñó una vez, el ingeniero, ex Ministro y Senador, Fernando Flores en una de nuestras reuniones de Ingeniería 2030, faltaba reconocer lo que él llamó el “secret sauce”, este ingrediente secreto que le daría al proyecto una identidad única.

Resueltas en parte algunas de las condiciones necesarias para desarrollarnos y crecer como Escuela, ¿Cuál podría ser ese ingrediente que lo hiciera un proyecto distinto, único, capaz de empujar y desafiar los límites, proyectarse y seguir creciendo en reconocimiento nacional e internacional, pero sin caer en una cultura y ciclo de competencia excesiva que finalmente destruyera a la organización?

Este “secret sauce” dio origen al Plan de Desarrollo 2020-2024 que actualmente lleva adelante nuestra Escuela, y aunque es posible que no les haga mucho sentido al comienzo, está en el alma misma de lo que es la ingeniería, y que es ser una disciplina del “Care”. ¡Sí! “Care”, la palabra de la lengua inglesa que tiene dos importantes significados que no están capturados por una sola palabra en español. El primero, el de proveer lo necesario para la protección, bienestar, y el cuidado del otro; y el segundo, el de prestar infinita atención y consideración por hacer algo de forma correcta, anticipando y evitando aquello que nos pueda afectar negativamente como personas y sociedad.

La historia de la ingeniería está repleta de ejemplos de cómo la ingeniería ha servido a la humanidad para evitarle a las personas y sociedades grandes problemas y complicaciones, generando muchas veces beneficios que superan con creces lo que inicialmente se intentó resolver.

Tal como reconoce la Expresidenta de MIT, Susan Hockfield, la convergencia que ocurriera el siglo pasado entre la física del estado sólido, el desarrollo de la electrónica y los sistemas digitales, condujo a la explosión que vivimos hoy con las diversas tecnologías digitales que tanto nos apoyan en nuestro quehacer cotidiano. Y el mundo lo logró gracias a la conjunción virtuosa entre las ciencias, la matemática, y la ingeniería cuando conjuntamente fueron capaces de converger para anticipar y diseñar una nueva realidad que permitiera al conocimiento explotar dando paso a nuevas industrias, estados, e incluso formas muy distintas de relacionarnos como personas.

Hoy estamos en el umbral de una nueva convergencia que emerge cada vez más claramente y que esta vez será entre las ciencias de la vida, las matemáticas y la ingeniería y tecnologías. Los futuros profesionales en ingeniería necesitarán mucho más de la biología, la bioingeniería y la biotecnología, de comprender la salud y el comportamiento humano, el manejo de la incertidumbre y la evaluación del riesgo, la simulación avanzada de sistemas complejos, incluido nuestro planeta y sus ecosistemas, sin olvidar por supuesto todos los fundamentos aportados por las ciencias básicas y las nuevas técnicas que aporta la ciencia de datos, la inteligencia artificial y el aprendizaje de máquinas.

Las bajadas de este proyecto del “Care” al interior de nuestra Escuela de Ingeniería son múltiples, y van desde lo más concreto como la creación de una nueva Unidad de Bienestar para la Comunidad, hasta un portafolio de proyectos específicos de colaboración con la sociedad, tal como se hizo el año pasado para el desarrollo de iniciativas de apoyo durante la fase crítica de la pandemia del SARS-Cov2.

Pero el gran sueño para implementar la segunda acepción del “Care”, es lograr un nuevo espacio universitario, completamente distinto a lo que conocemos, y que hemos denominado de Convergencia Interdisciplinaria, donde concurren universidades, Estado, industrias y sociedad civil para que el talento científico y tecnológico de Chile pueda florecer y ponerse al servicio del desarrollo integral de nuestro país. Lamentablemente no hay espacio aquí para describirles en detalle de qué se trata, pero más allá de la iniciativa específica, lo relevante era contarles que el objetivo es colocar el propósito del “Care” en el centro de nuestro quehacer.

En mi modesta opinión, este debiera ser el gran “Moonshot”, el “secret sauce” de muchas más Escuelas de Ingeniería de Chile y del mundo, cada una inspirada en sus propias realidades, pero haciendo una contribución única a este objetivo.

Sin haber sido exhaustivo, he tratado al menos de darles algunas pinceladas para que puedan comprender parte de esta transformación que está en curso. Naturalmente todo esto es un proceso, hay demasiadas cosas por mejorar aún y no quiero entregar la percepción equivocada de que el trabajo está hecho, muy por el contrario, falta mucho, pero sí estamos dando la pelea en serio para llegar a ser una “gran Escuela de Ingeniería”, esta vez junto a otras Facultades y en red con el mundo.

Agradecimientos

Es una tarea difícil hacer justicia con mi reconocimiento a todos quienes me han permitido llegar hoy a recibir este premio. Parto naturalmente por agradecer a Dios, quien me dio la oportunidad de llevar adelante este sueño, que espero coincida en parte al menos con su plan y que lo haya interpretado correctamente. A mi haber, tengo al menos el haberlo hecho con mucho cariño y esfuerzo.

Agradezco también sinceramente al Instituto de Ingenieros, a su Directorio y Consejo Consultivo quienes decidieron finalmente apoyar mi nombre. Me siento profundamente honrado por esta designación, y sé que estoy en deuda con el Instituto por mi falta de tiempo, pero es el resultado de haber estado muy enfocado estos años en el proyecto de Ingeniería UC. Cuenten conmigo para aportar más en el futuro y compartir lo que pueda ser útil de mi experiencia como Decano, y también de mi experiencia profesional en ingeniería y emprendimiento de la cual hoy no he hablado.

Un reconocimiento muy importante a las autoridades de la UC, partiendo por el Rector Ignacio Sánchez, ambos Prorrectores y Vicerrectores, quienes me han apoyado siempre para sacar adelante el proyecto que he descrito. Un reconocimiento muy especial al actual Vicerrector de Investigación, profesor Pedro Bouchon, no solo por su apoyo en su actual cargo, sino por su amistad y esfuerzo en su condición de ex Director y Vicedecano de nuestra Escuela.

Mil gracias al equipo Directivo, amigos y colegas de excepción, varios aquí presentes y que nombro en señal de mi gratitud: Aldo, Juan Carlos, Enzo, Pedro, Loreto, María, Mauricio, Matías, Gloria, María José, Ana María, Isabel, Luis, Soledad, Claudio, Miguel, Claudia, Claudia, Mar, Jorge y Patricia. Ustedes y sus equipos, a quienes no alcanzo a nombrar acá, han sido fundamentales en todo lo que he hecho como Decano y merecen recibir este premio conmigo. Siéntanlo como propio y transmitan este agradecimiento a sus equipos por tantas horas de trabajo y esfuerzo.

Por supuesto agradezco a todos quienes han sido mis profesores y mentores desde el colegio hasta la universidad, durante mis estudios de postgrado en Berkeley, y en la UC como académico y Decano. A mis grandes amigos del pregrado y postgrado, a mis colegas académicos de Ingeniería UC y en especial del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, y a toda la comunidad extendida de nuestra Facultad.

Quiero expresar un agradecimiento muy especial a los estudiantes de Ingeniería UC. Ha sido simplemente increíble poder recibirlos en primer año como diamantes en bruto y ver como se forman y transforman finalmente en las más increíbles joyas, contribuyendo al país de tantas formas distintas. Especiales gracias al CAi y a todos los directivos estudiantiles por acompañarme y apoyarme tan de cerca a través de todo mi decanato. Gracias también a quienes hoy trabajan directamente conmigo en el equipo de investigación que tenemos en CIGIDEN, como también en la Empresa SIRVE, una empresa tecnológica que ha buscado constantemente innovar y empujar los límites profesionales de la ingeniería estructural y sísmica en Chile usando solo el talento.

Dejo para el final el agradecimiento a mi familia directa, mi tesoro más preciado. A mis padres Alfonso y Carmen, mi madre aquí presente, por haberme apoyado incondicionalmente y por su enorme cariño, dejándome hacer lo que quería hacer, aunque fuera en otrora jugar al tenis. A mi hermano Pablo, un talentosísimo arquitecto de la Universidad de Chile y que ha dedicado su vida al servicio público en la Municipalidad de Las Condes, y con quien compartí muchas noches de luces prendidas trabajando hasta el amanecer. A toda mi familia política, mi suegra, consuegros, cuñados y cuñadas, nueras y futuro yerno.

Pero muy especialmente, a mis hijos Juan Francisco, José María, Andrés y Rocío, la única en camino a ser pronto Ingeniera UC, a quienes les debo todo en mi vida, por ser quienes son, un modelo de rectitud y valores, por haberse bancado a un papá que aunque quiso estar siempre más presente, le costó hartó hacerlo al estar persiguiendo sus sueños.

Y por supuesto a mi amada esposa, Carmen Gloria, hija de un gran ingeniero de la Universidad de Chile, un verdadero caballero azul que entregó a su hija a un cruzado de corazón, un sacrificio me imagino no sencillo, y con quien estamos ad portas de cumplir 35 años muy felices de matrimonio. Tú eres el verdadero soporte de todo lo

que hemos logrado juntos, muchas gracias por soportar durante tantos años mis encierros trabajando, perdido en mis distintos mundos. Sin tu apoyo, paciencia y cariño, nada de esto habría sido posible.

Y a todos ustedes, quienes han venido físicamente o están conectados virtualmente esta mañana, y con quienes he tenido el orgullo de trabajar y compartir no solo en lo profesional, sino a través de una amistad y cariño recíproco de muchos años.

Muy buenas tardes y que Dios los bendiga.

(Aplausos).

PREMIO “RAMÓN SALAS EDWARDS – AÑO 2021”



En solemne ceremonia realizada en el Salón de Actos de nuestra Institución, el día jueves 7 de octubre de 2021, el Instituto de Ingenieros de Chile, hizo entrega del premio “Ramón Salas Edwards – Año 2021” a los Ingenieros Sres. Mauricio Correa, Mauricio Mascaró, Isao Parra, Javier Ruiz del Solar, Carlos Tampier y Paul Vallejos por su trabajo “Sistema de automatización para cargadores frontales de bajo perfil”.

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 5 años anteriores al año en que se otorga dicho premio.

El Presidente, don Ricardo Nicolau del Roure, dio inicio a 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. Marcos Díaz Quezada, coautor del trabajo galardonado con el mismo premio el año 2020.

El Presidente.

—Señores Autores del trabajo distinguido este año con el premio Ramón Salas Edwards, titulado: “Sistema de automatización para cargadores frontales de bajo perfil”: Mauricio Correa, Mauricio Mascaró, Isao Parra, Javier Ruiz del Solar, Carlos Tampier y Paul Vallejos.

Sr. Marcos Díaz Quezada, en representación de los autores del trabajo galardonado con este premio el año 2020: “Suchai: Nanosatelite de la Universidad de Chile para la investigación aeroespacial”.

Familiares y amigos de los premiados, Socios del Instituto. Señoras y señores.

Nos reunimos hoy en la sede del Instituto de Ingenieros de Chile, con el objeto de entregar el premio “Ramón Salas Edwards”, correspondiente al año 2021. Evento que celebramos todos los años por estas fechas, en el mes aniversario del Instituto, y que con motivo de la pandemia no pudimos celebrar de manera presencial el año pasado.

El Instituto, que este mes cumple 133 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 profesional. Para el Instituto es una gran ocasión celebrar los logros y merecimientos de los ingenieros que reciben estas distinciones, no sólo por la alegría que provoca en los premiados y sus familias, sino también por la satisfacción de reconocer y valorar a quienes han hecho una contribución importante a la sociedad y el país. El reconocimiento por sus pares ha tenido siempre una gran importancia desde los inicios de la cultura occidental y hoy es una de esas ocasiones.

El premio “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 5 años anteriores a aquel en que se otorga el premio.

Para discernir el premio, entre los trabajos que han postulado, el Directorio nombra una Comisión que examina los trabajos y emite un informe que somete a la consideración del Directorio y del Consejo Consultivo de la Corporación, quienes reunidos en sesión solemne y votación secreta, disciernen cuál es el trabajo premiado.

El premio lleva el nombre de don Ramón Salas Edwards, quien en palabras del ingeniero Raúl Sáez fue “un sobresaliente ingeniero, brillante matemático, investigador original y, antes que nada, maestro por vocación”. Ante la necesidad importante y urgente de promover entre nuestros ingenieros la realización de trabajos científicos y tecnológicos, Raúl Sáez explicaba la decisión del Instituto de crear este premio, señalando que: “perpetúa el recuerdo de un hombre eminente que engrandeció nuestra profesión y cuyos aportes a la investigación alcanzó relieves internacionales”.

Como es la tradición, corresponderá al Sr. Marcos Díaz Quezada, en representación de sus colegas coautores del trabajo premiado el año 2020, presentar el trabajo que recibe el premio este año y testimoniar los aspectos que caracterizan el trabajo distinguido y que honran la memoria de Don Ramón Salas Edwards. Por esta razón, sólo me limitaré a señalar a ustedes, 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.

De acuerdo con lo tradicional, la presentación del galardonado la efectuó el Sr. Marcos Díaz Quezada, coautor de trabajo galardonado el año 2020.

Sr. Marcos Díaz Quezada.

—Estimadas autoridades del Instituto de Ingenieros, personalidades académicas, mundo público y privado, colegas, amigos y amigos. Es un placer estar aquí hoy. Nuevamente en el mundo real – el año pasado esta ceremonia se realizó de forma virtual-. Es un honor para mí hacer esta presentación, no solo por el proyecto en sí, sino también porque el equipo de trabajo galardonado hoy ha hecho varias otras contribuciones en su área, siendo pioneros en Robótica a tanto nivel nacional como internacional.

El Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC por su sigla en inglés) de la Universidad de Chile ha desarrollado el sistema de automatización de cargadores frontales de bajo perfil y que consiste en una solución para dotar de navegación y carguío autónomo para equipos LHD. Este desarrollo tiene como objetivo proveer de una

solución accesible de automatización a la mediana y gran minería, especialmente la subterránea.

Esta tecnología fue desarrollada íntegramente por el AMTC y posee dos patentes de invención concedidas en Chile, cuenta con un software de sistema de navegación registrado y una solicitud de patente en espera de resolución. Este sistema ha sido exitosamente probado en una faena minera de la Región de Coquimbo y en la actualidad se están realizando pruebas pilotos para implementar esta tecnología en Alemania, transformando este desarrollo en un caso exitoso de generación y transferencia de tecnología desde un centro de excelencia nacional con potencial de impactar la minería nacional y mundial.

La Robótica ha sido el tema central de este grupo. Nos parece obvio y directo que la automatización y la Robótica pueden y deben aplicarse en minería, pero casi 15 años atrás, cuando el AMTC fue concebido, no era tan directo. Se requirió de visión para concebir esta unión y mucho trabajo para transformarlo en una realidad. Es tremendamente inspirador ver a este equipo trabajar en todos los planos necesarios para llevar a cabo este tipo de desarrollos avanzados. A lo largo de los años se puede ver una escalera ascendente de desarrollo tanto de conocimiento como de habilidades. Formando estudiantes desde niveles iniciales en actividades de Robótica, participando anualmente en competencias internacionales de Robótica (participaciones que han sido muy exitosas). Además, este equipo ha trabajado en la automatización de un vehículo de tipo SUV. Todos estos ejercicios fueron probablemente necesarios para poder llevar a cabo el actual desarrollo para la minería. Pero este conocimiento es diverso y puede ser aplicable en muchas otras áreas, un ejemplo de ello fue que gran parte de este equipo cooperó en desarrollos tecnológicos durante la pandemia (robot asistencial y ventiladores), lo que también muestra su calidad humana y compromiso país.

Pero la minería podría no ser para siempre (o al menos en Chile), un caso extremo es el de la minería espacial -el espacio es mi tema, me disculpo por la cercanía de la referencia-, algo que suena como ciencia ficción, pero y ¿si llegara a pasar en las siguientes décadas? y ¿si esto fuera una amenaza para nuestra minería? Estoy seguro que este tipo de proyectos, con el conocimiento adquirido y el desarrollo tecnológico ganado, aseguraría y quizás expandiría nuestra participación en el desarrollo minero

mundial, más allá de que el mineral este en nuestro territorio. Esperemos que la minería, especialmente la nacional (liderada por CODELCO) valore y potencie estos desarrollos tecnológicos.

Mis felicitaciones al equipo que desarrolló este proyecto y mi reconocimiento al Instituto de ingeniero por valorar y destacar este tipo de iniciativas.

Es un honor para mí presentar al equipo del proyecto **Sistema de automatización de cargadores frontales de bajo perfil:**

- Mauricio Alfredo Correa Pérez, Ingeniero Civil Eléctrico de la Universidad de Chile y Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile
- Mauricio Alejandro Mascaró Muñoz, Ingeniero Civil Eléctrico de la Universidad de Chile. Miembro del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería.
- Sebastián Isao Parra Tsunekawa, Ingeniero Civil Eléctrico de la Universidad de Chile y Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile.
- Carlos Andrés Tampier Cotorás, Ingeniero Civil Eléctrico de la Universidad de Chile y Magíster en Ingeniería Eléctrica de la misma Casa de Estudios.
- Paul Albert Vallejos Sánchez, Ingeniero Civil Eléctrico de la Universidad de Chile y Doctor en Ingeniería Eléctrica también de la Universidad de Chile.
- Javier Ruiz del Solar San Martín, Ingeniero Civil Electrónico de la Universidad Técnica Federico Santa María y Doctor en Ingeniería de la Universidad Técnica de Berlín.

Es un placer y un honor presentar a este equipo, pero especialmente al Profesor Doctor Javier Ruiz del Solar, quien hará la presentación del proyecto, no solo por su calidad profesional, su calidad humana y por su impacto en la academia. El profesor Ruiz del Solar, como académico del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, ha formado e inspirado a generaciones de Ingenieros eléctricos, entre los que también me cuento. Espero este reconocimiento sea un incentivo, para él y su equipo, a seguir trabajando en el desarrollo de nuestro país.

Muchas gracias.

(Aplausos).

A continuación, el Presidente del Instituto Sr. Ricardo Nicolau del Roure, procedió a hacer entrega del Diploma de Honor y una Medalla recordatoria a los Ingenieros Sres. Mauricio Correa, Mauricio Mascaró, Isao Parra, Javier Ruiz del Solar, Carlos Tampier y Paul Vallejos.

Acto seguido, don Javier Ruiz del Solar, en nombre de los galardonados, manifestó sus agradecimientos por la distinción otorgada en los siguientes términos:

Sr. Javier Ruiz del Solar.

—Estimado Ricardo Nicolau del Roure, Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile. Estimados colegas ingenieros, amigas y amigos presentes, en primer lugar, quisiera agradecer al Instituto de Ingenieros de Chile por habernos otorgado este premio por el desarrollo del sistema que dota de navegación y carguío autónomo a equipos LHD, en el cual hemos trabajado durante los últimos siete años.

Para nosotros es un orgullo obtener este reconocimiento, destinado a destacar un trabajo científico o tecnológico, en el campo de la Ingeniería, desarrollado en Chile. En nuestro caso, se trata de un desarrollo tecnológico cuyo objetivo es automatizar un vehículo utilizado en minería subterránea, con el fin de aumentar la seguridad en la extracción de mineral en este tipo de minas.

A continuación, realizaré una descripción de la tecnología desarrollada, señalando nuestras principales contribuciones y las proyecciones de este trabajo.

Sistema de automatización para cargadores frontales de bajo perfil

Mauricio Correa, Mauricio Mascaró, Isao Parra,
Javier Ruiz del Solar, Carlos Tampier, Paul Vallejos
 Advanced Mining Technology Center

7 de Octubre de 2021

Cargador Frontal de Bajo Perfil - LHD

LHD - Load-Haul-Dump

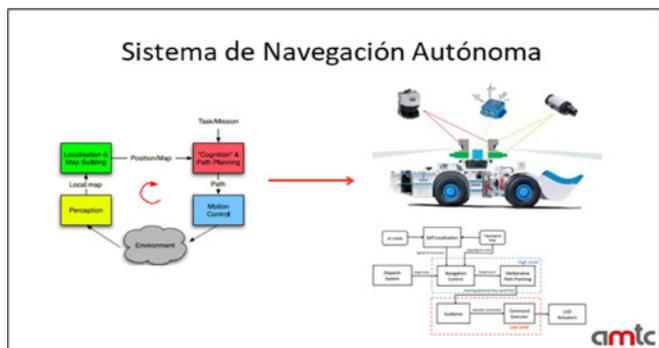
Dimensiones y pesos (aprox.):

- 9.7m largo, 2.6m ancho y 2.5 alto
- 30.1 ton. + 11 ton. carga

En primer lugar, quisiera explicar lo que es un cargador frontal de bajo perfil o LHD que, a diferencia de una retro excavadora, es una máquina que carga hacia adelante. Los cargadores que se usan en minería subterráneas son de bajo perfil, pues tienen que caber en los túneles. En inglés se utiliza el término LHD (Load-Haul-Dump) para denominar estas máquinas, haciendo referencia a las tareas de carga (load), transporte (haul) y descarga (dump). Un LHD es una máquina de gran tamaño. El modelo utilizado por nosotros tiene 10 metros de longitud, 6 metros de ancho y 2,5 metros de altura. Posee un peso de 30 toneladas y puede cargar hasta 11 toneladas en su balde.

¿Por qué automatizar LHDs?

- **Mejorar calidad vida operadores**
 - Manejar LHD impacta salud operadores (postura, vibraciones, etc.)
 - Ambiente adverso (polvo)
- **Mejorar seguridad**
 - Estallidos de rocas
 - Inundaciones
- **Productividad & Predictibilidad**
 - Tiempos de ciclo más uniformes
 - Cambios de turno más eficientes
 - Mantenimiento más efectivo (predictivo)
 - Menores requerimientos físicos sobre operadores



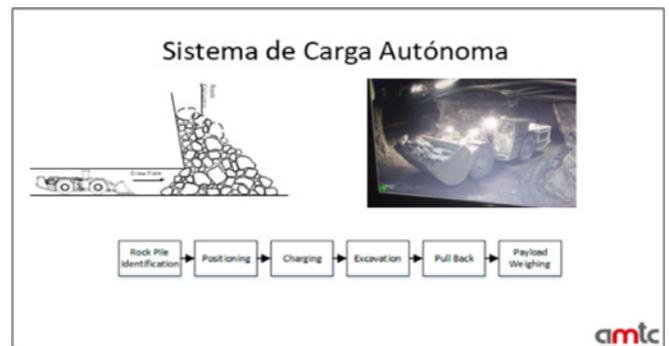
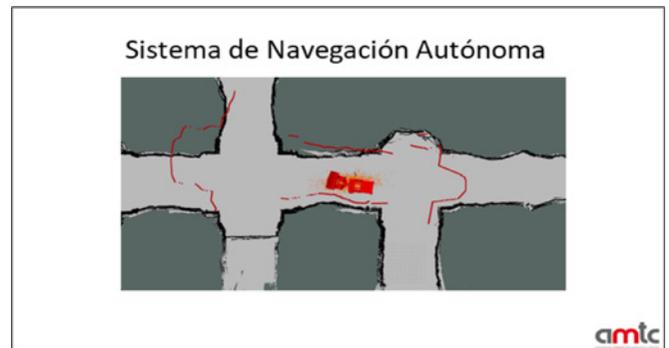
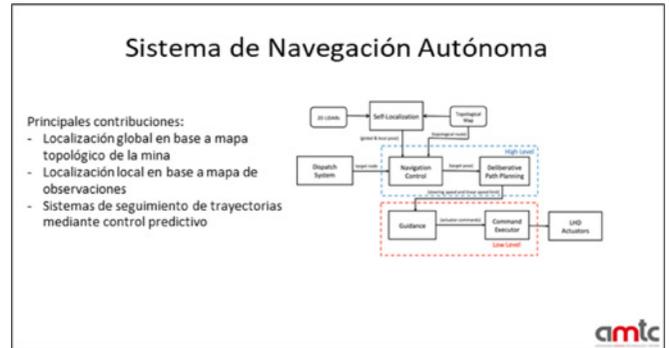
El principal motivo para automatizar esta máquina, y en general cualquier equipo minero, es aumentar la seguridad de los operarios de las minas y además mejorar su calidad de vida. Los LHD convencionales tienen un operador a bordo, que va sentado en forma lateral a la máquina. La máquina opera usualmente en lugares que pueden ser peligrosos por la posible ocurrencia de estallidos de rocas, inundaciones y, además, en general, en un entorno con mucho polvo y calor. Además, la máquina vibra. Por lo tanto, el operador al estar al interior de la máquina, está expuesto a esta situación adversa.

Entonces, al automatizar los LHD y sacar a los operadores del interior de la máquina, la seguridad del proceso mejora sustancialmente. Además, la automatización tiene otra serie de beneficios relacionados con aumentos de productividad y eficiencia.

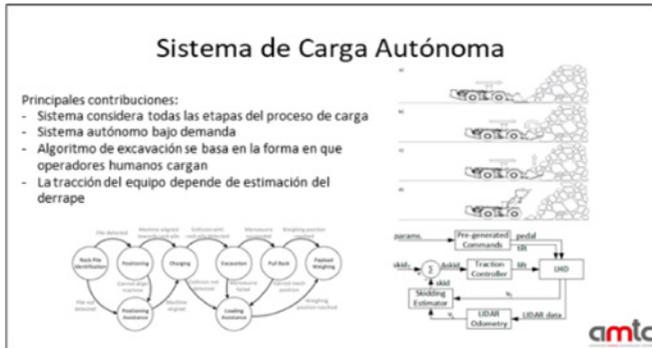
Cuando uno automatiza este tipo de equipos, los transforma en robots. En la siguiente lámina pueden observar cómo funciona internamente un robot y sus módulos principales: percepción, localización, toma de decisiones y actuación.

Debo mencionar que cuando nos propusimos automatizar equipos LHD a partir de nuestros conocimientos y experiencia en robótica, nos costó que creyeran que esto era posible. Para revertir esta situación y adquirir experiencia, desarrollamos un vehículo autónomo, que validamos en terreno en el año 2011. Fue el primer vehículo autónomo desarrollado en Chile y esto ocurrió hace 10 años. Luego del desarrollo de este vehículo, comenzamos a desarrollar el sistema de automatización para equipos LHD, que debo volver a enfatizar, son máquinas de gran envergadura (10 metros de largo y 30 toneladas de peso).

Nuestro Sistema de Automatización incluye dos subsistemas: navegación autónoma y carga autónoma. El sistema de navegación autónoma es lo que permite que estas máquinas se desplacen sin conductor por el interior de los túneles de una mina subterránea. Nuestras principales contribuciones técnicas para lograr esta funcionalidad son, en primer lugar, la utilización de un mapa topológico de la mina, donde los nodos representan túneles o intersecciones y que es utilizado por el LHD para poder navegar. Esto se complementa con un mapa de observaciones, que almacena, al interior de cada nodo los datos sensoriales adquiridos al momento de crear el mapa. Además, utilizamos un algoritmo de control predictivo para determinar las órdenes que se envían a la máquina, de tal forma que ésta se desplace y siga las trayectorias programadas.



En esta figura (arriba) se muestra la forma en que el LHD navega, en nuestra herramienta de desarrollo que tiene capacidad de simulación. Las curvas de colores corresponden a las lecturas del láser, principal sensor utilizado para el posicionamiento/localización.



En la figura (abajo) se muestra nuestro prototipo de LHD autónomo desplazándose en una Mina subterránea chilena, de la región de Coquimbo.

A continuación, describiremos el Sistema de Carga Autónoma. Cargar material en un punto de extracción es complejo, pues sobre el material a cargar hay una columna de mineral que pesa muchísimas toneladas. Esto significa que el material por cargar está sometido a altos esfuerzos y gran presión. En el diagrama que aparece en la parte inferior de la transparencia, ustedes pueden ver las distintas etapas del proceso de carga. El equipo debe en primer lugar identificar la pila, luego, sin detenerse, posicionarse frente a la pila, cargar (avanzar a toda velocidad hacia la pila) y luego excavar hasta llenar el balde. Posteriormente debe retroceder y pesar el material cargado.

Desde nuestro punto de vista, las principales contribuciones de nuestro desarrollo, son:

- La inclusión de todas las etapas del proceso de carga
- Un algoritmo de excavación que se basa en la forma en que operadores humanos cargan, el cual fue patentado
- Que la tracción del equipo depende de la estimación del derrape, mediante un método patentado

Otra contribución muy importante es que nuestro sistema funciona en forma autónoma, pero cuando lo requiere puede pedir ayuda. ¿Qué significa esto? que el equipo realiza la tarea de cargar en forma autónoma. Pero si se da cuenta, autónomamente, que no puede completar la tarea, puede pedir ayuda a distancia. El operador recibe la solicitud, de ayuda, la atiende y luego devuelve el mando al sistema autónomo. Esta la principal contribución de nuestro sistema de carga.

Entre los principales logros de nuestro desarrollo destacan:

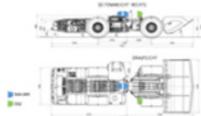
- 3 solicitudes de patente, 2 de ellas concedidas
- 2 artículos en revistas, 7 en conferencias de minería
- La aplicación de nuestro sistema de navegación a un camión fábrica de explosivos (en desarrollo)
- La aplicación de nuestro sistema de navegación y carga a equipos LHD en una mina de sal en Alemania (en desarrollo)
- Una metodología de desarrollo para la automatización de equipos mineros que incluye uso de simuladores y prototipos a escala.

Finalmente me gustaría destacar que este desarrollo fue posible gracias al apoyo de GIZ, una institución de fomento y desarrollo alemán, y GHH una empresa alemana fabricante de LHDs. Sin este primer apoyo de instituciones alemanas, no chilenas, esta tecnología no hubiese podido ser desarrollada. Me gustaría reflexionar sobre el hecho de por qué nos cuesta tanto a nosotros, los chilenos, pensar que en el país se puede desarrollar tecnología de clase mundial. Creo que el primer paso para transformarnos en un país desarrollado es creer que podemos hacerlo, creer que en Chile podemos hacer desarrollos tecnológicos de vanguardia, en otras palabras, *creemos el cuento*.

Lo segundo es que desarrollos tecnológicos de clase mundial requieren conocimientos técnicos y talento, pero también perseverancia y pasión. En este caso hemos trabajado en el desarrollo de esta tecnología por al menos 7 años y vamos a continuar haciéndolo.

Principales Logros

- 3 solicitudes de patente, 2 de ellas concedidas
- 2 artículos en revistas, +7 en conferencias de minería
- Aplicación de sistema de navegación a camión fábrica de explosivos (en desarrollo)
- Aplicación de sistema de navegación y carga a LHDs en mina de sal en Alemania (en desarrollo)
- Metodología de desarrollo que incluye uso de simuladores y prototipos a escala



amtc

Agradecimientos

A nuestras familias, principalmente esposas e hij@s.

A tod@s los estudiantes e ingenier@s de desarrollo que han trabajado con nosotros en los últimos 10 años.

Al financiamiento obtenido de GIZ, ANID y CORFO.

A GHM, fabricante de los equipos LHD utilizados.



Me gustaría que este desarrollo tecnológico pueda ser un ejemplo para jóvenes investigadores y desarrolladores que puedan ver que, con talento, constancia y pasión, se pueden realizar estudios tecnológicos de clase mundial.

Para terminar, quisiera agradecer en primer lugar a nuestras familias. También me gustaría agradecer a muchos estudiantes e ingenieros que han participado en desarrollo expuesto el día de hoy. Seis de nosotros concluimos este proyecto, pero el número total de personas que ha participado de alguna manera en el desarrollo de este proyecto, ha sido cerca de 20. Así que es importante agradecerles a ellos también y, por supuesto, agradecer a quienes nos han financiado.

Por último, quisiera decir que estamos muy contentos por recibir este premio.

Muchas gracias.

(Aplausos).

PREMIOS A LOS ALUMNOS DESTACADOS DE INGENIERÍA CIVIL - AÑO 2021



El viernes 1 de octubre de 2021, vía Zoom, tuvo lugar la ceremonia de entrega de los premios “MARCOS ORREGO PUELMA”, “ISMAEL VALDÉS VALDÉS” y “ROBERTO OVALLE AGUIRRE”, año 2021.

El Sr. Ricardo Nicolau del Roure, Presidente del Instituto, inició este solemne acto 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, estimados socios del Instituto, señoras y señores.

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

Ello porque, por una parte, el Instituto de Ingenieros de Chile, a través 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 alumnos de Ingeniería Civil más destacados que han egresado de nuestras Universidades.

Dadas las circunstancias sanitarias por las que atravesamos, no podemos utilizar el Salón de Actos de nuestra sede para esta ceremonia, pero esta reunión quedará de igual forma registrada en nuestros Anales como una sencilla, pero emotiva ceremonia de homenaje a nuestros premiados y que, gracias a Reuna, tiene hoy una gran cobertura.

Antes de hacer una breve referencia sobre quiénes fueron los ingenieros: Marcos Orrego, Ismael Valdés y Roberto Ovalle, permítanme explicarles brevemente el procedimiento de selección de quienes hoy distinguimos.

Cada año, el Instituto solicita a las respectivas Facultades o Escuelas de Ingeniería, proposiciones de no más de cinco candidatos, que consideren idóneos para cada uno de los premios señalados.

Luego de recibir las proposiciones, el Instituto forma una Comisión, integrada por uno o más miembros del Directorio y un miembro del Consejo Consultivo de nuestra Institución, quiénes junto a los Decanos o sus representantes, examinan los antecedentes de los candidatos, los selecciona y efectúa la proposición al Directorio y al Consejo Consultivo de nuestra Corporación, quienes en sesión conjunta y solemne procede a discernir cada uno de los premios.

Permítanme ahora contarles brevemente quiénes fueron los ingenieros que hoy recordamos:

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, cabe señalar que esa empresa en esa época era “la gran empresa de Chile”. 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 al mejor alumno 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. 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. Se distinguió por su dilatada y fructífera vida pública, tanto en el campo político, como gremial y filantrópico.

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, por sus contribuciones a la ingeniería, o 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 de liderazgo.
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 para los trabajadores. En este aspecto, dejó una lección de solidaridad humana, que tuvo el raro privilegio de ser reconocida por su personal 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 complementar la información que se les entregara 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, cumple 133 años de existencia el próximo 28 de octubre, y continua vigente y actuando en la vida nacional con gran vitalidad. Sus miembros estamos empeñados en cumplir los postulados fundacionales; informando, en este caso, a las nuevas generaciones de ingenieros acerca de los aspectos que distinguen al Instituto de cualquier otra entidad de este país.

Esta es una entidad que tiene como característica fundamental, que sus socios hacen permanentemente aportes al desarrollo de la ingeniería y su enseñanza, y como consecuencia de lo anterior, al desarrollo de nuestro país. Esta forma de colaboración, este voluntariado, es la que ha adoptado el Instituto desde su creación y así lo han entendido sus asociados que han permanecido fieles a esta tradición.

Es en el contexto anotado que debo informarles 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 pago de membresía por los primeros dos años de pertenencia.

En relación a esto último, hago mención a ustedes, que el Instituto tiene un Programa de Mentores, que consiste en que ingenieros senior actúan en calidad de tutores de ingenieros jóvenes, que lo solicitan, y que hayan ingresado al Instituto como socios, con el objeto de entregarles la orientación profesional y laboral que pudieren necesitar para enfrentar sus primeros desafíos profesionales.

Permítanme reiterar mis más sinceras felicitaciones a los Ingenieros que hoy serán distinguidos y a sus familias.

A continuación, el Presidente del Instituto, don Ricardo Nicolau del Roure hace entrega en forma simbólica del Diploma y Medalla Recordatoria a cada uno de los galardonados.

Premio Marcos Orrego Puelma:

Universidad de Chile: Montserrat Andrea Monasterio Belmar; P. Universidad Católica de Chile: Cristóbal Javier Gazali Allen; Universidad de Concepción: Esteban Cea Klapp; Universidad Técnica Federico Santa María: José Luis Rojas Bastidas; Universidad de Santiago de Chile: Ignacio Constantino Ibáñez Aliaga; Universidad Diego Portales: Andrea Cristina Lois Olivares; P. Universidad Católica de Valparaíso: Susana Maitén Calderón Catricura; y Universidad de los Andes: María Elisa Irrarrazaval Zañartu.



Premio Ismael Valdés Valdés:

Universidad de Chile: Juan Pedro Ross Olivares; P. Universidad Católica de Chile: Fernando Alberto Florenzano Hernández; Universidad de Concepción: Sergio Saavedra Muñoz; Universidad Técnica Federico Santa María: Boris Fernando Vidal Campos; Universidad de Santiago de Chile: Jonathan Andrés Lillo Cartes; Universidad Diego Portales: Michiru Michel Nakamura Zambrano; P. Universidad Católica de Valparaíso: Pablo Andrés Villarroel Carrasco.



Premio Roberto Ovalle Aguirre:

Universidad de Chile: Daniela Francesca Gormaz Cuevas; P. Universidad Católica de Chile: Felipe Andrés Castro Niklitschek; Universidad de Concepción: Andrés Gerardo Elgueda Rojas; Universidad de Santiago de Chile: Jorge Nicolás Ibarra Llach; Universidad Diego Portales: María Carolina Contreras Jiménez; P. Universidad Católica de Valparaíso: Juan Pablo Gallardo Mejías y Francois Philippe Crouchett Catalán; Universidad de los Andes: Kenneth Alfred Page Andler.



A continuación, el ingeniero Juan Pedro Ross Olivares de la Universidad de Chile, en representación de los premiados expresó sus agradecimientos, en los siguientes términos:

Sr. Juan Pedro Ross.

—Estimados Decanos, Representantes de Decanos, Sr. Presidente del Instituto de Ingenieros, miembros y socios del Instituto, familiares, amigos y amigas. En primer lugar, quiero agradecer a todos y todas por su presencia. Estoy seguro de que sin su apoyo y cariño no estaríamos hoy acá. En particular, quiero hacer un homenaje a quienes ya no nos acompañan más en vida pero que seguramente sentirían orgullo al vernos recibir estos reconocimientos.

Hace unas semanas tuvimos una pequeña reunión para conocer un poco más sobre las distinciones que nos estaban entregando. No les voy a mentir, la mayoría desconocíamos los premios y más aún el Instituto. En esa instancia aprovecharon de contarnos sobre la institución y sus focos de desarrollo. Así, aprendimos que están muy preocupados de la orientación que se le está dando a las ingenierías en nuestras siete universidades y en el país en general. Me entusiasmó escuchar que consideran que desarrollar habilidades técnicas de excelencia, no es suficiente por sí solo, sino que para que realmente nuestro aprendizaje tenga un sentido este debe tener una orientación social.

El conocimiento al servicio de la sociedad. Este concepto que nos ha estado acompañando en el último tiempo, y en particular desde hace dos años, es algo a lo que no podemos hacerle el quite nunca más. Es imprescindible que cada egresada o egresado tenga al menos una espina que le dé vuelta por la cabeza, que le haga preguntarse ¿cómo puedo aportar al resto desde lo que quiero hacer? Cuidado, con esto no digo que nuestros aportes se deban restringir a lo que tenga una aplicación directa a crear una sociedad más justa o equitativa. Por supuesto que no, el punto es el trasfondo. Por ejemplo, quien se dedica a desarrollar teoría puede entender su rol como alguien que solo está escribiendo fórmulas y teoremas porque le gusta la investigación, o bien, que está apoyando a mover la barrera del conocimiento para que otras personas tomen sus resultados, e implementen innovaciones que mejoren nuestra calidad de vida. Ese sentido de comunidad también ayuda a la sociedad. Si no, miren los resultados que se lograron cuando una comunidad mundial se organizó

para crear las vacunas que hoy nos están permitiendo salvar incontables vidas cada día.

Por otro lado, este sentido de comunidad debe ir expandiéndose y superando los límites de las “ingenierías”, o incluso los de las “carreras científicas”. El trabajo interdisciplinario es fundamental hoy en día. Y quizás ese es uno de los puntos en el que estamos más al debe. Esta absurda separación que existe entre las “ciencias” y las “humanidades”. Entre “habilidades duras” y “habilidades blandas”. La literatura dice que para enfrentar los desafíos del Siglo XXI necesitaremos de pensamiento crítico, comunicación, creatividad y colaboración. También de liderazgo, y un mayor conocimiento introspectivo ligado a la autorregulación y autoeficacia. La lista de habilidades puede continuar y continuar, pero el punto es que conversando con ese “mundo humanista” creo que nuestro aprendizaje se potenciaría aún más.

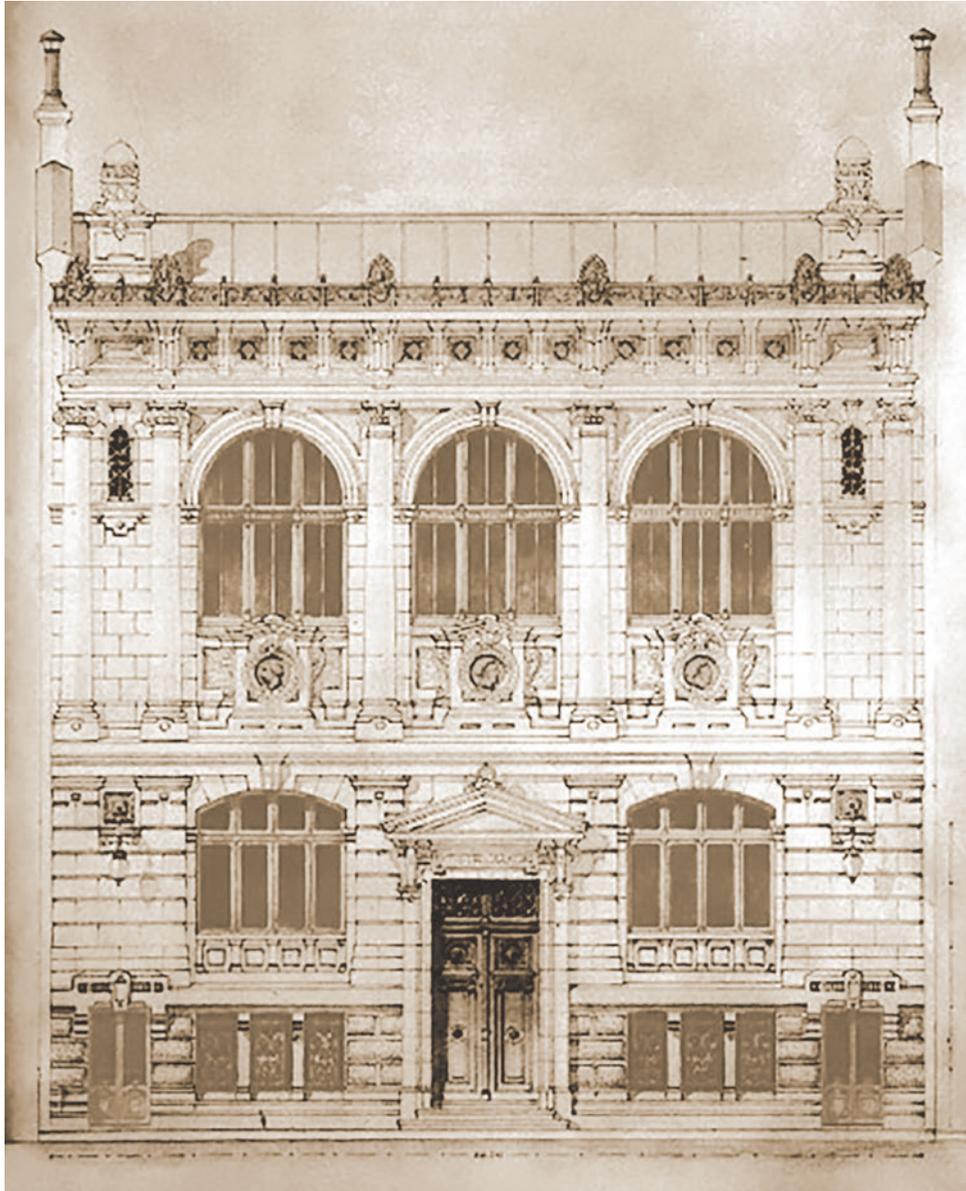
Pero como decía previamente, la verdad es que estoy optimista al respecto. Creo que mientras instituciones tan importantes como las que están presente en este evento tengan estos elementos presentes, vamos a avanzar exitosamente en esa dirección. Si no, miren los mismos premios que nos están entregando hoy. La valoración por la rigurosidad que hay que tener para obtener el mejor rendimiento académico, o el refuerzo a la vocación social necesaria para tener la mejor tesis que impacta a las industrias nacionales, o, por último, el resaltar nuestras aptitudes morales y de liderazgo. Tres dimensiones complementarias, tienen mucho que ver con todo lo que les he estado hablando en este discurso.

Por supuesto que la lista de desafíos que tenemos dentro de las ingenierías no se reducirá de un día para otro, pero confío en que, así como estamos nuestra formación, estamos disminuyendo las brechas de género, y relevando la importancia de la ética y sustentabilidad en nuestra toma de decisiones.

Por último, solo me queda volver a agradecer, gracias las instituciones por los reconocimientos, y por la valoración de las nuevas generaciones. A los y las seres queridos por su apoyo y cariño, y a nosotros y nosotras mismas, por todo el esfuerzo y trabajo que hemos dado por llegar hasta acá. Continuemos así.

Muchas gracias.

ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS



Como una necesidad de preservar la historia de ingenieros destacados y de la Ingeniería, la Comisión de Ingenieros en la Historia Presente, dio inicio a una serie de entrevistas, con el objeto señalado.

En esta ocasión se presentan dos extractos de las entrevistas realizadas a la Ingeniera Raquel Alfaro Fernandois y al Ingeniero Francisco Brieva Rodríguez. Estas entrevistas, como las que se hagan en el futuro, serán objeto de una publicación especial.

RAQUEL ALFARO*Eslabón de una cadena.*

Había sacado un alto puntaje en el bachillerato en matemáticas, pudiendo ingresar a cualquier carrera sin dar examen de admisión, pero pesó algo más, la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile quedaba muy cerca de su casa. Con el apoyo de sus padres, tomó la decisión de ser Ingeniera Civil.

En los primeros años su referente fue el ingeniero y poeta Arturo Aldunate Phillips que dictaba el ramo Responsabilidad Social del Ingeniero. Sus reflexiones significaron para ella una gran influencia en su desarrollo profesional. En los últimos años, le gustaron las estructuras, particularmente las metálicas y eso le llevó a hacer clases de estructuras metálicas en la Escuela de Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Entre las anécdotas que recuerda, señala haber participado en un grupo de teatro que formaron Igor Saavedra y Fernando Léniz con alumnos de distintos cursos. Tenían como profesores a actores del Teatro Experimental de la Universidad de Chile. Debutaron en la gran Sala de Química con “Las Preciosas Ridículas” de Moliere. Además de ella, actuó Denise Larée, su única compañera de curso. Otra actividad que recuerda, es su participación en la instalación en la vieja escuela, de una sala pintada de rosado, donde, olvidando las clases, se reunían a comentar temas de actualidad y a tomar café.

Al salir de la Universidad, participó en el diseño de las estructuras de concreto armado para el soporte del acueducto metálico de Las Vegas a Con-Con, trabajando en la Consultora Faiguembaun y León. Luego, hizo su tesis de titulación en el diseño de un puente pretensado de concreto armado y viajó para obtener un Master en Ciencias en la Universidad de Strathclyde de Escocia, en Administración de la Producción y Tecnología de la Manufactura, maestría de dos años, que logró realizar en un año, obteniendo un contrato como investigadora que daba cuenta del elevado nivel de las universidades chilenas.

Posteriormente, se desempeñó en la Gerencia General de la Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias (EMOS S.A), Sociedad Anónima del Estado, hoy Aguas Andinas. Fue también, Subgerente General del Servicio de Cooperación Técnica con la Pequeña Empresa (SERCOTEC). Trabajó en la División de Servicios Eléctricos, de la Dirección de



Servicios Eléctricos, Gas y Telecomunicaciones; en la Sección Desarrollo Urbano del Banco Mundial; en el Comité de Energía de CORFO y como evaluadora de proyectos del Fondo Empresarial (FONDEF) de la Comisión Nacional de Investigación en Ciencia y Tecnología (CONICYT).

Como aportes a la ingeniería, señala el haber demostrado con hechos que la ingeniería es una ciencia, entre otras, que sus principios deben ser compartidos, y que los ingenieros no deben trabajar solos. Son parte de un sistema donde actúan con otros profesionales, técnicos y administrativos, donde todos son importantes, y ese conjunto, que forma una empresa, tiene que estar integrado de manera armónica, siendo el propósito satisfacer los requerimientos del consumidor.

Recuerda el haber sido oradora de plenaria en la conferencia de la Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros (UPADI) que se celebró en Atlanta, Estados Unidos. Allí, presentó el tema Ingeniería y Sustentabilidad, sobre la gran responsabilidad social de los ingenieros. Antes, había tenido el honor de participar como oradora de plenaria en la Convención de la Federación Mundial

de Asociaciones de Ingenieros celebrada en Shanghai el año 2004, con el tema Satisfaciendo Necesidades Básicas y Creando Riqueza con Infraestructura Sanitaria. Sobre dicha convención presentó un informe que fue publicado en la Revista del Instituto.

Entre los principales desafíos de su carrera, recuerda que como Gerente General de EMOS S.A logró coberturas máximas hacia el Servicio Universal, con la máxima eficiencia y tarifas justas. El desafío también de disminuir las pérdidas en beneficio de la conservación del agua potable y del agua dulce, recurso natural cada vez más escaso.

Después de haber sido ingeniero de proyectos y jefe de evaluación de proyectos en la antigua EMOS durante diez años, conocía la empresa en todas sus aristas con todas sus deficiencias. De manera que al ocupar el cargo de gerente general le fue fácil aplicar en el aspecto social, los principios heredados de sus padres, distinguidos educadores, los del ya citado profesor Aldunate y también de Lautaro Echiburú Concha, que fuera un destacado ingeniero de la especialidad eléctrica, su jefe en la División de Servicios Eléctricos del Departamento de Concesiones Avalúos y Tarifas y con quién se casó.

Hace una mención especial al rol de las mujeres y a su rol de gerente. La mujer, que desde tiempos inmemoriales llevaba el cántaro de agua sobre su cabeza, ahora llevaba gerencias de área de una empresa de agua que una revista llamó “la empresa de las mujeres”. También dio conferencias sobre cómo lograr que el agua potable llegue a las personas en situación de pobreza. Siempre combatió que se dijera “agua para los pobres”, como si fueran de una clase social destinada a permanecer siempre pobre. Es enfática al señalar que ellos tienen derecho al agua potable para superar la pobreza, que es muy distinto. Escribió varios documentos para un programa de las Naciones Unidas orientado al desarrollo del agua potable y saneamiento, parte del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP).

Después de trabajar en el Banco Mundial en Washington D.C regresó a Chile y trabajó en el Servicio de Cooperación Técnica (SERCOTEC), donde fue Directora Regional Metropolitana y luego Subgerente General.

Desde la ingeniería, tuvo que relacionarse con otras profesiones y sus aportes los explica del siguiente modo, “si el Ministerio de Salud dice lávese las manos con agua corriente surge la pregunta ¿con qué me las voy a lavar si no tengo agua? Las empresas sanitarias de todo el país tienen que poner el agua. Este es un claro ejemplo de la relación entre estas empresas con los médicos. La epidemia del cólera no se expandió en Chile, pues a la cuenta del agua se le agregó un aviso de lavarse las manos. Sólo hubo 141 casos, mientras que en Perú hubo 20.000, con la consecuente pérdida económica para ese país”. También le correspondió tener una relación fuerte con los temas legales y por ello escribió un documento denominado “Las Debilidades del Marco Regulatorio Sanitario Chileno”.

En sus aportes al mejoramiento de las relaciones en las organizaciones en las que ha trabajado, opina que el escuchar es lo más importante. De la escucha surge una relación humana de colaboración que es muy positiva, y agrega, que de ese modo es fácil lograr que existan relaciones humanas amigables entre los distintos componentes de una empresa o de un programa.

Al definirse en pocas palabras, dice ser atípica y agrega, “soy eslabón de una cadena”.

De sus hijos habla con orgullo, su hija mayor es ingeniera ambiental, su hija menor es licenciada en estética y su hijo es biólogo marino. Algunos de sus nietos han hecho del deporte y la música, su razón de ser, lo cual sin duda proviene de la influencia de su abuela. Además, le gusta cocinar. Y en esa actividad, asegura, las matemáticas son muy importantes. Le gusta también tejer y la costura, donde diseñó una falda que necesitaba cuatro metros, utilizando tan sólo tres, aplicando las fórmulas del diámetro de la circunferencia, con lo cual logró una falda mucho más atractiva y económica.

Ella, se siente una mentora, una asesora. Sus alumnos, han sido las personas que trabajaron con ella, con quienes han tenido una cooperación mutua. Con esa labor se identifica.



FRANCISCO BRIEVA*Sentido común y entrega.*

Esa especial sensibilidad que tenía por la Matemática y la Física, ya manifestada durante sus años de las humanidades en un liceo fiscal en Talca, le hicieron buscar alternativas de formación superior en la ingeniería. Sin mayor orientación vocacional ni referencias económico-sociales para un desarrollo profesional, no tenía conocimiento de lo que era el oficio ingenieril, de su diversidad y atractivo. Eran tiempos en que la tecnología no invadía aún el diario vivir; correspondía a un mundo paralelo, lejos de la experiencia del estudiante secundario, lo que hacía azarosa la elección de un camino particular para lograr un entrenamiento profesional. El espectro de la oferta formativa era limitado e ingeniería era el desafío de estudiantes hábiles en las ciencias duras, así que ahí se inscribió.

Si en el liceo, hubiese seguido a quienes le inspiraban, habría optado por una formación humanista, siendo la literatura y la filosofía sus referentes. Pero, una profesora del curso de Física le abrió un mundo que pocos comprendían y le enseñó un rigor que pocos dominaban, el mundo de la física y la matemática.

Entre quienes influyeron en su formación académica y profesional, menciona a Igor Saavedra y a Enrique d'Etigny. El primero, una persona diferente, un científico destacado, que le entrega conocimientos, constituye un modelo de vida especial y con quien disfruta de una amistad por años. El segundo, le da la imagen del ingeniero universal, creador y realizador, que piensa y estructura las organizaciones para sus logros científico-tecnológicos. Dos personajes y dos miradas, dos énfasis desde ángulos muy diferentes, para beneficio de quienes buscaban soluciones nuevas. Otro referente es Guillermo González, en Ingeniería Eléctrica, quien proyecta para él la sensatez ingenieril, la necesidad por renovar el conocimiento y su uso, la fortaleza requerida de una solución tecnológica. Y, después en su Doctorado en Oxford, señala a Ray Rook quien le enseñó, según sus palabras, “la artesanía que sostiene a una buena Física”.

Para estudiar ingeniería, eligió a la Universidad de Chile, frente a la Universidad Técnica Federico Santa María donde también había sido aceptado. Recuerda su primera práctica en ENTEL, limitada a la verificación de planos de cableado eléctrico en centrales de comunicaciones, poco motivante. Después estuvo en una práctica tipo industrial en la empresa SOQUIMICH, en María Elena,



una Compañía Minera estatal dedicada a la explotación del salitre. Esa fue una experiencia inolvidable, no por la ingeniería, sino por la experiencia de vida y trabajo en pleno desierto. Una tercera experiencia que recuerda es su última práctica en ENDESA, ya más focalizada en estudiar un problema de regulación de frecuencia para las Centrales El Toro y Antuco de pronta puesta en operación. Fue un período decisivo para determinar su futuro profesional, ya sea en la práctica de la ingeniería, o la búsqueda de otras opciones en la Física.

Una formación en ingeniería, que abrió espacios para entusiasmarlo con las llamadas Ciencias Exactas, la Física en particular, lo llevó por caminos inusuales de desarrollo profesional en sus tiempos de inicio. De ingeniero civil electricista a un doctorado en Física Nuclear teórica, resultó para él una mezcla rica en ideas y capacidad para modelar y resolver problemas de complejidad considerable, como es el modelamiento y las habilidades en el cálculo numérico que permiten obtener resultados específicos y comparables con la evidencia del mundo real, un trabajo teórico central en la validación de las teorías que sustentan la Física y un símil cercano a las prácticas más elaboradas características de la esencia ingenieril. Destaca un período

centrado en la investigación. Los problemas de su interés se relacionaban con lograr una descripción *ab initio* de las reacciones nucleares, es decir, tener una comprensión microscópica de lo que ocurre cuando estructuras formadas por muchos nucleones colisionan, teniendo como punto de partida sólo la interacción inter nucleónica. Otro período de gestión y administración universitaria. En la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile se enfocó en lograr tener un centro de alto nivel interdisciplinario, desde las ciencias básicas a una ingeniería de frontera, sintonizada con los desarrollos mundiales. A una edad académica relativamente temprana, tuvo la oportunidad de ser Vicedecano de Facultad por algo más de 2 años y posteriormente Decano. Otro período, más corto, fue como servidor público. En dos oportunidades fue invitado a dirigir organismos dentro del aparato de administración estatal, en la Comisión Chilena de Energía Nuclear y en la hoy desaparecida Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT). Ambas experiencias fueron breves, y aunque separadas por muchos años, le dejaron la certeza sobre una carencia de visión científica-tecnológica y su impacto en el desarrollo nacional que invade a los representantes políticos y gobernantes.

En otras disciplinas que han influido en él, menciona a la Literatura y la Filosofía, que le han otorgado una mirada lúdica hacia los problemas complejos y a sus afanes deportistas de juventud, con cierta dosis de competitividad que consideraba necesaria para mantener alta la adrenalina.

Al pedirle que se defina en pocas palabras, responde: “sentido común”. Esto lo lleva a definir sus puntos de vista y formas de actuar, como si fuese un decálogo:

- Dar espacio para que las personas crezcan y brillen en su oficio.
- Destacar la inteligencia clara de quienes sobresalen en su quehacer.
- Liderazgo como la capacidad de sintonizar las aspiraciones del grupo alrededor de algunas pocas ideas centrales a la institución.
- Mucho sentido común.
- Poca normativa.

- Mucho trabajo.
- Poca formalidad.
- Sólo entrega.
- Postergación de los proyectos personales.
- Hacernos responsables por las necesidades que comentemos”.

En sus valores, destaca el haber tratado de mantenerse intelectualmente honesto en su vida profesional. Algo muy difícil de enseñar. Cada jornada representa para él, una concepción de vida, un estilo de hacer y trabajar.

Aprecia como la ingeniería ha diversificado su campo de acción, particularmente en las últimas tres décadas que coinciden con la incorporación masiva de la computación, los algoritmos y el procesamiento de señales de todo tipo a la práctica de la profesión. Complementa esa revolución, el advenimiento de internet y la socialización del conocimiento que trae consigo. Destaca que esas condiciones han permitido a la ingeniería proyectar sus lógicas y técnicas hacia la solución de problemas en ámbitos tan diversos como la educación o la medicina. No obstante, cree que el sistema nacional ha sido más bien lento en alinearse con las nuevas tendencias, tanto a nivel formativo como en actividad profesional, y que las brechas que se manifiestan con las sociedades más evolucionadas siguen estando presentes y con dificultad para superarlas. Con el futuro tiene una doble mirada. Piensa que las oportunidades son enormes, especialmente en el contexto de sociedades futuras ancladas en soluciones tecnológicas inteligentes para su desarrollo. Las dudas, tienen que ver con la capacidad de la ingeniería nacional para llegar a ser un actor relevante, y no simples seguidores, de las transformaciones socio-tecnológicas que se requieren diseñar e implementar.

A las nuevas generaciones les recomienda apreciar que hoy, y en el futuro, el problema no será acceso a información; la aventura será encontrar soluciones de calidad, singulares en su concepción y universales en su impacto, haciéndolas una realidad óptima que satisface las demandas de la sociedad. Y esa plenitud requiere un trabajo intenso que empieza hoy.



INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHLE RECIBE
PREMIO NACIONAL 2021 DEL COLEGIO DE INGENIEROS
DE CHILE - CATEGORÍA INSTITUCIÓN



El Colegio de Ingenieros de Chile A.G., anualmente entrega su máxima distinción, el Premio Nacional. Este año, el Instituto de Ingenieros de Chile fue distinguido con dicho Premio Nacional, en categoría Institución.

Nuestro Presidente, don Ricardo Nicolau del Roure, fue entrevistado por el Colegio y manifestó que: para el Instituto, constituye un gran orgullo este reconocimiento, es “un premio muy valorado, especialmente por provenir de una institución que se constituyó por una Comisión firmada en el Instituto que redactó su cuerpo legal base y con la que, por lo tanto, compartimos raíces comunes y que, por consiguiente, puede aquilatar cabalmente la trayectoria y los logros que el Instituto de Ingenieros ha alcanzado en sus 133 años de existencia, promoviendo la excelencia de la ingeniería y el desarrollo del país”.

A continuación, reproducimos el contenido de la entrevista realizada al Presidente.

¿Qué aporte puede hacer la ingeniería en la recuperación pos pandemia?

La ingeniería siempre está en la vanguardia cuando se trata de recuperaciones, ya sea de actividades productivas, de reconstrucción por catástrofes, o en el caso de pandemias como la que aún estamos viviendo.

En el presente, lo más importante de recuperar son los puestos de trabajo destruidos por la pandemia, y en ese aspecto, la industria de la construcción y la inversión en Obras Públicas y viviendas son intensivos en mano de obra, además de utilizar de forma relevante mucha ingeniería.

¿Qué rol puede tener la ingeniería en el proceso constituyente que enfrenta el país?

En una primera mirada parece que este es un ámbito donde la ingeniería no tiene cabida, sin embargo, resulta ser todo lo contrario y así lo ha entendido el propio Colegio de Ingenieros al constituir una Comisión para preparar estudios y proposiciones que sirvan de base para abordar temas muy relevantes en una Constitución moderna, como son los recursos hídricos, la minería y el medio ambiente, entre otros.

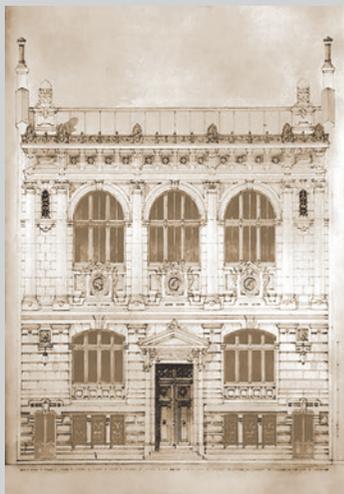
¿Cuáles son los nuevos desafíos que enfrenta el Instituto de Ingenieros?

La realidad es que los desafíos del Instituto de Ingenieros son, por lo general, los mismos desafíos que enfrenta el país y la sociedad. Así, en este momento, el Instituto y sus Comisiones de estudio están trabajando para entregar propuestas tanto a la comunidad como a las autoridades de Gobierno en temas tan relevantes y diversos como; “Evaluación de los aprendizajes en ingeniería con modalidad virtual”, “El Estado, su eficiencia, su rol y los desafíos futuros”, “Los Glaciares”, “Electromovilidad”, “La mujer en el estudio y ejercicio de la ingeniería”, “Calidad de las ingenierías en proyectos de inversión”, “Consecuencias del Cambio Climático”.

¿Cuáles han sido los aportes de la ingeniería a nivel mundial este 2021?

Bueno aún no terminamos el año, sin embargo, se estima que el aporte de la bio-ingeniería en el desarrollo de las vacunas contra el Covid-19 fue fundamental, así como también lo ha sido toda la logística y el control estadístico de las innumerables variables y formulación de modelos para el manejo y control de la pandemia. Así, en nuestro país, el Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería de la Universidad de Chile, realizó aportes importantes para el modelamiento y control de la pandemia.

RECONOCIMIENTO A NUESTROS SOCIOS



El Instituto de Ingenieros de Chile, 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 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 son 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, es muy 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 Ábalos Labbé
Patricio Aceituno Gutiérrez
Hugo Acuña Sfrasani
Antonio Alarcón Baeza
Luis Alarcón Cárdenas
José A. Aldunate Rivera
Raquel Alfaro Fernandois
Eliana Almendras Carvajal
Raúl Álvarez López
Iván Álvarez Valdés
Jorge Andaur Rodríguez
Carlos Andreani Luco
Rudolf Araneda Kauert
Luis Aravena Nuñez
Andrea Armijo Zarricueta
Luis Arrau del Canto
Jaime Arredondo Castillo
Elías Arze Cyr
Pedro Arze Cyr
Katherine Ascencio Letelier
Mauricio Avendaño Guerra
Dante Bacigalupo Marió
Marcial Baeza Setz

Daniel Barría Iroumé
Cristián Barrientos Gutiérrez
Juan Carlos Barros Monge
Aníbal Bascuñan Bascuñan
Nelson Basso Cáceres
Bruno Behn Theune
Carlos Benavides Farías
Sally Bendersky Schachner
J. Sebastián Bernstein Letelier
Sergio Bitar Chacra
Leonardo Bitrán Bitrán
Patricio Bonelli Canales
Jorge Bravo Espinosa
Fernando Bravo Fuenzalida
Mateo Budinich Diez
Juan Enrique Cannobbio Salas
Carlos Canto Ilabaca
Manuel Carracedo
Carlos Castro Castro
J. Manuel Casanueva Préndez
Juan E. Castro Cannobbio
Jorge Cauas Lama
José Ceroni Díaz

Aldo Cipriano Zamorano
Silvana Cominetti Cotti-Cometti
Gastón Concha Fariña
Fernando Crespo Romero
Juan Humberto Cruz Rodríguez
Pablo Daud Miranda
Fernando de Mayo Israel
Jeffrey James Dawes
Alejandra Decinti Weiss
José de Gregorio Rebeco
Juan Pablo de la Carrera
Raúl Demangel Castro
Joaquín Díaz Quiroga
Esteban Domic Mihovilovic
Fernando Echeverría Acuña
Gustavo Estay Caballero
Javier Etcheberry Celhay
Hans Feddersen Jungjohann
Víctor Figueroa De la Fuente
Sebastián Fingerhuth Massmann
Álvaro Fischer Abeliuk
Guillermo Flores Gálmez
Martín Fuenzalida Domínguez

Roberto Fuenzalida González	Guillermo Matta Fuenzalida	Daniel Ríos Figueroa
Javier García Monge	Carlos Medel Vera	Gabriel Rojas Brito
Alex Gildemeister Burgos	Sergio Melo San Juan	Miguel Ropert Dokmanovic
Arturo Goldsack Jarpa	Pablo Mendoza Zuñiga	Manuel Ruz Jorquera (†)
Rodrigo Gómez Álvarez	Carlos Mercado Herreros	Guillermo Ruiz Troncoso
Ricardo González Cortés	Viviana Meruane Naranjo	Felipe Sabando del Castillo
Héctor González Garrido	Germán Millán Pérez	Marta Salazar Becerra
Edgardo González Lizama	Germán Millán Valdés	Hernán Salazar Zencovich
Guillermo González Rees	Ricardo Mohr Rioseco	Armando Sánchez Araya
Sergio González Venti	Oscar Molinos Oyanedel	Rodrigo San Martín Muñoz
Mauro Grossi Pasche	Marcela Munizaga Muñoz	Jaime Sánchez Haverbeck
Tomás Guendelman Bedrack	Eduardo Muñoz Castro	Gustavo Sandoval Sepúlveda
Mario Guendelman Bedrak	Rodrigo Muñoz Pereira	Rodrigo San Martín Muñoz
Germán Guerrero Fuenzalida	Juan Music Tomacic	Mario Santander García
Hernán Guerrero Guerrero	Ricardo Nanjarí Román	Eduardo Santos Muñoz
Sergio Gutiérrez Cid	Luis Nario Matus	Rodolfo Saragoni Huerta
José Antonio Guzmán Matta	Ricardo Nicolau del Roure G.	Mauricio Sarrazin Arellano
Cristian Hermansen Rebolledo	Christian Nicolai Orellana	Alfredo Schmidt Montes
Diego Hernández Cabrera	Guillermo Noguera Larraín	Paulo Sepúlveda Amestoy
Gonzalo Hernández de la Fuente	Raúl Oberreuter Olivares	Natalia Silva Bustos
Erwin Hoehmann Frerk	Lionel Olavarría Leyton	Fernando Silva Calonge
Cristian Ihle Bascuñan	José Orlandini Robert	Jaime Solari Saavedra
Jaime Illanes Piedrabuena	Ricardo Ortega Klose	Jaime Soto Muñoz
Pedro Inojosa Bañados	Rodrigo Pacheco Mercado	Alejandro Steiner Tichauer
Juan Izquierdo Besa	Carolina Pacheco Vega	Jorge Sturms Forestier
Alvaro Izquierdo Wachholtz	Carlos Pasten	Iván Suazo Córdova
Sergio Jiménez Moraga	Verónica Patiño Sánchez	Aldo Tamburrino Tavantzis
Jerko Jureti Díaz	Mario Pavón Robinson	Raúl Tejada Sanhueza
Carlos Kubik Castro	Jorge Pedrals Guerrero	Pedro Toledo Correa
Mario Kuflik Derman	José Peña Méndez	Alberto Trigueros Baratta
Karen Landeros Vera	Humberto Peña Torrealba	Raúl Uribe Sawada
Alfonso Larraín Vial	Andrés Pérez Magalhães	Luis Valenzuela Palomo
Pedro Lasota Muñoz	Augusto Pérez Maturana	Cristián Vargas Araya
Juan Carlos Latorre	Juan E. Pérez Retamales	Ximena Vargas Mesa
Jaime Lea-Plaza Sáenz	Rodrigo Pérez Tobar	Scarlett Vásquez Paulus
Agustín León Tapia	Luis Pinilla Bañados	Solano Vega Vischi
Mario Letelier Sotomayor	Ernesto Piwonka Carrasco	Gladys Vidal Sáez
Julio Lira Ramírez	Alejandro Polanco Carrasco	Ian Watt Arnaud
R. Alejandro López Alvarado	Olvido Polanco González	Jorge Walters Gastelu
Karina López Astudillo	Daniela Pollak Aguiló	Hans Weber Münnich
Luis Madrid Morales	Eric Prenzel Leupolt	Andrés Weintraub Pohorille
Julio Magri Rabaglio	Francisco Rayo Calderón	Francisco Wittwer Opiz
Juan Maiz Gurruchaga	Juan Rayo Prieto	Jorge Yutronic Fernández
Nicolás Majluf Sapag	Osvaldo Richards Abans	María Zapata González
Jorge Mardones Acevedo	Lucio Ricke Gebauer	Luis Zaviezo Schwartzman

ISSN 0716 - 2340



**ANALES
DEL INSTITUTO
DE INGENIEROS DE CHILE**

Vol. 133, N° 3 - DICIEMBRE 2021

“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 ilus-tradas i de buena voluntad que nos honren con el precioso continjente de ideas útiles”.

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

Anales del Instituto de Ingenieros Vol. 133, N° 3, diciembre de 2021.

Contenido

AUTONOMOUS LOADING SYSTEM FOR LOAD-HAUL-DUMP (LHD) MACHINES USED IN UNDERGROUND MINING.	Pág. 73
Carlos Tampier, Mauricio Mascaró and Javier Ruiz-del-Solar.	
ESTUDIO DE LA BRECHA Y RIESGO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO TINGUIRIRICA Y SU PROYECCION EN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO.	Pág. 93
Eduardo Muñoz-Castro y Ximena Vargas.	
GEOPOLÍMEROS DE RELAVES PARA RELLENOS DE CASERONES.	Pág. 103
Investigación JRI y CIMS-JRI.	
REFLEXIÓN SOBRE LOS NUEVOS CRITERIOS Y ESTÁNDARES DE CALIDAD PUBLICADOS POR LA CNA PARA LA ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL INTEGRAL.	Pág. 107
Fernanda Valdés Raczynski y Juan Music Tomicic.	

Editor

Raúl Uribe Sawada, Instituto de Ingenieros de Chile.

Comité Editorial

Jorge Carvalho W., Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA)

Alexander Chechilnitzky Z., Asociación Interamericana de Ingeniería (AIDIS)

Scarlett Vásquez P., Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID)

Gonzalo Montalva A., Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE)

Carolina Palma A., Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte (SOCHITRAN)

Alonso Barraza San M., PMI Santiago Chile Chapter (PMI, Capítulo Chileno)

Raúl Benavente G., Sociedad Chilena de Educación en Ingeniería (SOCHEDI)

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.

AUTONOMOUS LOADING SYSTEM FOR LOAD–HAUL–DUMP (LHD) MACHINES USED IN UNDERGROUND MINING

Carlos Tampier¹, Mauricio Mascaró² and Javier Ruiz-del-Solar^{3*}

Abstract

This paper describes an autonomous loading system for load–haul–dump (LHD) machines used in underground mining. The loading of fragmented rocks from draw points is a complex task due to many factors including: bucket–rock interaction forces that are difficult to model, humidity that increases cohesion forces, and the possible presence of boulders. The proposed system is designed to integrate all the relevant tasks required for ore loading: rock pile identification, LHD positioning in front of the ore pile, charging and excavating into the ore pile, pull back and payload weighing. The system follows the shared autonomy paradigm: given that the loading process may not be completed autonomously in some cases, it takes into account that the machine/agent can detect this situation and ask a human operator for assistance. The most novel component of the proposed autonomous loading system is the excavation algorithm, and the disclosure of the results obtained from its application in a real underground production environment. The excavation method is based on the way that human operators excavate: while excavating, the bucket is tilted intermittently in order to penetrate the material, and the boom of the LHD is lifted on demand to prevent or correct wheel skidding. Wheel skidding is detected with a patented method that uses LIDAR-based odometry and internal measurements of the LHD. While a complete loading system was designed, the validation had to be divided in two stages. One stage included the rock pile identification and positioning, and the other included the charging, excavation, pull back, and weighting processes. The stage concerning the excavation algorithm was validated using full-scale experiments with a real-size LHD in an underground copper mine in the north of Chile, while the stage concerning the rock pile identification was later validated using real data. The tests showed that the excavation algorithm is able to load the material with an average of 90% bucket fill factor using between three and four attempts (professional human operators required between two and three loading attempts in this mine).

¹ Ingeniero Civil Eléctrico y Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile.

² Ingeniero Civil Eléctrico de la Universidad de Chile.

³ Ingeniero Civil Electrónico de la Universidad Técnica Federico Santa María y Doctor en Ingeniería de la Universidad Técnica de Berlín. Advanced Mining Technology Center, Department of Electrical Engineering, Universidad de Chile, Santiago 8370451, Chile; carlos.tampier@amtc.cl (C.T.); mauricio.mascaro@amtc.cl (M.M.)

* Correspondence: jruizd@ing.uchile.cl

1. Introduction

The automation of mining equipment is an important requirement in the mining industry. This is because mining operations need to increase the safety of the workers, as well as to augment the productivity, efficiency, and predictability of the processes. Safety is, without doubt, a key factor, and has been the top priority of mining companies during the past decades. This is particularly true for underground operations, with hazardous environments where workers are exposed to constant risks of rock falls, rock bursts, and mud rushes, and where the presence of dust in the air can result in a number of associated occupational diseases in workers [1]. All of these hazards have been steadily increasing as mine operations have gone deeper, and geomechanical conditions therefore become more extreme. As a consequence, great effort has been invested in increasing the automation level of underground mining machines, especially those that operate in high-risk areas [1], one of them being load-haul-dump (LHD) machines (also known as scoop trams).

An LHD is a four-wheeled, center-articulated vehicle with a frontal bucket used to load and transport ore on the production levels of an underground mine (see Figure 1). The automation of the transport phase has been covered in many previous publications [2–6] and is currently commercially available. However, although the loading part has also been a subject of scientific research, [7–17], its application in mining environments is not as widely used as other types of automation solutions such as autonomous navigation, assisted tele-operation, or collision avoidance. The slower-paced progress in this area could be due to the complexity of the addressed problem: during excavation, the interaction between the bucket and the material is difficult to model, because the bucket-material interaction forces may vary greatly depending on the properties of the material (e.g., humidity, hardness, fragmentation), the rock pile geometry, and the LHD dynamics (mass, speed, etc.). For this reason, the development of autonomous loading solutions requires full-scale experiments under

conditions that can be found only in real mining environments, since physical interactions between the machine and the fragmented rock cannot be easily reproduced elsewhere. This adds to the fact that loading maneuvers and techniques are mostly developed and perfected through the experiences of human operators.



Figure 1. Full-scale LHD machine used during the test of the excavation algorithm.

In this paper, a complete system for the automation of the loading process using LHDs is proposed. This system is designed to integrate all the relevant tasks required for ore loading: rock pile identification, the LHD's positioning in front of the ore pile, charging, excavation, pull back, and payload weighing (see Figure 2). Assuming that in some cases the loading may not be completed autonomously, the system can detect this situation and request the help of a human operator (by tele-operation). Thus, the proposed system falls under the shared autonomy paradigm. In the mining exploitation context, fleets of LHDs are normally supervised by humans, so providing assistance to an autonomous equipment is not an unusual requirement, especially considering that the most common practice is for LHD automation systems to rely on tele-operators to handle the loading task. It must be noticed that providing assistance on demand, i.e., only in the few cases that the autonomous system is not able to load, is much more efficient than the current semi-autonomous operation used in most commercial systems, where navigation is executed autonomously but loading is teleoperated.



Figure 2. Steps of the proposed autonomous loading system.

The core of the autonomous loading system is the excavation algorithm, which is based on the way that human operators excavate: the bucket is tilted intermittently while excavating in order to penetrate the material, and the boom of the LHD is lifted on demand to prevent or correct wheel skidding. Wheel skidding is detected with a patented method that uses LIDAR-based odometry and internal measurements of the LHD's actuators [18]. The excavation algorithm was validated in an underground mine (a

sublevel stoping copper mine located in Chile), using full-scale excavation experiments with a real LHD and a typical production rock pile. The validation process in a productive area of a real mine and the lessons learned are fully disclosed here. The 2D-pile modeling was validated afterwards with data from these tests.

It is also important to mention that commercial solutions to the problems of autonomous loading need to be com-

patible with the 24×7 operation of mines, where production throughput is one of the main requirements. That means that the LHD needs to be able to load without stopping during the transition from navigation to loading. The proposed automation framework considers this requirement, and it is able to characterize the rock pile, without stopping the LHD, while it approaches the pile.

The main contributions of this paper are:

- A system that models and implements the whole loading process required in underground mining operations, from rock pile identification to payload weighing. The system is based on the shared autonomy paradigm, which allows the system to obtain assistance on demand from a human operator.
- An excavation algorithm that is based on the way that human operators excavate, and that uses a patented method for detecting wheel skidding, which is required for successful excavation of fragmented material in draw points.
- Full-scale rock excavation experiments using a commercial LHD in a production level of a sublevel stopping mine.

This paper is organized as follows: Section 2 presents the background and related work on loading automation for LHDs. Section 3 describes the proposed autonomous loading system. In Section 4, results of the full-scale experiments are shown and discussed. Finally, in Section 5, the main conclusions of this work are drawn.

2. Background and Related Work

2.1. Problem Description

Autonomous loading of fragmented rock involves a sequence of steps: As the LHD's operator approaches the draw point, a swift assessment of the condition of the rock pile is made. The bucket of the LHD is tilted downwards until the tip is pressed against the ground. Next, the machine is commanded to charge at the rock pile. After the LHD makes contact, it buries the bucket in the rock pile, and bucket tilt and lift movements are issued as it advances through the fragmented rock. When sufficient penetration is achieved, the bucket is fully retracted, and the vehicle is withdrawn with a reverse motion. Then, the operator shakes the bucket briefly and assesses whether or not enough ore has been loaded. If necessary, a new loading maneuver is carried out.

The step in which the machine is being controlled to dig into the rock pile will herein be referred to as the excavation process. During excavation, bucket-rock interaction forces affect the bucket motion through the material, and ultimately define the amount of ore loaded. Granular material inter-particle forces, as well as bucket-rock interactions, have been studied previously, but their complexity has led only to stochastic modeling [19]. In consequence, an analytical approach to bucket motion control is not pos-

sible, and accurately replicating these interactions to develop a system in simulation is highly unlikely. Hence, only a real environment offers suitable conditions for development of, and experimentation with, an excavation procedure. Furthermore, fragmented rock, unlike piled sand or gravel, is much more difficult to load. This is aggravated due to the environmental conditions in underground mining. Depending on the mining method, the column of blasted rock might exert large compression forces on the open face of the draw point (see Figure 3). Humidity can also increase cohesion forces, making the overall process more difficult [20]. Moreover, large rocks can be present in the draw point. For this reason, the operator needs to detect the presence of large rocks while approaching the draw point, and, depending on their size, could be forced to change the goal of the maneuver from filling the bucket to just loading one large rock. If the rock is too big to be loaded, the task is aborted. Furthermore, other conditions, such as narrow tunnels, uneven or unprepared terrain, and/or significant amounts of water and mud near the draw point, can make the loading process very challenging. An autonomous system should be prepared to handle all these situations in addition to performing certain processing and steps that a human operator deals with while driving the LHD, such as detecting an accurate enough position of the rock pile before charging at it, making sure not to hit the tunnel while pulling back from the rock, and estimating if the bucket is full enough.

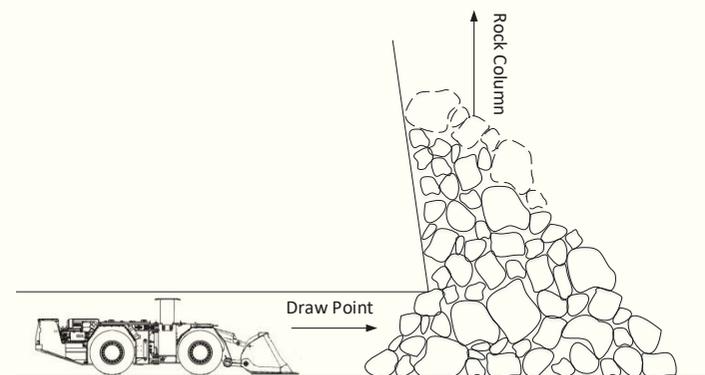


Figure 3. Sublevel stopping draw point.

2.2. How Human Operators Excavate

The excavation process is the core of the loading maneuver; it is the crucial step and, since bucket-rock interactions cannot be predicted in advance, there is no optimal method for performing this operation. Nevertheless, human operators have had to deal with this situation by learning the loading technique from experience and shared good practices. It is natural, therefore, to analyze which ideas can be borrowed from them. Through several interviews with LHD operators of Chilean block caving and sublevel stopping mining companies, and discussions and analysis of data from mining operation manuals, some common points in their practices were identified:

- Before engaging with the rock pile, the bucket must be fully extended.
- Forward motion is selected for maximum traction (first gear).
- Intermittent tilt commands are the basis of the excavation process.
- Lift commands are mainly issued to prevent or correct wheel skidding.

Figure 4 shows a graphical representation of an excavation maneuver. First, the LHD engages with the rock pile, then the bucket is tilted in order to excavate on the muck pile. When the wheels lose traction, the boom is lifted to regain traction. After filling the bucket, the LHD pulls back. Figure 5 shows a graphic of some of the relevant variables during a line-of-sight remote-controlled loading maneuver. As mentioned, bucket tilting (“tilt command”) is activated intermittently. Its duration and shape vary among operators and loading attempts. Techniques also using negative tilt commands (downwards tilting of the bucket) were also encountered in combination with positive lift commands (“lift command”). The common factor in all of them was the intermittency of the commands. As for the lift command, its use was seen to be highly variable, which correlates with the notion of using it mainly to prevent wheel skidding. In the example of Figure 5, the lift command was not used at all. The “pedal command” is the one used for machine acceleration and thus, in turn, engine revolutions per minute (RPM). “Tilt angle” and “lift angle” are the bucket tilt and boom lift angle values, estimated through the encoders installed in the machine. “Transmission pressure” is the hydrostatic transmission pressure of the machine, a variable that can be associated with the engine’s power output. “Skidding factor” is an estimated skidding factor that is explained in Section 3.3.

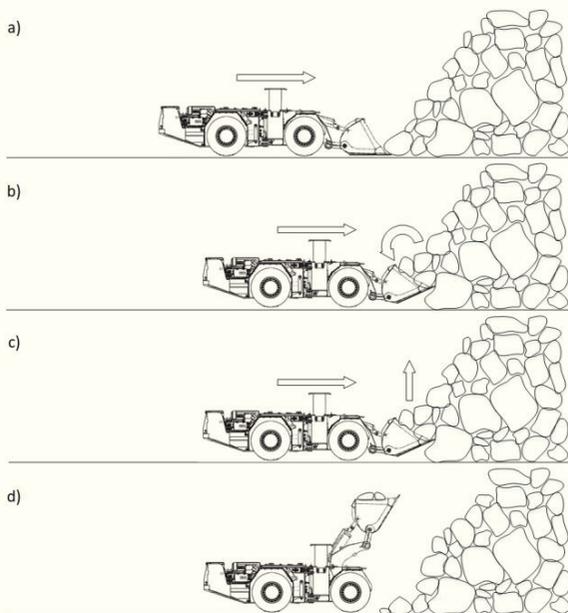


Figure 4. Excavation method diagram. (a) LHD engages with the rock pile. (b) Bucket tilt used to excavate. (c) Boom lift used to control wheel traction. (d) End of the excavation phase.

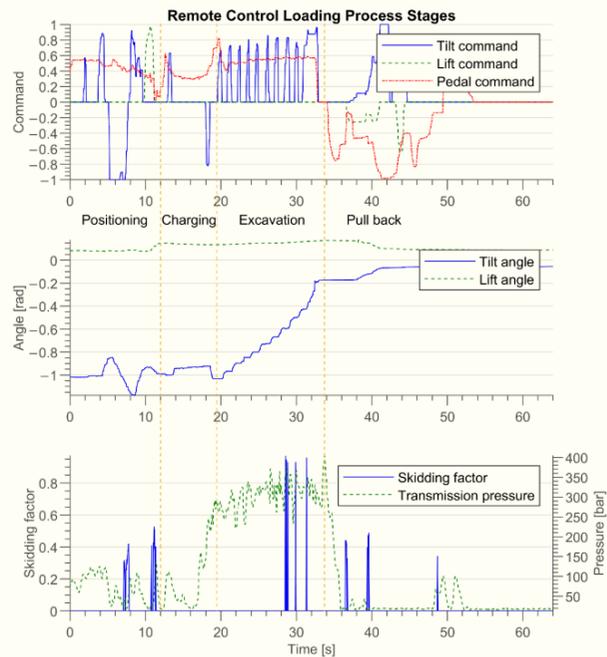


Figure 5. Relevant variables during the loading maneuver: Lift/Tilt command: manual bucket lifting/tilting command. Pedal command: manual machine acceleration command. Transmission Pressure: hydrostatic transmission pressure of the machine. Tilt Angle: tilt angle of the bucket. Lift Angle: lift angle of the boom. Skidding factor: estimated skidding factor. See the definitions of these variables in Sections 3.3 and 3.4.

2.3. Related Work

Mikrived analyzed the interaction forces in excavation processes and proposed that measurements of the resistive forces could be used for controlling them [21]. Hemami studied the LHD loading process and dealt with theoretical formulations on bucket trajectory and resistive forces during a scooping motion [7,8,10]. Other work has addressed the loading problem using laboratory-scale prototypes, under less realistic conditions [9,11,12,22]. Research on autonomous loading showed scarce progress up until the past decade. In [13], full-scale experiments with a real LHD were performed using a proposed admittance-based controller for bucket commands. This work was further extended in [15–17] with support from the LHD original equipment manufacturer (OEM) Atlas Copco (now Epiroc), a study that led to a patented method [23]. It should be noted that this method addresses only the problem of ore excavating once the bucket is inside the rock pile. On the other hand, our approach comprehends the complete loading process, while also benefiting from human experience.

Caterpillar, another LHD OEM, is known to have been working on technical solutions for the autonomous loading problem, as demonstrated by patents [24–26]. While their patents show that they have tackled different issues of the autonomous loading problem, a general system has not been described, and their research has not been made

available to the scientific community. However, it is uncertain if either of these solutions are able to handle the loading problem in block/panel caving draw points, which is significantly harder than loading from an ore pile or from draw points originated by other mining methods. As mentioned, loading from draw points is difficult due to many factors including: bucket–rock interaction forces that are difficult to model, humidity that increases cohesion forces, and the possible presence of boulders.

According to the public information shared on the web sites of LHD OEMs, only Epiroc, Sandvik, and RCT Global have commercially available products that focus on the autonomous loading task. However, specific features, limitations, and applicability for block/panel caving or sublevel stoping underground mining are not publicly disclosed, and therefore no comments can be made on them. At least in Chile, where all major mining companies operate and where one third of the world’s copper is produced, no autonomous loading system for LHD is in use.

Work associated with standard front-end loaders was not considered in this analysis, because they operate on the surface, where the difficulties associated with underground draw points are not present. In addition, these types of vehicles usually deal with material that has already been processed by milling equipment.

Our previous work on the topic of autonomous loading with LHDs was focused on laboratory-scale trials [27]. While useful for an initial approach to an experimental setup, laboratory experiments are limited due to the large deviation between real-world operating conditions and data from a small-scale and controlled environment. Other laboratory work is presented by Shi [22], which has some similarities with the here-presented method, as excavation is modeled after the experience of human operators. However, since their experiments are carried out using a robotic arm, it is difficult to apply those findings to a four-wheeled machine such as an LHD.

As can be seen, little work has been published on the particular case of autonomous loading with LHD machines in real underground mining environments, and, as far as we know, no previous method has validated an excavation technique using human operator experiential knowledge under real underground mining conditions.

3. Proposed Autonomous Loading System

3.1. Methodology Overview

The hardware used in this work included a full-scale LHD machine (a GHH LF11H with 11-ton tramping capacity and hydraulic powertrain) retrofitted with two 2D laser scanners (SICK LMS511), encoders in all joints (IFM RN7012), pressure sensors along the bucket’s tilt and the boom’s lift hydraulic lines (manufacturer specific, 600 bar), and an onboard industrial computer (Advantech ARK-2151-59AIE) (see Figure 1). All components are of

industrial grade, suitable for the rigorous environment of underground mining, and readily available as off-the-shelf components used widely in a broad range of commercial applications. In order to better integrate the system with commercial autonomous navigation solutions for LHDs, which only use 2D scanners, 3D laser scanners were not used in the current version of the proposed system. The software implementation was performed using ROS as the central middleware [28], CABS library [29] for state-machine codification, and ROS actions to interface with the main processing function in each state. The system was initially developed and tested in a simulated environment using Gazebo [30].

An autonomous loading routine can be thought of as a sequence of several steps that perform specific actions, as presented in the diagram of Figure 2. There, rock pile identification is the process of finding the draw point’s location and status (whether it is suited for loading or not). Positioning refers to orienting the LHD machine to ensure that a forward thrust will end in a collision with the rock pile. Charging is the step that considers lowering the bucket and accelerating towards the pile. Excavation is the machine control that performs the digging action. Pull back comprises the backward motion of the vehicle and bucket shake. Finally, Payload weighing estimates the amount of ore loaded. Most of the mentioned steps could fail due to the highly variable environment in underground mining. It is possible that the onboard sensors fail to find the rock pile accurately or that the machine positioning cannot avoid colliding with a tunnel wall. The collision between the machine and the rock pile might not be detected, and the LHD’s bucket could become stuck during excavation. In any of these cases, human assistance would be required to overcome the problematic situation. In fact, human interaction with automated mobile machines for mining operations is needed in the state-of-the-art systems, at the very least to supervise a fleet of machines. Since large-scale operations have a fleet of vehicles, it is common for one or more operators to supervise and assist multiple semi-autonomous machinery, as each machine does not require constant attention. For these reasons, in our view, it is imperative that this human interaction is considered at the design stage of the autonomous loading system and, thus, included in the formulation of the agent’s behavior. Figure 6 shows the proposed state machine for the autonomous loading process with the human in the loop. There are two assistance states: positioning assistance allows the operator to take control of the machine to position it in front of the rock pile, while loading assistance provides the operator with full control of the LHD to perform the remaining parts of the loading maneuver up until payload weighing, which is needed to record the performance of the task. The positioning assistance is called either when the rock pile identification cannot characterize the rock or when positioning is not able to place the LHD to start the charging procedure, while loading assistance is called when the charging, the excavation, or the pull back procedures cannot be successfully completed.

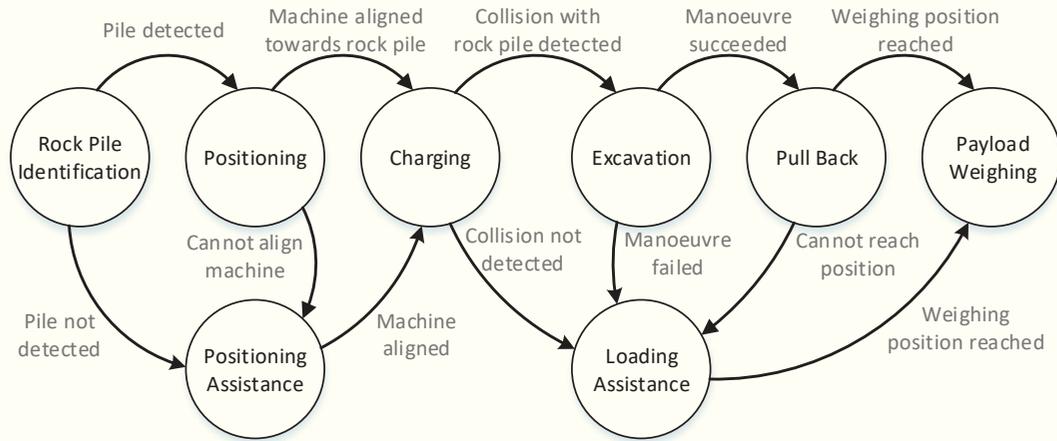


Figure 6. Finite state machine formulation for the autonomous loading with human operators in-the-loop.

3.2. Environment Modeling and Rock Pile Identification

Of the six steps of the autonomous loading routine, the first one, rock pile identification, is the one that most strongly relies on the processing of data acquired from the environment. The aim of this step is to find the location and status of the draw point accurately, in real time, and without the need of extra steps or delays. This means that the LHD is required to continue moving while scanning the pile. The characterization of the rock pile is performed through integration of consecutive laser scans from the frontal 2D LIDAR sensor mounted on the LHD. The integration of the laser scans relies on a LIDAR-based odometry method [31], and the output of the machine's inclinometer data, which is filtered and integrated in the local coordinate frame in order to benefit from the natural tilting of the LHD while moving across uneven terrain. The aforementioned odometry method consists of an adaptive frame rate modification of the range-flow based odometry (RF2O) [32]. While RF2O computes displacement by comparing two scans, using the "range flow constraint equation", the adaptive frame rate implements a control

over the processing frequency, increasing it at higher machine speeds.

A block diagram for the pile identification step is presented in Figure 7. The LIDAR odometry enables the integration of 2D laser scans into a 3D point cloud of the environment. Then, the rock pile is segmented, and its features are computed (center, limits, and slope).

A conceptual diagram of the complete pile identification process is shown in Figure 8. The succession of images (a, b, and c) illustrates how the integration is carried out. For each new scan (colored circles), the data is registered in an accumulated point cloud, using the computed odometry. It is important to note that the whole process must be executed in real time without stopping, or even slowing down, the LHD. Moreover, the fact that the LIDAR reaches the bottom of the pile from a long distance away, because it is tilted down 2.5 degrees, results in the point cloud having very low density, all of which increases the complexity of the problem.

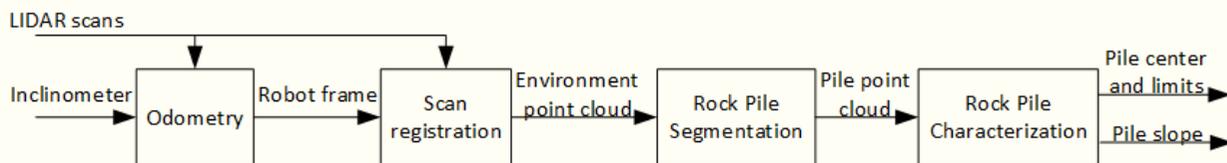


Figure 7. Rock pile identification block diagram. LIDAR odometry and machine's inclinometer data are used to register 2D laser scans into a 3D model of the environment. A segmentation of the rock pile is then carried out, and its center, limits, and slope are extracted.

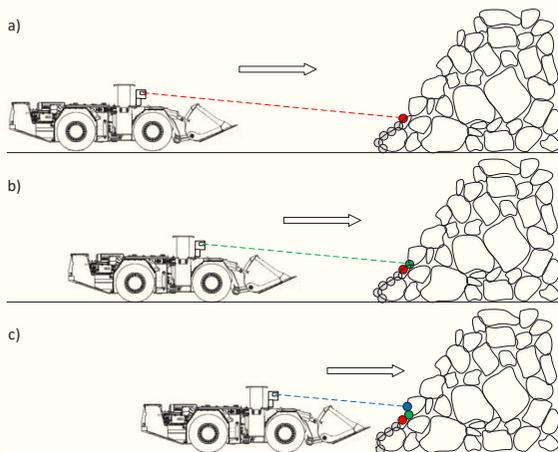


Figure 8. Rock pile reconstruction process through laser-scan integration. As the machine approaches the pile (images a–c), the new laser scans are merged with the previous ones using the computed odometry. A slightly tilted LIDAR is used for this purpose.

Once enough scans have been integrated, the rock pile is segmented using the normal vectors of the surface, a curvature filter, and neighbors count in a small radius. The normal vectors provide information about the points belonging to the walls or to the pile (normal n_y is negative on the left wall, near zero on the pile, and positive on the right wall). The curvature provides a rotation-invariant description of the points, which can be used for further segmenting the pile. Finally, neighbor counts provide information valuable for rejecting outliers (points that are isolated from all others). Once a pile is segmented successfully, its mean slope is estimated and is used to classify the status of the pile: a too shallow slope indicates there is not enough ore to perform a loading, and a too steep slope signals the presence of a tunnel wall instead of a rock pile, or even a rock pile in a “hang-up” state, a condition that can arise in certain underground mining methods, such as block caving, in which the fragmented rock stops flowing, generating an unstable and hazardous condition. The determination of the status of the pile is performed by a simple thresholding of its slope.

For clarity purposes, the described algorithm for segmenting and characterizing the pile is detailed in Figure 9.

Besides the pile status, the locations of the horizontal bounds are needed for the next step of the loading routine, the machine positioning. The left (E_L) and right (E_R) limits of the rock pile are required to be able to direct the machine without colliding with the tunnel walls. Using the information available from the pile segmentation algorithm, the limits are estimated as $E_L = \max_y$, and $E_R = \min_y$ (see definitions in Figure 9).

Start with an empty point cloud

```

while distance to  $(cx, cy, cz) > 15$  and pile point cloud has less
than 100 points do
  Read new scan
  Apply a self-filter to remove scan points that correspond to
the LHD body
  Transform the captured laser scan into the local_map refer-
ence frame
  Aggregate the points to the integrated ones
  Apply a voxel grid (with cell size 0.2 m in XY, 0.1 m in Z)
  if the resulting point cloud is not empty,
  Compute normals  $(nx, ny, nz)$  per point, using a radius 0.75
meters
  Remove points with normal values  $ny < -0.3$  or  $ny > 0.3$ 
  Remove points with curvature  $< 0.05$  or curvature  $> 0.4$ 
  Remove points which have less than 80 neighbors inside a
radius of 0.75 m
  Compute the gravity center of the pile:  $(cx, cy, cz)$ 
  Compute left/right bounds for the pile:  $\min\_y, \max\_y$ 
end if
end while

```

```

Compute the final normals  $(nx, ny, nz)$  using points within a
radius of 3 m
Compute the pile slope from the average of the normals
Set the pile characterization procedure as succeeded

```

Figure 9. Pseudo code of pile segmentation and characterization algorithm.

The normal vectors of the points provide valuable information for segmenting the pile, as shown in Figure 10. In this figure, low values of the normal component n_y are colored in blue, while high values are colored in red.

Oversized rock detection can also be performed in this identification step; however, the description of the functionality is outside the scope of this paper (see, for example, the detection system described in [33]).

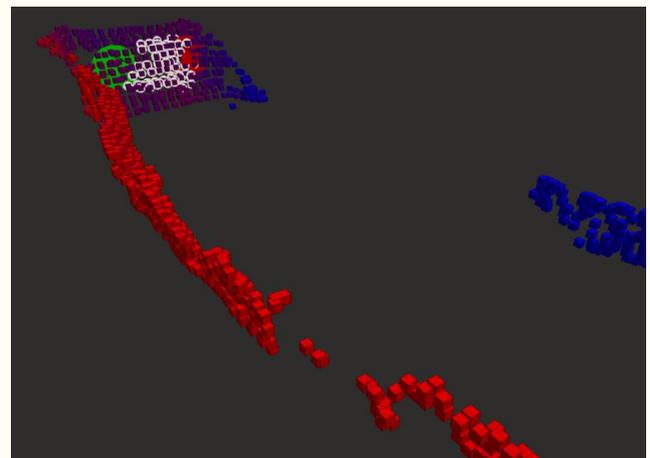


Figure 10. Point cloud showing pile reconstruction (point color corresponds to the n_y component of the normal).

If the identification of the rock pile has not finished by the time the LHD is closer than a certain predetermined distance to the pile, a transition to the positioning assistance state is forced in the behavior state machine from Figure 6. In the experiments, a threshold of 15 meters was used as the predetermined distance. This value was deemed sufficient for the LHD to successfully achieve the following positioning in front of the rock pile. The overall loading routine is, nevertheless, not sensitive to small variations of the selected parameter, and its value should be selected based on the particular conditions of the operating environment.

3.3. Positioning and Charging

After the draw point location and status have been determined, the loading routine continues with the positioning of the machine. Here, the LHD is continued to be driven forward using a “guidance” algorithm [34] until the machine’s reference point (in this case its central articulation joint) is at a set distance from the center of the pile (computed as the center of gravity of the segmented points). Once this distance is met, small corrections to the steering angle are issued to ensure that the projected path lands within the limits of the rock pile. Finally, the bucket is lowered until a tight contact with the ground is achieved. A block diagram of this process is shown in Figure 11.

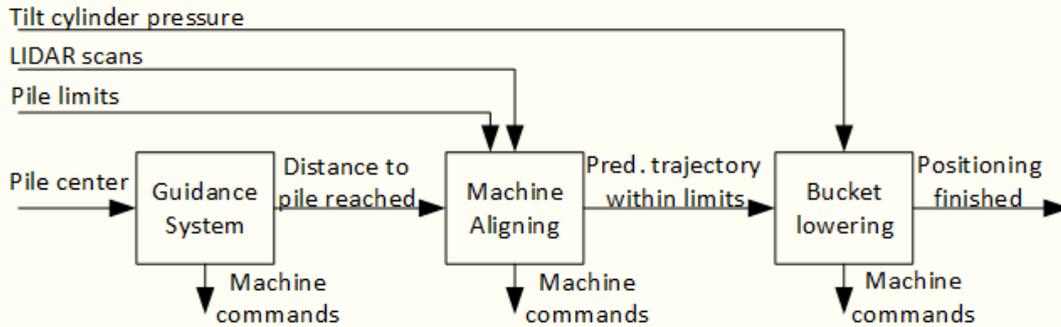


Figure 11. Positioning block diagram. The machine is driven by a guidance system until a predefined distance to the rock pile is achieved. The steering angle of the LHD is then adjusted to ensure collision with the pile, and the bucket is lowered.

The projected path for the machine aligning procedure (see Figure 12) is computed using the LHD’s kinematic equations, reported in several previous publications, such as [35]:

$$\partial[x, y, \theta]/\partial t = [v \cos(\theta), v \sin(\theta), (v \sin(\gamma) + L_r \omega)/(L_f \cos(\gamma) + L_r)] \quad (1)$$

$$\partial\gamma/\partial t = \omega \quad (2)$$

where $[x, y, \theta]$ is the pose of the LHD, v is the linear speed, γ is the steering angle of the LHD’s pivot, $\omega = \dot{\gamma}$ is the steering speed of the LHD’s pivot, L_r is the length from the LHD’s pivot to the rear wheel axis, and L_f is the length from the LHD’s pivot to the front wheel axis.

Since the next step of the autonomous loading routine, the charging against the rock pile, does not involve steering commands, a fixed steering angle (constant γ , $\omega = 0$) can be considered, which simplifies the model:

$$\partial[x, y, \theta]/\partial t = [v \cos(\theta), v \sin(\theta), v \cdot K] \quad (3)$$

where K is a constant value that depends on the LHD dimensions and the fixed steering angle. Equation (3) shows that an LHD charging against a rock pile will follow a circular trajectory, characterized by a center (C) and a curvature radius (R). Because the *rock pile identification* step

computed the left (E_L) and right (E_R) pile edges, the problem of determining if the LHD will collide with the rock pile simplifies to checking if the line between E_L and E_R intersects with both the circular path of the left and right sides of the LHD. Figure 12 shows a diagram of the described scenario.

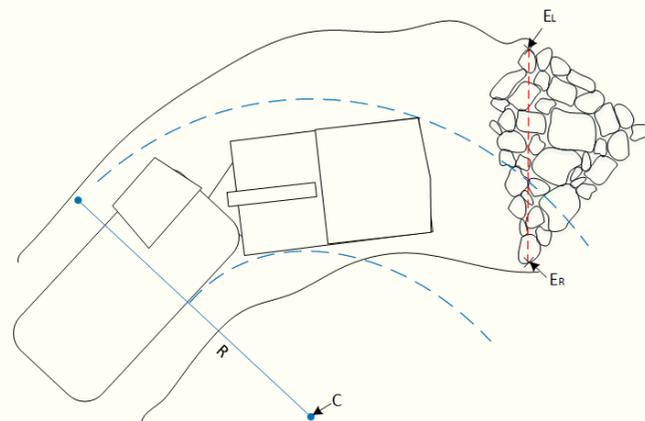


Figure 12. Intersection of the predicted trajectory with the detected pile limits. Left and right pile limit points denoted as E_L and E_R , respectively (with the face of the pile between them in a red segmented line). LHD’s left side circular trajectory center and curvature radius denoted with C and R , respectively. In a blue dotted line both sides of the predicted LHD’s trajectory is presented.

The solution for the intersection between a circle and a line segment is well known in the common literature and it involves computing the following discriminant value:

$$\Delta = (2 \vec{E} \cdot \overline{EC})^2 - 4|\vec{E}|^2 (|\overline{EC}|^2 - R^2) \quad (4)$$

where \vec{E} is the vector going from E_R to E_L and \overline{EC} is the vector going from E_R to C . If Δ results in a negative value, then the infinite line defined by the points E_R and E_L never intersects the given circular path. On the other hand, if Δ is positive, a solution exists. Let S_1 and S_2 be solutions to the intersection between the infinite line defined by E_R and E_L and the circle of center C and curvature radius R :

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{-2 \vec{E} \cdot \overline{EC} - \sqrt{\Delta}}{2|\vec{E}|} \\ S_2 &= \frac{-2 \vec{E} \cdot \overline{EC} + \sqrt{\Delta}}{2|\vec{E}|} \end{aligned} \quad (5)$$

then, if $0 < S_1 < 1$ or $0 < S_2 < 1$, the circular path intersects the segment $\overline{E_L E_R}$. Otherwise, if $\min(|S_1|, |S_2|) < \min(|S_1 - 1|, |S_2 - 1|)$, the circular path passes to the right of the segment $\overline{E_L E_R}$. If none of the previous conditions is met, then the path passes to the left of segment $\overline{E_L E_R}$.

The above process is executed for the circular paths defined by the left and right side of the LHD. If one of them does not intersect the pile, the steering angle is adjusted in the appropriate direction until both paths land within the rock pile limits. During this steering adjustment, a simple collision check is computed periodically over a bounding box for each body of the LHD. Figure 13 shows a diagram of the collision check for the front body of the LHD. A bounding box is defined for the front body. Then, vectors going from the bottom left corner to the top left corner (\vec{S}_f) and to the bottom right corner (\vec{B}_f) are defined. In order to check if point P of the detected tunnel wall is inside the bounding box (and hence causing a collision), the following condition is evaluated:

$$0 < \vec{S}_f \cdot \vec{d}_f < |\vec{S}_f|^2 \wedge 0 < \vec{B}_f \cdot \vec{d}_f < |\vec{B}_f|^2 \quad (6)$$

where \vec{d}_f is the vector going from the bottom left corner of the bounding box to point P . If the condition is true, then point P is inside the collision bounding box.

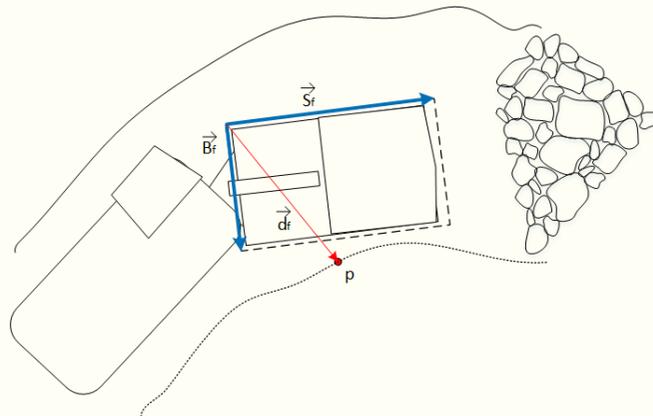


Figure 13. Simple collision check between the front body of the LHD and point P of the detected tunnel wall. Vectors S_f and B_f (in blue) of the collision bounding box are used alongside vector d_f (in red) to determine if point P is inside the bounding box.

Once the machine's steering angle has been adjusted so that its projected path lands within the rock pile limits, the bucket of the LHD is lowered using the tilt hydraulic cylinder. The tilt cylinder is commanded to extend until the pressure in its hydraulic line rises over a predefined threshold, signaling a tight contact between the bucket tip and the ground. An example from full-scale experimental data is shown in Figure 14, where a threshold of 23 bars was selected.

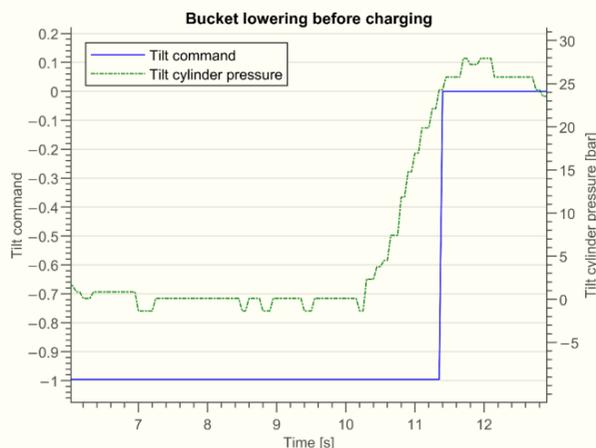


Figure 14. Cylinder pressure increase as the bucket is tightly pressed against the ground in preparation for the charging maneuver.

If the above positioning process is not completed within a predefined time limit (in the experiments, a threshold of 30 s was used), an operator assistance request is generated, effectively putting the system in the positioning assistance state from Figure 6. Otherwise, once the vehicle is in position and with the bucket down, it is commanded to drive forward in first gear. The transition to the excavation phase occurs as the collision with the rock pile is detected by a patented method that analyzes the machine's transmission pressure (engine load) and a skidding factor, esti-

mated from the LIDAR odometry and the machine's tachometer data [18]. A block diagram is shown in Figure 15.

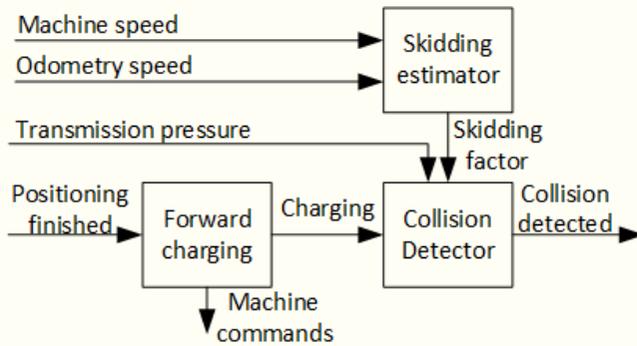


Figure 15. Charging block diagram. The machine is driven forward while a collision detection routine analyzes the machine's transmission pressure and an estimated skidding factor.

The skidding estimator from Figure 15 computes the skidding factor with the following formula:

$$skid = (v_T - v_L)/v_{Mm} \quad (7)$$

where $skid$ is the skidding factor; v_T is the speed measured from the machine's tachometer; v_L is the speed estimated with the LIDAR-based odometry method mentioned in Section 3.2., and v_{Mm} is a normalizing factor, computed as the maximum between v_T and v_L in a fixed time window.

Simultaneously, the collision detector module monitors the pressure of the hydrostatic transmission system (for the used LF11H LHD, this variable correlates with the engine's power output). If either the skidding factor or the transmission pressure rises above a predefined threshold, a collision detection event is flagged. Figure 16 shows a plot of the skid factor and the transmission pressure signals, alongside the tilt command, for a teleoperated loading maneuver. The collision with the rock pile happens just before the human operator activates the tilt command. As mentioned above, a significant rise in the transmission pressure, and of the skidding factor, can be seen at that point. Extensive analysis of experimental data, such as shown in Figure 16, led to transmission pressure threshold to be set at 300 bar, and the skidding factor threshold at 0.5.

If a collision detection is not generated within a predefined time limit (in the experiments, a threshold of 10 s was used), an operator assistance request is issued, forcing the system into loading assistance state from Figure 6.

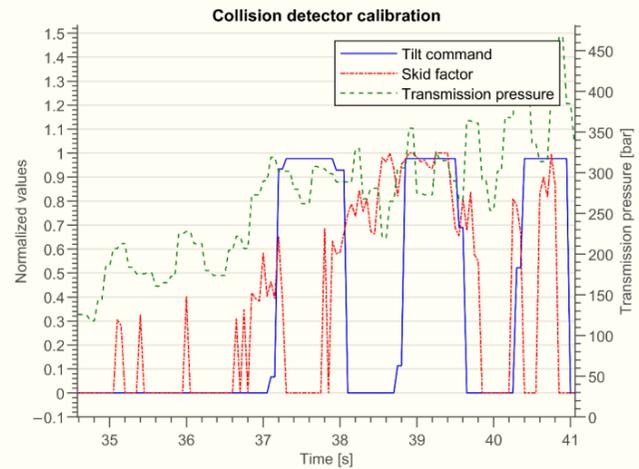


Figure 16. Detection of the collision with the rock pile. Through analysis of the manual operation data, the transmission pressure signal and the estimated skidding factor were selected and used in a threshold detector.

3.4. Excavation Algorithm

The excavation algorithm is based on the techniques used by experienced human operators from block caving, panel caving and sublevel stoping operations (which are the most common type of underground operations in Chile). From a control theory point of view, the proposed method acts as a traction controller during the excavation process.

A diagram is shown in Figure 17. The pregenerated commands is simply a module in charge of generating precomputed commands for the pedal and tilt signals. These commands are similar to the commands observed during manual operation. Specifically, the acceleration pedal is maintained at a constant output value and the bucket tilt is intermittently activated in the form of a ramp function. A ramp function was only selected in order to have an extra parameter, although a parameter sensibility analysis could not be performed in the full-scale experiments due to time constrains. The traction controller acts on the lift command in order to suppress wheel skidding, a variable that is estimated from Equation (7), as explained in Section 3.3. In practice, a simple "on/off" controller was implemented, where the lift command was set at the maximum value if the estimated skidding factor raised over a predefined threshold. This choice was made to keep the methods simple in favor of achieving a validation of the complete system.

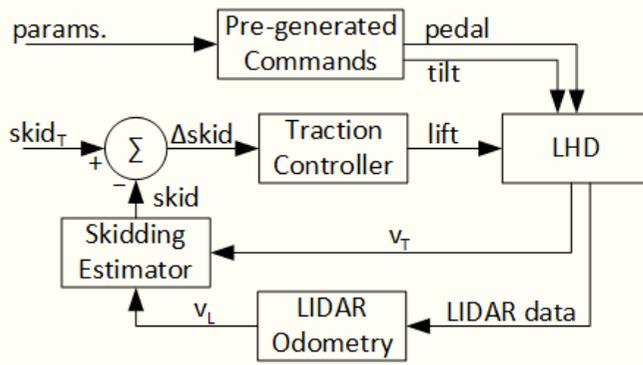


Figure 17. Control diagram of the excavation method. Tilt and pedal commands are predetermined from the human operator control method. The lift command is adjusted depending on the detected machine skidding, which is in turn estimated from the LIDAR odometry and machine tachometer data.

The implementation of the excavation method was carried out using a two-state machine. In the first state, called S_{tilt} , a fixed acceleration and a ramp-shaped bucket tilt command are selected. In the second state, called S_{push} , the fixed acceleration command persists, and wheel skidding is analyzed. If the wheel-skidding factor rises above a predefined threshold, the boom lift command of the machine is activated in order to compensate for it. A machine-specific option, named “full RPM”, is also activated during this state. This option forces the engine to maximize its power output, providing additional penetration force. Formally, the following equations apply for the machine commands:

$$\begin{aligned}
 pedal &= P_0 \\
 tilt &= \begin{cases} R_0(t - t_{tilt}) & S_{tilt} \wedge b(t - t_{tilt}) \leq 1 \\ 1 & S_{tilt} \wedge b(t - t_{tilt}) > 1 \\ 0 & S_{push} \end{cases} \\
 lift &= \begin{cases} 0 & S_{tilt} \vee skid < sk_{max} \\ 1 & S_{push} \wedge skid \geq sk_{max} \end{cases} \\
 fullRpm &= \begin{cases} 0 & S_{tilt} \\ 1 & S_{push} \end{cases}
 \end{aligned} \quad (8)$$

where P_0 , R_0 , and sk_{max} are predefined constant values; t_{tilt} is the start time of state S_{tilt} , and $skid$ is the skidding factor. As for the output commands, $pedal$ is the signal sent to the machine’s internal control unit that reg-

ulates acceleration (similar to the signal sent when pressing the physical pedal in the machine’s cabin), $tilt$ is the signal sent to retract (positive values) or extend (negative values) the cylinder that controls the movement of the bucket of the LHD machine, and $lift$ is the signal that commands the “boom” cylinder of the machine, that is, the arm that can lift (positive values) or lower (negative values) the bucket. Finally, the $fullRpm$ signal is, as mentioned, a machine-specific command that forces the engine’s RPM to the maximum, temporarily increasing the force of the hydraulic mechanism. It should be noted that analysis and correction of wheel skidding is only performed during the S_{push} state. This decision was made based on the empirical observation that wheel skidding is much less likely to occur during bucket retraction and the fact that activating the lift cylinder effectively reduces the power available for the tilt hydraulics. In Figure 18, a flow chart of the excavation process is presented, where EP represents engine power (a variable observed, in this case, through the transmission pressure of the machine).

Both states, S_{tilt} (tilt state) and S_{push} (push state), have upper and lower bounds to their execution time, so it is guaranteed that their execution alternates during the excavation. Besides the time limit of S_{push} , the system can transition back to S_{tilt} if the hydrostatic transmission pressure (or, more generally, the engine power output) climbs over a threshold value, meaning that the resistive force from the rock pile is too large, and the bucket is not able to penetrate further without a scooping motion. This alternation between states continues until any of the following stop criteria are met: the bucket is fully retracted, the bucket is lifted over a maximum angle, or the machine has advanced further than a maximum displacement value. This method was patented as reported in [36]. For clarity purposes, a pseudo code of the described algorithm is shown in Figure 19.

Table 1 shows the value of the parameters used for the full-scale validation experiments reported in Section 4. The numerical values were selected based on operation data.

In the case that the described excavation process is not completed within a predefined time limit (in the experiments, a threshold of 30 s was used), an operator assistance request is generated, thus putting the system in the loading assistance state from Figure 6.

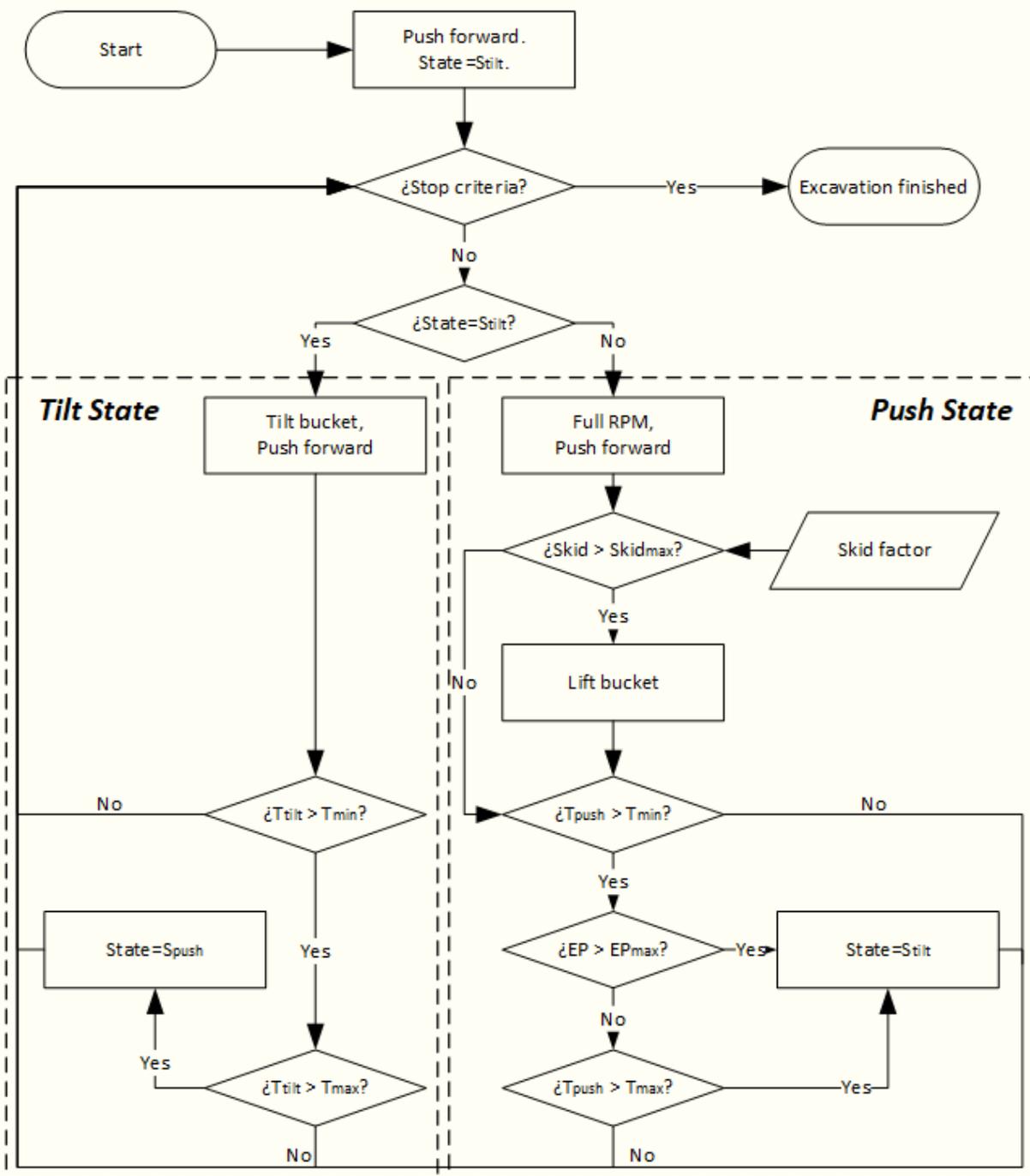


Figure 18. Flow chart of the excavation algorithm.

```

Require: initial state  $S = S_{tilt}$ , acceleration pedal value  $P_0$ , max. lift value  $\beta_{max}$ , max. tilt value  $\alpha_{max}$ , max. displacement value  $d_{max}$ , max. duration  $\Delta t_{max}$ , min. duration  $\Delta t_{min}$ , max. skidding value  $Skid_{max}$ , max. engine power  $EP_{max}$ 

read: start time  $t_s$ , lift angle  $\beta$ , tilt angle  $\alpha$ , odometry  $odo$ , engine power  $EP$ 

while  $\beta < \beta_{max}$  and  $\alpha < \alpha_{max}$  and  $odo < d_{max}$  do
read: current time  $t$ , skidding factor  $skid$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $odo$ ,  $EP$ 
 $\Delta t \leftarrow t - t_s$ 

if  $S = S_{tilt}$  do
 $pedal \leftarrow P_0$ ,  $lift \leftarrow 0$ ,  $tilt \leftarrow ramp(\Delta t)$ ,  $fullRpm \leftarrow 0$ 
if  $\Delta t > \Delta t_{max}$  do
read:  $t_s$ 
 $S \leftarrow S_{push}$ 
end if
end if
if  $S = S_{push}$  do
 $pedal \leftarrow P_0$ ,  $tilt \leftarrow 0$ ,  $fullRpm \leftarrow 1$ 
if  $skid > skid_{max}$  do
 $lift \leftarrow 1$ 
else do
 $lift \leftarrow 0$ 
end if
end if
if  $EP > EP_{max}$  and  $\Delta t > \Delta t_{min}$  or  $\Delta t > \Delta t_{max}$  do
read:  $t_s$ 
 $S \leftarrow S_{tilt}$ 
end if
end if
end while

```

Figure 19. Pseudo code of the excavation algorithm.

Table 1. Excavation method parameters used for the full-scale validation.

Parameter	Value
P_0	0.5
R_0	1.2
$skid_{max}$	0.2
β_{max}	0.5 [rad]
α_{max}	0.0 [rad]
d_{max}	2.0 [m]
Δt_{max}	1.0 [s]
Δt_{min}	0.5 [s]
EP_{max}	300 [bar]

3.5. Pull Back and Payload Weighing

Once the excavation is finished, the bucket gets fully retracted and the vehicle is driven backwards, using the same “guidance” navigation module from the positioning step. A predefined time limit is assigned to this step (in the experiments, 60 s were used). If a timeout occurs, the system is put in the loading assistance state from Figure 6.

After a predefined distance has been covered within the aforementioned time limit, the bucket is commanded to perform short downward and upward tilting movements, known as the “bucket shake”. Then, the bucket is lifted up to a fixed angle (β_{weigh}), and the pressure sensors in the boom hydraulic line are used to estimate the bucket fill factor. A fill factor is used instead of the mass weight,

since it simplifies calibration, while providing the same information for the evaluation process. The relationship between the lift cylinder pressure (P) and the fill factor was found experimentally and corresponds to the following affine model:

$$f_{fill} = mP - n \quad (9)$$

where f_{fill} is the relative fill factor (0 for an empty bucket and 1 for a full bucket), and m and n are the constants to be calibrated through experimentation. Table 2 shows the parameters used for the particular conditions of the field trials presented in this work (machine and rock characteristics).

Table 2. Weight model parameters used for the full-scale validation.

Parameter	Value
β_{weigh}	0.2
m	0.0207
n	1.0774

4. Experiments and Analysis

Full-scale experiments with a GHH LF11H model LHD (see picture in Figure 1) were carried out in a production tunnel of a sublevel stopping mine located in the Coquimbo Region (Chile), facilitated by the Chilean mining company, CMSG. Pictures of the mine site and the LHD inside its tunnel are shown in Figure 20. Figure 20a shows the mechanical workshop just outside the mine's main entrance, and Figure 20b shows the LHD during surface tests. Figure 20c shows the LHD outside the test tunnel with an almost fully loaded bucket.

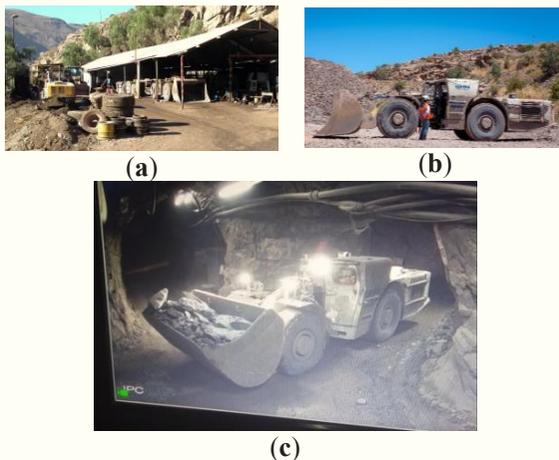


Figure 20. LHD machine and mining facility. (a) Mechanical workshop just outside the mine's main entrance; (b) LHD during surface

tests; (c) LHD outside the test tunnel with an almost fully loaded bucket.

Figure 21 shows the layout of the tunnel where experiments were carried out. The LHD traveled from the "start-end point" shown in the figure to the end of the red line, where the stope was originally located. A stope is a large open underground space that is produced by the sublevel stopping mining method. The LHDs load ore inside the stope from a large pile of material, also sometimes referred to as the loading point or draw point. Once the LHD has a fully loaded bucket, it has to travel back to the "start-end point" to dump the ore.

The experiments reported here were carried out in a fully functional tunnel of the mine, i.e., a tunnel used for extracting mineral. In fact, the experiments took place during day hours, while the mine's night shift used the LHD in manual mode for production. As a result of this, the shape and location of the stope and the draw point changed every day (as the ore runs out, the inner wall of the stope is blasted as part of the mining process).

Because of this, and since in situ experimentation was time-limited, experiments were separated in two parts. First, the field trial experiments regarding charging and collision detection of the LHD and the pile, and the LHD's excavation and payload weighing, are reported in Section 4.1. Then, pile identification experiments from an offline processing of the collected field data are presented in Section 4.2.

The mining tunnel was narrower than recommended by the LHD manufacturer, so the LHD's positioning was more complex than initially expected. This also contributed to dividing the experiments into the two groups described above. Figure 22 shows a picture of the draw point as seen from the teleoperation system cameras.

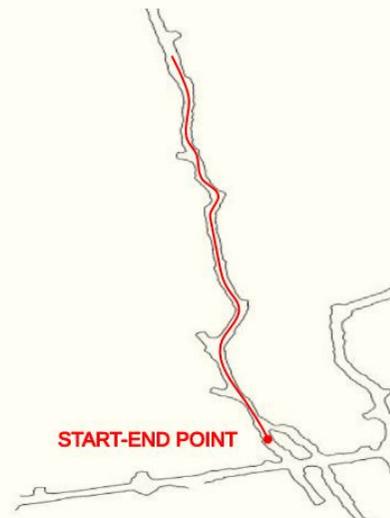


Figure 21. Layout of the mine's tunnel where experiments were carried out.



Figure 22. Operator's point of view of the loading point used for onsite experiments.

4.1. Full-Scale Rock Excavation Experiments

Since the pile identification method was not fully optimized at the time of the onsite tests, and time for executing the experiments in the mine was limited, the development team divided the loading procedure in two stages in order to maximize the total number of full-scale rock excavation experiments and evaluate each stage separately. One stage included rock pile identification and positioning, and the other included the charging, excavation, pull back, and weighting processes. To perform this, loading experiments required a human operator to position the machine five to ten meters in front of the draw point, effectively bypassing the rock pile identification and positioning stages, and starting the system's state machine in "positioning assistance", as described in Section 3.

A total of 30 complete loading experiments were carried out. Similar to in manual operation, multiple loading attempts were required in order to fill the bucket during each experiment. Manual operation of LHD in sublevel stope mines usually needs two or three attempts to achieve a proper bucket fill factor, since the procedure is performed using line-of-sight radio control with limited visibility behind the LHD (safety regulations forbid operators to enter the stope area). In some attempts, the tip of the bucket was lowered too much, causing high resistive forces from the ground during charging, and thus triggering the collision detection too early. A total of 81 loading attempts were performed in order to fulfill the 30 complete loads. Of these, 7 failed (early collision trigger) and 74 were successful, resulting in the 91% success rate of the charging and collision detection method.

For each experiment, a fixed value of 0.5 was used for the pedal command. An operator monitoring the system's behavior during the complete loading process from a remote-control station decided when the bucket was full enough, and hence if a new attempt was needed. The operator relied only on the visual input of the machine's forward camera to make this decision.

Figure 23 shows an example of the relevant variables in an autonomous loading attempt, which has some resemblance to the operator-controlled loading shown in Figure 5.

Table 3 shows the number of experiments carried out, classified by the number of attempts to achieve a full bucket, and the average fill factor for each category. It can be seen that most experiments required three loading attempts, and that the operator continued to reattempt loading until the fill factor was about 90%. This can be seen more easily on Table 4, where the average fill factor and average number of attempts for all experiments are shown. It must be noted that while the fill factor at the end of each experiment met the criteria for manual operation (since it was the same operator deciding when the bucket was full), the average number of attempts was found to be higher than that in manual operation, which, according to manual operators was between two and three attempts.

Table 5 and Figures 24 and 25 show more detail about progressive filling of the bucket through loading attempts for the 30 loading experiments. Table 5 shows the average durations of the excavation step and the resulting fill factor, classified according to the progressive sequence of attempts, as well as the total number of experiments in each case. On average, the first attempt managed to fill 62% of the bucket capacity; then, the second attempt achieved 77%; the third attempt achieved 82%; and for the six experiments that needed a fourth attempt, the average that resulted was a 90% fill factor. The average excavation duration was about 10–12 s, which comprised the time between the collision of the LHD with the rock pile and the end of the excavation algorithm. The required time for positioning, charging, and weighting was not taken into account in this measurement. It can be seen that the average duration of the excavation in the first attempt is slightly longer than the others.

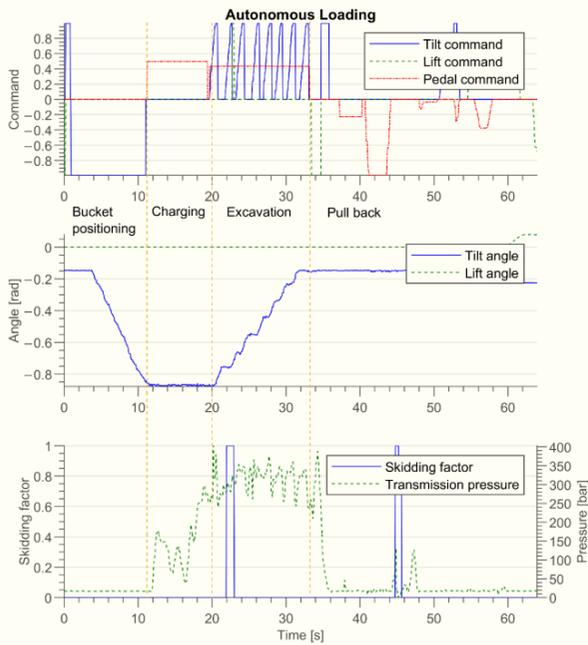


Figure 23. Relevant variables in an autonomous loading attempt.

Table 3. Loading experiments and average fill factor per number of loading attempts. N-Attempts: number of attempts required to fill bucket. N-Exp: number of experiments. Total-Attempts: total number of performed attempts. %-Experiments: % of the experiments. Fill-Factor: average fill factor.

N-Attempts	N-Exp	Total Attempts	%-Experiments	Fill-Factor
1 attempt	9	9	30%	88%
2 attempts	4	8	13%	107%
3 attempts	11	33	37%	87%
4 attempts	6	24	20%	90%
TOTAL	30	74	100%	-

Table 4. Total average number of attempts and fill factor.

Total Average Number of Attempts	Total Average Fill Factor
3.6	90%

Table 5. Duration and fill factor in consecutive attempts. P-Attempts: progressive sequence of attempts. N-Exp: number of experiments. Duration: average duration. Fill-Factor: average fill factor.

P-Attempts	N-Exp	Percentage	Duration	Fill-Factor
1st attempt	30	100%	12.7 s	62%
2nd attempt	21	70%	10.2 s	77%
3rd attempt	17	57%	10.8 s	82%
4th attempt	6	20%	10.7 s	90%

Figure 24 shows a box plot of the excavation step duration for all loading attempts. The time taken for the excavation ranges from 6 to almost 20 s, depending on the conditions of the rock pile and the specific interaction between the bucket and the rock pile. Figure 25 shows a box plot of the fill factor that was obtained progressively through loading attempts. It can be seen that the biggest jump in performance happened in the second loading attempt. Some outliers with performance above 100% are also depicted for the second and third attempts and appear as a consequence of loading a large boulder.

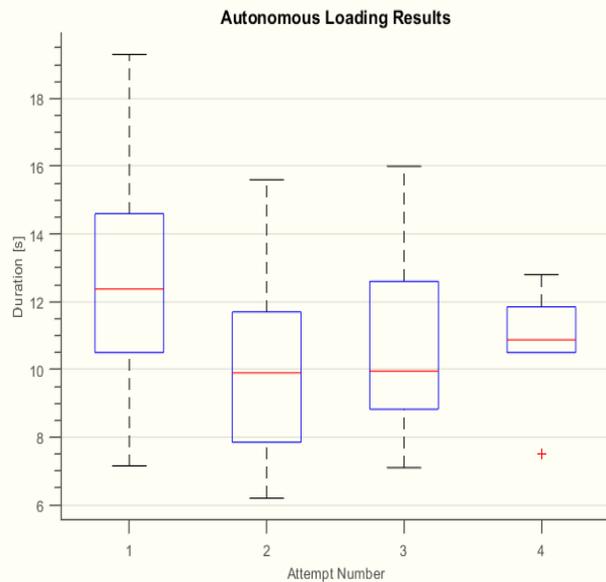


Figure 24. Excavation step duration per loading attempt. Red “+” signs represent outliers.

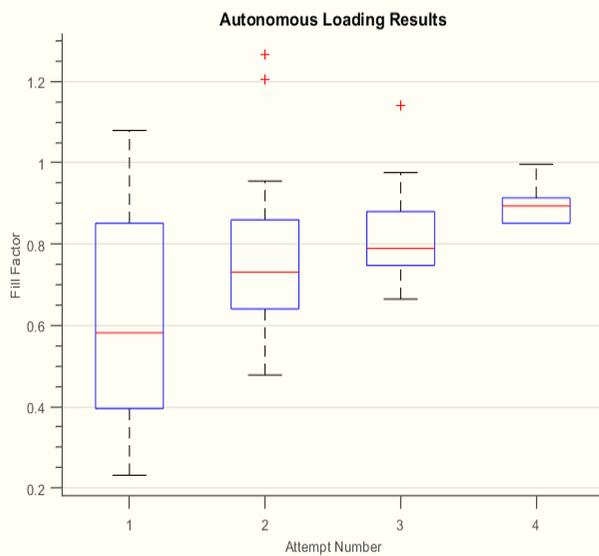


Figure 25. Progressive fill factor across loading attempts. Red “+” signs represent outliers.

During experimentation, the value of accurately placing the bucket of the machine against the ground, prior to the charging against the rock pile, was recognized. A bucket tilted too far down would cause an early trigger of a collision detection, while a bucket tilted just slightly upwards has a relevant impact on how far the machine can penetrate into the rock pile. An even more relevant factor that affects the performance of the loading maneuver is the status of the rock pile. Newly blasted ore is far easier to load than draw points that have had more time to settle and compress due to the weight of the rock. Draw points with large amounts of ore are also easier to load than those that have little material left. Despite these relevant factors, the proposed method was able to extract full buckets each time, at the expense of the operator having to perform more than the usual number of reattempts required under manual operation.

It is important to note that in a real mining operation, the efficiency of an LHD is measured in the amount of ore that it is able to haul from the extraction point to the dumping point (usually in tons/hour). Therefore, the percentage of bucket filling is not the only relevant factor when evaluating the system, but also the amount of time it uses to load the bucket. This is especially important when deciding if the system should make another attempt at the excavation procedure to achieve a fuller bucket. This criterion varies among different operations, as the dumping and haulage time is different.

4.2. Offline Results Using Field Data: 2.5D Modeling of the Extraction Point

Personnel cannot be inside a stope as it is forbidden for security reasons (i.e., rock can fall from the ceiling of the stope), so it was not possible to obtain accurate measurements of the ore pile characteristics. However, an accurate modeling of the ore pile is not really necessary, as it only needs to be detected, as well as having its width and inclination roughly estimated in order for the excavation algorithm to work.

To obtain the datasets required to characterize our 2.5D modeling algorithm, the LHD was driven from a fixed distance of about 50 meters from the loading point to the entrance of the stope, while all sensor and machine data was recorded. These datasets were captured at different times so the drawing point was not located in the same place, nor did the ore pile have the same shape. First, in each case the point cloud was computed and then the pile’s width and inclination estimated. Figure 26 shows an example of the point cloud obtained while the LHD is approaching an extraction point, after registering the position of the points using the LIDAR-based odometry and the inclinometer data (see details in Section 3.2). The color of the points represents the distance to the LHD (in the x-axis) at the time of registration. In the case of the rock pile at the end of the tunnel, red indicates that the machine was further away when that reading was taken.

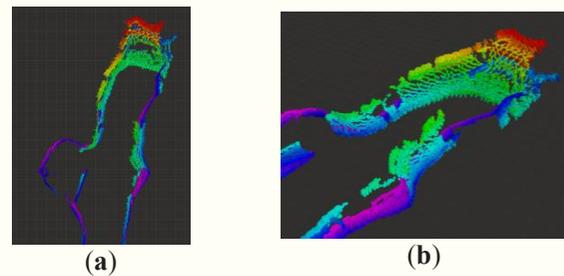


Figure 26. Example of the scanning obtained while the LHD is approaching an extraction point. (a) Top view of the pile reconstruction. (b) Isometric view of the pile reconstruction.

The results of several modeling attempts where the pile’s width and inclination were estimated are summarized in Table 6. They consider ground truth width, predicted width, ground truth inclination, and predicted inclination. Both ground truth width and ground truth inclination were determined manually from the integrated point clouds. The average absolute error in the predicted width is 0.58 meters, while the average absolute error in the inclination is 1.7 degrees. The precision achieved by the characterization procedure is sufficient for the task of autonomous loading.

Table 6. Results of modeling extraction points.

Modeling Attempt	Ground Truth Width (m)	Predicted Width (m)	Ground Truth Inclination (°)	Predicted Inclination (°)
1	3.25	2.89	-53.0	-52.6
2	3.10	5.27	-50.1	-48.7
3	3.10	3.16	-52.4	-50.5
4	3.44	3.29	-50.6	-50.5
5	3.20	3.72	-50.0	-53.4
6	3.03	3.25	-49.5	-46.5

5. Conclusions

A complete autonomous loading system for LHD machines for underground mining was presented. The loading system considers identification of the rock pile, positioning of the machine in front of it, charging against the rock pile, excavating, moving away from the draw point, and estimating the bucket weight or fill factor. Despite that the proposed system was fully implemented (including the necessity for a human operator to be involved in the process in order to complete the task when the system fails), it could not be tested as a whole. The proposed system which implements the whole loading process, the excavation algorithm, and the tests in a real production environment are the most important contributions of this work.

The experimentation phase was divided between onsite execution and validation of the excavation algorithm, and offline data processing for the rock pile identification method. In the onsite experiments, identification and positioning were bypassed in favor of teleoperation by a human operator. It was also the operator's choice whether or not to perform multiple loading attempts in order to fill the bucket. A total number of 30 excavation experiments were carried out, most of them requiring multiple attempts to achieve a full bucket. An average of 3.6 attempts per experiment was needed in order to obtain a bucket fill factor of 90%. By comparison, manual operation usually needs two or three attempts to achieve this bucket fill factor. This performance may seem inferior to previous published work; however, there are other factors involved that prevent direct comparison of the results. Equipment, type of ore, and mining method should be considered. Thus, comparison to the human operators of the specific mining site should be preferred. It is important to mention that the main driver for automating the loading process is to increase the safety of workers rather than obtain higher efficiency. In this regard, the proposed excavation algorithm fulfills our expectations.

Since these experiments are time-consuming in an industry where time is an expensive resource, only enough experiments needed to validate the excavation algorithm were able to be executed. Part of our future work will be to carry out new experiments in an underground mine in order to validate the complete autonomous loading system, and to measure its performance more accurately. Despite this, the problem remains relevant and mining

companies are looking forward to integrating autonomous loading to LHDs in their operations, as it would enable them to close the loop for a fully autonomous production cycle.

A video showing the operator's graphic interface while the system is autonomously performing an excavation procedure can be found in <https://youtu.be/Oa11kTBJf2Y> (accessed on September 7th, 2021).

The system is now being installed and tested in a room and pillar mine in Germany, where it will be tested as a whole system.

Funding: This research was funded by the Chilean National Research Agency ANID under project grant Basal AFB180004 and FONDECYT 1201170.

Acknowledgments: We thank Paul Vallejos for the valuable discussions and support for onsite execution of the experiments; we thank David Leottau for his valuable work in the early implementations of the 2.5D modeling of the ore pile. We also thank Patricio Loncomilla and Martin Calvo for their valuable work enhancing the 2.5D modeling algorithm and its associated results. We also acknowledge Compañía Minera San Gerónimo for providing the mine infrastructure for testing the system, and GHH Chile for supplying the LHD machine needed for this work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Salvador, C.; Mascaró, M.; Ruiz del Solar, J. *Automation of Unit and Auxiliary Operations in Block/Panel Caving: Challenges and Opportunities*; Massmin: Santiago, Chile, 2020.
- Scheding, S.; Nebot, E.M.; Stevens, M.; Durrant-Whyte, H.; Roberts, J.; Corke, P.; Cunningham, J.; Cook, B. Experiments in Autonomous Underground Guidance. In Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, 25–25 April 1997; pp. 1898–1903.
- Cunningham, J.; Roberts, J.M.; Corke, P.; Durrant-Whyte, H. Automation of Underground LHD and Truck Haulage. In Proceedings of the AusIMM Annual Conference—“The Mining Cycle” (AUSIMM 1998), Mount Isa, Australia, 19–23 April 1998.
- Mäkelä, H. Overview of LHD Navigation without Artificial Beacons. *Robot. Auton. Syst.* **2001**, *36*, 21–35.
- Duff, E.S.; Roberts, J.M.; Corke, P.I. Automation of an underground mining vehicle using reactive navigation and opportunistic localization. In Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, USA, 27–31 October 2003; Volume 3, pp. 3775–3780.

6. Larsson, J. Reactive Navigation of an Autonomous Vehicle in Underground Mines. Ph.D. Thesis, Örebro University, Örebro, Sweden, 2007.
7. Hemami, A. Modelling, analysis and preliminary studies for automatic scooping/loading in a mechanical loader, *International Journal of Surface Mining. Reclam. Environ.* **1992**, *6*, 151–159.
8. Hemami, A. Study of bucket trajectory in automatic scooping with load-haul-dump loaders. *Trans. Inst. Min. Metall.* **1993**, *102*, 37–42.
9. Ji, Q.; Sanford, R.L. Autonomous excavation of fragmented rock using machine vision. In *Emerging Computer Techniques for the Minerals Industry*; Society for Mining Metallurgy: Englewood, CO, USA, 1993; pp. 221–228.
10. Hemami, A. Study of forces in the scooping operation of a mechanical loader. *Trans. CSME (Can. Soc. Mech. Eng.)* **1994**, *18*, 191–205.
11. Petty, M.K.; Billingsley, J.; Tran-Cong, T. Autonomous LHD loading. In Proceedings of the Fourth Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Toowoomba, QLD, Australia, 23–25 September 1997.
12. Takahashi, H.; Hasegawa, M.; Nakano, E. Analysis on the resistive forces acting on the bucket of a load-haul-dump machine and a wheel loader in the scooping task. *Adv. Robot.* **1999**, *13*, 97–114.
13. Marshall, J.A.; Murphy, P.F.; Daneshmend, L.K. (). Toward autonomous excavation of fragmented rock: full-scale experiments. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* **2008**, *5*, 562–566.
14. Hemami, A.; Hassani, F. An overview of autonomous loading of bulk material. In Proceedings of the 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Austin, TX, USA, 24–27 June 2009.
15. Dobson, A.; Marshall, J.; Larsson, J. Admittance control for robotic loading: Design and experiments with a 1-tonne loader and a 14-tonne load-haul-dump machine. *J. Field Robot.* **2017**, *34*, 123–150.
16. Heshan, F.; Marshall, J.A.; Almqvist, H.; Larsson, J. Towards Controlling Bucket Fill Factor in Robotic Excavation by Learning Admittance Control Setpoints. In *Field and Service Robotics*; Springer: Cham, Switzerland, 2018.
17. Heshan, F.; Marshall, J.A.; Larsson, J. Iterative learning-based admittance control for autonomous excavation. *J. Intell. Robot. Syst.* **2019**, *96*, 493–500.
18. Ruiz del Solar, J.; Vallejos, P.; Tampier, C.; Leottau, D. Un Método de Estimación de Derrape y Detección de Colisión con una Pila de Mineral. Chilean Patent 201803481 (application granted on July 8th, 2020).
19. Erikson, J.M.; Mueggenburg, N.W.; Jaeger, H.M.; Nagel, S.R. Force distributions in three-dimensional compressible granular packs. *Phys. Rev. E* **2002**, *66*, 040301.
20. Herminghaus, S. Dynamics of wet granular matter. *Adv. Phys.* **2005**, *54*, 221–261.
21. Mikhirev, P.A. Design of automated loading buckets. *Sov. Min.* **1986**, *22*, 292–298.
22. Shi, X.; Lever, P.; Wang, F. Experimental robotic excavation with fuzzy logic and neural networks. In Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, USA, 22–28 April 1996; Volume 1, pp. 957–962.
23. Dobson, A.; Marshall, J. Autonomous Loading Vehicle Controller. WO Patent 2015/109392, 30 July 2015.
24. Rocke, D.J. Control System for Automatically Controlling a Work Implement of an Earth Working Machine to Capture Material. U.S. Patent Application No. 5,528,843 (application granted on June 25th, 1996).
25. Alshaer, B.J.; Ingram, R.G.; Krone, J.J.; Berry, J.K.; Harris, J.J. Automatic Digging and Loading System for a Work Machine. U.S. Patent Application No. 7,555,855, 2009.
26. Fletcher, J.G.; Jones, D.A.; Hewavisenthi, R.D.; Chow, R.K. Excavation System Having Adaptive Dig Control. U.S. Patent Application No. 09,587,369, 2017.
27. Asenjo, R.; Boulard, A.; Mascaró, M.; Tampier, C.; Ruiz del Solar, J. Autonomous Loading for an LHD. In Proceedings of the Automining 2016, Antofagasta, Chile, 30 November–2 December 2016.
28. Quigley, M.; Conley, K.; Gerkey, B.; Faust, J.; Foote, T.; Leibs, J.; Wheeler, R.; Ng, A. ROS: An Open-Source Robot Operating System; ICRA Workshop on Open Source Software. 2009. <http://www.cim.mcgill.ca/~dudek/417/Papers/quigley-icra2009-ros.pdf> (accessed on September 7th 2021).
29. Röfer, T. CABS—C-based Agent Behavior Specification Language. In *RoboCup 2017: Robot World Cup XXI*; Springer: Cham, Switzerland, 2017; pp. 135–142.
30. Koenig, N.; Howard, A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Sendai, Japan, 28 September–2 October 2004; Volume 3, pp. 2149–2154.
31. Leottau, D.; Loncomilla, P.; Mascaró, M.; Tampier, C.; Ruiz del Solar, J. LIDAR-based odometry estimation for autonomous loading of material with LHD. In Proceedings of the Massmin 2020, Santiago, Chile, 9–11 December 2020.
32. Jaimez, M.; Monroy, G.; Gonzalez, J. Planar Odometry from a Radial Laser Scanner. A Range Flow-based Approach. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, 16–21 May 2016.
33. Lobos, K.; Loncomilla, P.; Ruiz-del-solar, J. Rocky-YOLO: Detección de rocas usando deep learning para aplicaciones en minería. In Proceedings of the SIMIN 2019, Santiago, Chile, 21–23 August 2019. (In Spanish)
34. Mascaró, M.; Tampier, C.; Ruiz del Solar, J. Topological Navigation in Tunnels: LHD Navigation as a Case Study. In Proceedings of the Automining 2020, Santiago, Chile, 30 November–4 December 2020.
35. Marshall, J.; Barfoot, T.; Larsson, J. Autonomous underground tramping for center-articulated vehicles. *J. Field Robot.* **2008**, *25*, 400–421.
36. Ruiz del Solar, J.; Vallejos, P.; Tampier, C. Método de Carguío Autónomo para Cargadores Frontales. Chilean Patent 201803004 (application granted on December 26th, 2019).

ESTUDIO DE LA BRECHA Y RIESGO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO TINGUIRIRICA Y SU PROYECCION EN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Eduardo Muñoz-Castro¹ y Ximena Vargas²

RESUMEN

Las condiciones hidroclimáticas determinan, en diferentes niveles, el desarrollo económico, social, político y cultural de un territorio. En este sentido, prever cambios futuros en dichas condiciones resulta clave para asegurar la resiliencia del sistema social. La cuenca del río Tinguiririca, al igual que Chile Central, ha sufrido diferentes eventos de crecidas y sequías que han puesto en jaque la seguridad del territorio. En este Estudio se define como zona de estudio la cuenca del río Tinguiririca, que abastece de agua al valle de Colchagua, para analizar la brecha y riesgo hídrico en un contexto de clima cambiante en diferentes subcuencas, en relación a la demanda de agua catastrada a la fecha y en escenarios sintéticos de demanda hídrica. Para ello se utilizan los resultados derivados del proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional, según el cual se obtienen simulaciones hidroclimáticas en el periodo histórico 1985-2015 y proyecciones futuras para el periodo 2030-2060, según un escenario de emisiones RCP 8,5 y cuatro modelos de circulación general. Los resultados muestran que, para el periodo 2030-2060 habría un aumento en la temperatura media anual en torno a los 1 a 2°C respecto al periodo 1985-2015, mientras que la precipitación anual y el caudal medio anual disminuirían entre un 30 y 50%. Asimismo, los índices de sequía muestran una tendencia hacia periodos más secos tanto en términos meteorológicos (i.e., precipitaciones) como hidrológicos (i.e., escorrentía media anual y humedad de suelo). Respecto a la demanda hídrica, los resultados obtenidos muestran que, de no existir una gestión oportuna, existe la posibilidad de que la oferta hídrica no sea suficiente para satisfacer la demanda a la cual se encuentra sometido el sistema hidrológico. Lo anterior se observa tanto en el caso de mantener los derechos de agua superficiales consuntivos constantes en el futuro como en el caso en que aumentan linealmente. En conclusión, para la cuenca del río Tinguiririca se proyecta un futuro más cálido, seco, con una menor disponibilidad hídrica, y con un riesgo mayor al actual de ser afectado por intensas precipitaciones que puedan afectar a su población y servicios. Lo anterior, más allá de ser una premonición, llama a la acción climática con un enfoque integral y territorial, donde los tomadores de decisiones avancen de manera articulada hacia la gestión de riesgos y amenazas con el objetivo de asegurar la resiliencia hídrica y climática de sus territorios.

¹ Ingeniero Civil Hidráulico y MSc. mención en Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Avenida Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile. eduardo.munoz@uchile.cl.

² Ingeniera Civil de la Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Avenida Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile. xvargas@uchile.cl.

1 Introducción

A lo largo de la historia, el valle de Colchagua, la cuenca del río Tinguiririca y, más aún, Chile Central, han sufrido recurrentemente diferentes eventos hidrometeorológicos extremos, los que han puesto en jaque a los sistemas sociales, económicos y políticos. Así queda en evidencia en la revisión histórica de Urzúa y León (2020), quienes destacan que, según crónicas de la época, en el periodo colonial (1598-1810), la zona central del país estuvo expuesta al menos a 23 eventos de lluvias extremas (con inundaciones asociadas) y 26 años secos, donde destaca la sequía entre 1726-1729, cuando existió un racionamiento de las aguas del río Mapocho en la ciudad de Santiago. Asimismo, destacan los eventos ocurridos en julio de 1869, donde copiosas lluvias provocaron daños significativos en los fundos colindantes a San Fernando y el taponamiento del río Tinguiririca, amenaza que fue gestionada por el Intendente de la época, quien ordenó realizar labores para el destapar del dique y, con ello, evitar daños mayores.

En términos de sequías, en los últimos 100 años se cuentan diferentes eventos, entre los que, excluyendo la actual sequía que afecta a Chile Central desde 2010, sobresalen las sequías de 1924, donde comienza a gestarse la valoración por el agua dado el riesgo de desabastecimiento, y la denominada “gran sequía” de 1968-1969, cuando, dada la emergencia se constituyó una comisión multi-ministerial para abordar el tema, se comenzó con un racionamiento energético e hídrico, y se estableció el cambio de huso horario en el verano (Urzúa and León, 2020). La magnitud de la sequía de 1968-1969 queda en evidencia al analizar los registros de estaciones meteorológicas y compararlos con valores promedio históricos. Por ejemplo, la estación La Rufina (34,74°S; 70,75°O; 743 m.s.n.m.) muestra un déficit del 55% en la precipitación anual para dicho periodo respecto al promedio en el periodo 1930-2018, lo cual es incluso mayor al máximo déficit registrado por la misma estación durante la actual sequía que afecta a Chile Central, que asciende a 36% (año 2013/14).

Si bien la historia hidroclimática de la cuenca del río Tinguiririca ha estado marcada por eventos extremos, con grandes impactos en la población y en el sistema sociopolítico y económico, las proyecciones futuras en escenarios de clima cambiante dan cuenta de una tónica similar, incluso proyectando aumentos en la recurrencia

e intensidad de este tipo de eventos tanto en la zona antes mencionada, como en todo Chile Central (e.g., Bambach et al., 2021; MMA, 2014). Así queda en evidencia en el Atlas de riesgo climático para Chile (ARClím; Pica-Téllez et al., 2020), en que, para la ciudades como San Fernando, Placilla, Nancagua y Santa Cruz, donde la exposición de la población es desde alta a severa, la amenaza de inundaciones por crecidas fluviales y desbordes de ríos aumenta en un 20% según las proyecciones de cambio climático para el periodo 2030-2060 respecto al periodo histórico 1985-2015. Asimismo, se estiman en cerca de un 40% los aumentos en la amenaza asociada a la seguridad hídrica doméstica urbana (i.e., mayor inseguridad) para todas las comunas ubicadas en la cuenca del río Tinguiririca. Un resultado similar se tiene para el caso de la seguridad hídrica doméstica rural. Por otra parte, según ARClím, la amenaza asociada a la ocurrencia de sequías severas y muy severas aumenta prácticamente al doble (e incluso más) para comunas como San Fernando y Chimbarongo.

Dada la amenaza que sugiere el cambio climático en la cuenca del río Tinguiririca y su población, y el historial de eventos que acompaña a la cuenca, el presente estudio tiene por objetivo:

- i) Estimar cómo se compara la oferta hídrica natural y la demanda asociada a diferentes subcuencas de la cuenca del río Tinguiririca, bajo el escenario actual y analizar diferentes casos de interés.
- ii) Evaluar cambios en las series anuales de temperatura, precipitación y caudal en el periodo futuro 2030-2060 respecto al periodo histórico 1985-2015.
- iii) Evaluar cambios en los montos de máxima precipitación diaria anual en el periodo futuro 2030-2060 respecto al periodo histórico 1985-2015.

Para abordar los objetivos mencionados anteriormente, se utiliza la base de datos de simulaciones hidrológicas generadas en el contexto del proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), que son gratuitas, de acceso libre y público vía solicitud por transparencia. A su vez, para caracterizar la demanda hídrica, se utiliza la base de datos de derechos de agua superficiales de Budde (2021).

2 Zona de estudio y bases de datos

2.1 Cuencas seleccionadas

La zona de estudio, ubicada en la Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins, corresponde a la cuenca del río Tinguiririca hasta su desembocadura en el embalse Rapel (Figura 1). La cuenca se encuentra contenida casi en su totalidad en la provincia de Colchagua, y su cauce principal, el río Tinguiririca, suministra agua a todo el valle, caracterizado por la presencia de viñedos y plantaciones frutales. Asimismo, en el dominio de estudio se emplazan diferentes comunas, entre las cuales se encuentran San Fernando, Placilla, Nancagua, Santa Cruz, entre otras. Para efectos prácticos del análisis, en este estudio la cuenca del río Tinguiririca se divide en 11 subcuencas, en que cada cuenca hacia aguas abajo contiene a la cuenca delimitada aguas arriba. La división se realiza considerando el potencial hidroeléctrico de la zona, principalmente en la parte alta de la cuenca, y la presencia de asentamientos urbanos a medida que se avanza hacia la desembocadura del río Tinguiririca.

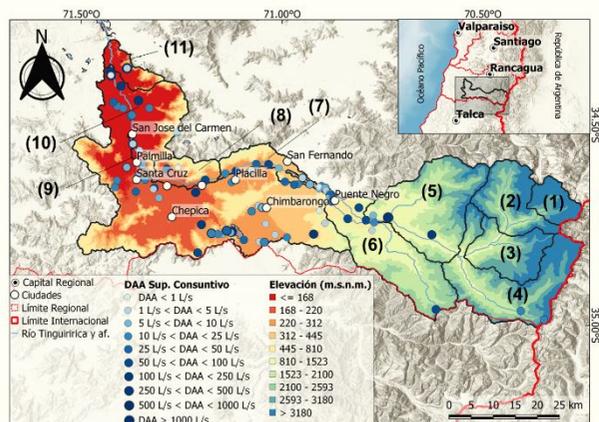


Figura 1: Dominio de estudio y derechos de agua superficiales consuntivos inventariados hasta 2020.

2.2 Series hidrometeorológicas

Como base para este estudio se utilizan las simulaciones hidrológicas generadas en el contexto del proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). Dichas simulaciones provienen de las simulaciones realizadas con el modelo de balance de energía y agua *Variable Infiltration Capacity* (VIC; Liang et al., 1996, 1994; Wood et al., 1992), para lo cual se utiliza como forzante el producto grillado de precipitación y temperatura extrema CR2MET (DGA,

2017) para calibrar el modelo y representar los flujos y estados hidrológicos en el periodo histórico 1985-2015

En términos climáticos, la temperatura (Figura 2A) aumenta a medida que se avanza hacia el valle (i.e., parte alta de la cuenca más fría que el valle). Varía en promedio entre 4,7 y 17,8°C durante el año, dependiendo de la cuenca, con diferencias en torno a $\pm 2,5^\circ\text{C}$ respecto al promedio. Las temperaturas más bajas (altos) se concentran entre abril y septiembre (octubre y marzo). A su vez, las precipitaciones en la cuenca (Figura 2B) se concentran entre los meses de abril y agosto, para luego dar paso a una temporada más seca, característica de la zona central del país, donde predomina el clima mediterráneo. Asimismo, resulta importante notar que las subcuencas ubicadas en la cabecera presentan montos mayores en la precipitación media mensual. Lo anterior, sumado a los patrones que muestra la temperatura, dan cuenta de un gradiente orográfico que incrementa (reduce) la precipitación (temperatura) hacia la parte alta. La hidrología en la cuenca del río Tinguiririca, al igual que en las diferentes secciones delimitadas (Figura 2C), se caracteriza por un gran aporte de la contribución nival. No obstante, a medida que se avanza hacia aguas abajo el aporte pluvial comienza a tomar una mayor participación en el régimen hidrológico, con lo cual se tiene una transición entre un marcado régimen nival en la parte alta de la cuenca a un régimen mixto.

A su vez, las proyecciones de cambio climático se obtienen a partir del escenario de emisiones RCP8.5 (IPCC, 2013) y cuatro modelos del CMIP5 (Taylor et al., 2012), los cuales fueron seleccionados en base a la representación de patrones de variabilidad climática locales en ciertas cuencas piloto, modos de variabilidad como el ENSO y SAM, y la sensibilidad climática (DGA, 2017). Dichos modelos corresponden a: i) CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, iii) IPSL-CM5A-LR y iv) MIROC-ESM. Los modelos fueron escalados estadísticamente y corregidos por sesgo aplicando el método QDM (Cannon et al., 2015), para lo cual se usó como referencia el periodo 1985-2015. Así, se generó una base de datos espacialmente distribuida a $0,05^\circ$ latitud-longitud y resolución temporal diaria en el periodo histórico 1979-2015 y proyecciones hidroclimáticas continuas hacia el año 2060. Para efectos del presente estudio, se analizan dos periodos: i) periodo histórico de referencia, definido entre los años 1985 y 2015, y ii) periodo futuro, definido entre los años 2030 y 2060.

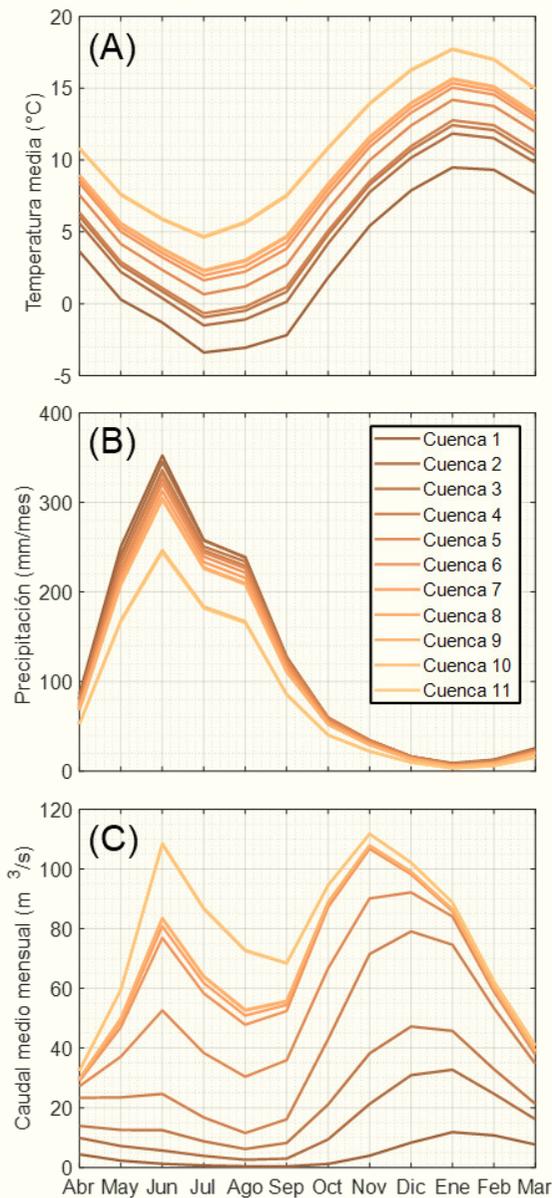


Figura 2: Caracterización hidroclimática de las cuencas en estudio. Promedios mensuales en el periodo 1985-2015 de (A) temperatura media, (B) precipitación, y (C) caudal medio mensual simulado con VIC forzado con CR2MET.

2.3 Información complementaria

La delimitación de la red de drenaje de las cuencas hidrográficas definidas para el estudio (Figura 1) se realiza a partir del modelo de elevación digital (DEM) ALOS-PALSAR, el cual cuenta con una resolución espacial de 12,5 m. Por otra parte, los derechos de agua (DAA) superficiales consuntivos ubicados en la cuenca, empleados en el presente estudio como base

para la estimación de la brecha hídrica actual, han sido obtenidos del trabajo desarrollado por Budde (2021).

3 Metodología

3.1 Metodología general

Tomando en cuenta los objetivos del estudio, se propone un análisis como el esquematizado en la Figura 3, donde cada subcuenca se analiza de manera independiente y se descuenta de la oferta natural la demanda en la subcuenca de estudio. En otras palabras, el caudal que aporta, por ejemplo, la subcuenca “A” a la subcuenca “B” corresponde a la oferta natural en A descontando la demanda DAA_A asociada los derechos de agua superficiales consuntivos en la cuenca A. Dicho procedimiento se repite hacia aguas abajo de la red de drenaje. Así, por construcción, la oferta hídrica en la última cuenca del dominio (i.e., Cuenca 11) ya considera la demanda satisfecha hacia aguas arriba.

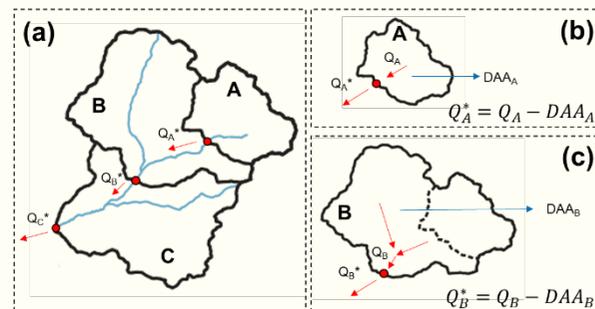


Figura 3: Esquema metodológico para el análisis de la demanda de agua por subcuenca. (a) Vista general de una cuenca con dos subcuencas definidas hacia aguas arriba. (b) Cuenca de cabecera, anidada en la cuenca B y C, donde se tiene una cierta demanda que se descuenta al caudal de salida de la cuenca. (c) Subcuenca anidada en la cuenca C, donde se tiene una cierta demanda que condiciona la oferta en C.

En cada subcuenca del dominio se aplican diferentes análisis a modo de caracterizar anomalías hidroclimáticas y el nivel de demanda asociado. Dichos análisis se realizan a partir de índices e indicadores, los cuales se presentan a continuación.

3.2 Índices de sequía

En primer lugar, se debe distinguir entre sequía meteorológica, entendida como el déficit de precipitaciones respecto a promedio histórico, y sequía hidrológica, caracterizada a partir del caudal medio anual y su relación respecto al promedio histórico. Se debe notar que la sequía hidrológica puede ser

estudiada a partir de otros indicadores hidrológicos como, por ejemplo, caudal, humedad de suelo, entre otros.

Tomando en cuenta que las diferentes variables hidrometeorológicas, a partir de las cuales se puede definir una sequía, presentan diferentes escalas y rangos de variación, imposibilitando su comparación directa, en la literatura se proponen diferentes índices estandarizados que permiten abordar dichas diferencias (e.g., Burke and Brown, 2008; Guttman, 1998; Turkes and Tatlı, 2009). En este estudio, se utilizan los índices estandarizados de precipitación (SPI), escorrentía (SRI) y humedad (SSI), que se basan en ajustar una función de densidad de probabilidad gama de dos parámetros y luego aplicar la inversa de una distribución normal a dichos valores (Farahmand and AghaKouchak, 2015). Así, para clasificar las condiciones de sequía/superávit, se proponen los valores definidos en la Tabla 1, que se basan en el trabajo de Hao et al. (2013).

Tabla 1: Categorización de sequía o superávit según el valor del índice estandarizado.

Condición	Tipo	Valor Índices
Superávit	Excepcional	$\geq 2,0$
	Extremo	1,60 a 1,99
	Severo	1,30 a 1,59
	Moderado	0,80 a 1,29
	Normal	0,50 a 0,79
Normal	-	-0,50 a 0,50
Sequía	Normal	-0,79 a -0,50
	Moderado	-1,29 a -0,80
	Severa	-1,59 a -1,30
	Extrema	-1,99 a -1,60
	Excepcional	$\leq -2,0$

3.3 Estimación de la brecha hídrica

Para estimar la brecha hídrica (BrH), se utiliza el índice de escasez hídrica propuesto en FCH (2018), que se define según la ecuación (3.1). Para efectos prácticos, se considera la demanda hídrica igual a los DAA superficiales consuntivos otorgados en la cuenca, mientras que la oferta hídrica se estima a partir de los resultados del proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018).

$$BrH (\%) = \frac{Demanda\ Hídrica}{Oferta\ Hídrica} \times 100 \quad (3.1)$$

Así, el índice definido anteriormente da cuenta de la relación entre la demanda y la oferta hídrica natural. El nivel de presión del sistema hídrico, caracterizado a partir del índice de escasez hídrica o brecha, se categoriza según se muestra en la Tabla 2. Así, un alto índice de brecha hídrica indica que la oferta natural es un limitante para el desarrollo socioeconómico del sector, por lo que urge un ordenamiento o intervención en la demanda.

Tabla 2: Categorías para el índice de escasez hídrica. Fuente: Adaptado de FCH (2018)

Índice Brecha hídrica	Porcentaje oferta hídrica utilizada
Alto	> 40 %
Medio	20 - 40 %
Moderado	10 - 20 %
Bajo	< 10 %

3.4 Estimación de la evolución futura de los derechos de agua superficiales consuntivos

Para estimar la brecha hídrica futura se definen cuatro escenarios de estudio, los cuales buscan dar cuenta de cómo podría evolucionar la demanda de agua superficial, caracterizada a través de los DAA superficiales consuntivos. Así, se tienen los siguientes casos de interés:

- i. No se otorgan nuevos DAA superficiales consuntivos (i.e., demanda constante).
- ii. Aumento constante dado por la pendiente:

$$m = \frac{DAA_{2015} - DAA_{1979}}{(2015 - 1979)} \quad (3.2)$$

4 Resultados y discusión

4.1 Periodo histórico 1985-2015

Los resultados muestran que, en general, las diferentes cuencas muestran condiciones de sequía/superávit de precipitaciones con alta variabilidad interanual y que coinciden para todas las subcuencas (Figura 4A). A su vez, se observa que el periodo comprendido entre 2010-2015 no presenta los valores más bajos de SPI, pero sí

se aprecia una disminución la variabilidad interanual del índice (prácticamente constante), lo cual da cuenta de la persistencia de la condición seca normal-moderada. La Figura 4B y 4C da cuenta de que la magnitud de una sequía meteorológica no necesariamente se traduce en una sequía hidrológica de igual magnitud. Como muestra de ello se puede mencionar el año 1998, cuando si bien el SPI indica una marcada condición de sequía excepcional, el SRI y SSI indican una sequía extrema. Algo similar se puede apreciar en el año 2010, donde el SPI define una condición de sequía severa en todas las subcuencas, mientras que el SRI y SSI muestran condiciones más intensas de sequía para las subcuencas ubicadas en la parte alta de la cuenca.

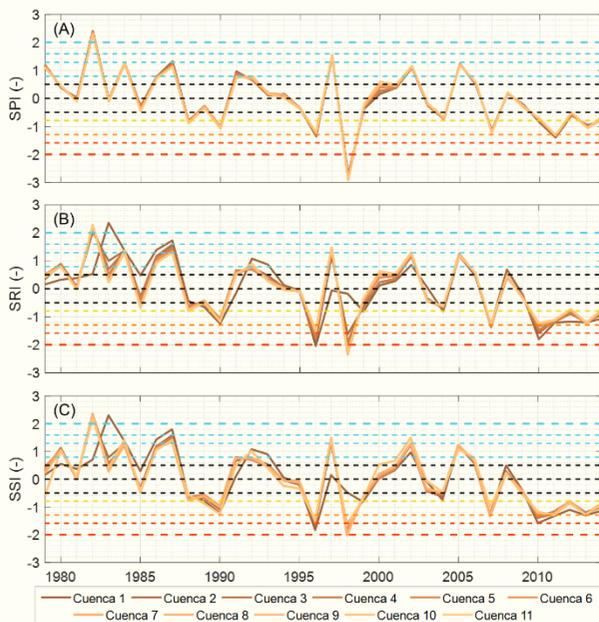


Figura 4: Índices estandarizados para la estimación de sequías y/o superávit. (A) Índice estandarizado de precipitación (SPI). (B) Índice estandarizado de escorrentía (SRI). (C) Índice estandarizado de humedad de suelo (SSI).

La variabilidad interanual de las condiciones de sequía o superávit de precipitaciones o escorrentía anual (Figura 4) condiciona, indudablemente, la satisfacción de la demanda hídrica, la cual no responde a cambios naturales, sino que a las decisiones que los usuarios de agua realizan en función de maximizar su beneficio. Resulta importante notar que, en su mayoría, los derechos de agua superficiales consuntivos son utilizados para el riego.

La Figura 5A muestra la variación anual de la demanda asociada a los derechos de agua superficiales consuntivos en las diferentes subcuencas de interés, mientras que la Figura 5B presenta el volumen anual asociado a la oferta hídrica natural en cada subcuenca. A su vez, la Figura 5C ilustra las variaciones anuales asociadas al índice de escasez hídrica definido según la ecuación (3.1).

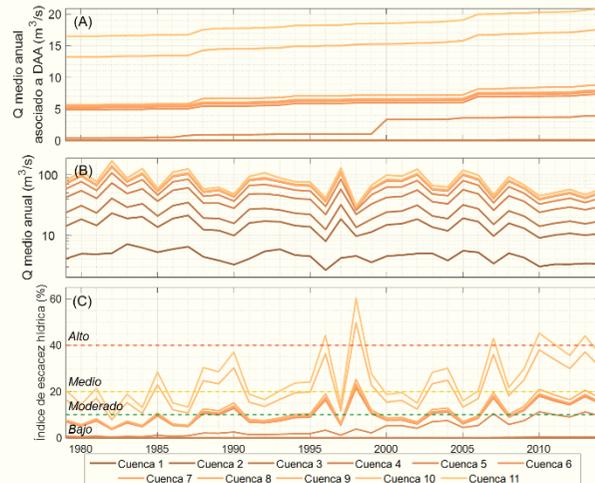


Figura 5: (A) Evolución de la demanda hídrica asociada a derechos de agua superficiales consuntivos. (B) Volumen anual de oferta hídrica natural. (C) Índice de escasez hídrica en el periodo 1979-2015 por cuenca de interés.

De la Figura 5A se desprende que la demanda de agua ha aumentado de manera progresiva entre 1979-2015, con un aumento prácticamente lineal salvo en la cuenca 2 donde en el año 1999 existe un salto en la demanda. La Figura 5B (eje y en escala logarítmica) no muestra tendencias sistemáticas en la oferta hídrica natural, aunque se observa una disminución en la variabilidad interanual de los caudales medios anuales en el periodo 2010-2015. En cuanto al índice de escasez hídrica (Figura 5C), se aprecia que los principales problemas asociados a brecha hídrica se dan en las zonas bajas de la cuenca del río Tinguiririca (Cuenca 10 y 11) donde, por ejemplo, en el periodo 2010-2015 se mantienen en niveles de escasez altos. Lo anterior deja entrever que, cambios en la demanda hacia aguas arriba tienen impactos directos sobre la brecha hídrica de las cuencas más cercanas a la desembocadura.

Cabe mencionar que entre la cuenca 3 y 9 no existen grandes diferencias en la demanda sobre las aguas del río Tinguiririca pues en dichos sectores se agrega a la oferta hídrica las aguas provenientes del Embalse Convento Viejo (comuna de Chimbarongo).

4.2 Proyecciones periodo 2030-2060

4.2.1 Tendencias hidroclimáticas

El escenario de cambio climático evaluado (i.e., RCP8.5) y los cuatro modelos de circulación general (MCG) muestran, de manera coherente entre ellos y a nivel de las diferentes subcuencas estudiadas, un aumento sistemático en la temperatura media anual (Figura 6). Dicho aumento, hacia finales de 2059, alcanza un valor de aproximadamente 2-3°C respecto a 1979 en todas las subcuencas de estudio. En términos promedio, el periodo 2030-2060 sugiere un aumento de 1-2°C respecto al periodo histórico de referencia 1985-2015.

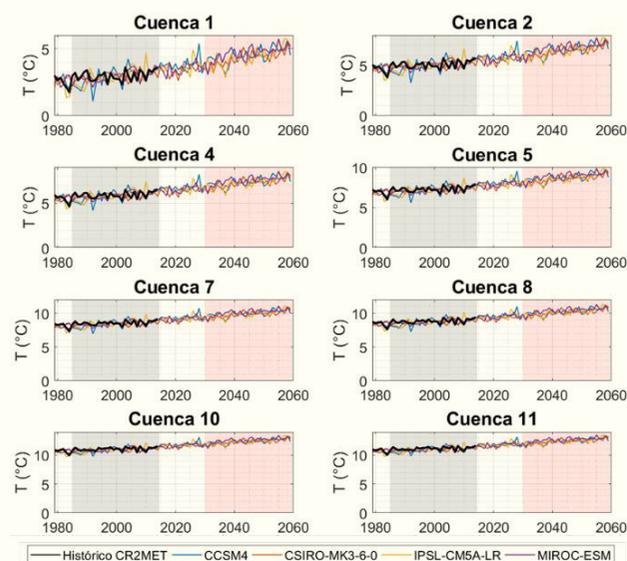


Figura 6: Serie de temperatura media anual en el periodo 1979-2060 generada a partir de cuatro modelos de circulación general según el escenario de emisiones RCP8.5 para una muestra de 8 de las 11 subcuencas estudiadas.

Resulta natural pensar que el aumento en la temperatura promedio sugiere una amenaza a los diferentes ecosistemas en la zona de estudio y, además, en las ciudades, pudiéndose ver intensificados fenómenos como, por ejemplo, las islas de calor. Por otra parte, en la Figura 7 se ilustra la serie de valores anuales de precipitación en el periodo 1979-2060, donde, si bien no se observa la marcada tendencia de la temperatura, se aprecian cambios en el valor promedio del periodo 2030-2060 respecto al periodo 1985-2015 (reducción de aproximadamente un 50% en todas las subcuencas) y, adicionalmente, cambios en la variabilidad interanual. Así, los resultados presentados en la Figura 6 y 7 apuntan a un futuro más cálido y más seco, lo cual

tienen impactos directos sobre la disponibilidad hídrica (Figura 8), la que disminuiría de manera coherente a los cambios expuestos para la precipitación media anual. Para el periodo 2030-2060 se proyecta una disminución en torno al 30-50% del caudal medio anual promedio del periodo 1985-2015

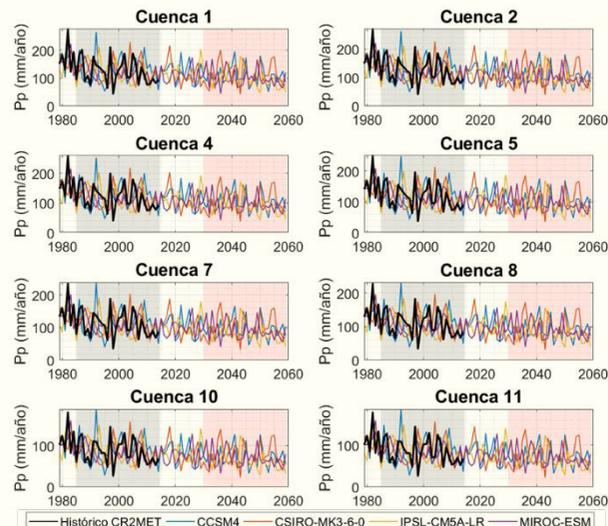


Figura 7: Serie de precipitación anual en el periodo 1979-2060 generada a partir de cuatro modelos de circulación general según el escenario de emisiones RCP8.5 para una muestra de 8 de las 11 subcuencas estudiadas.

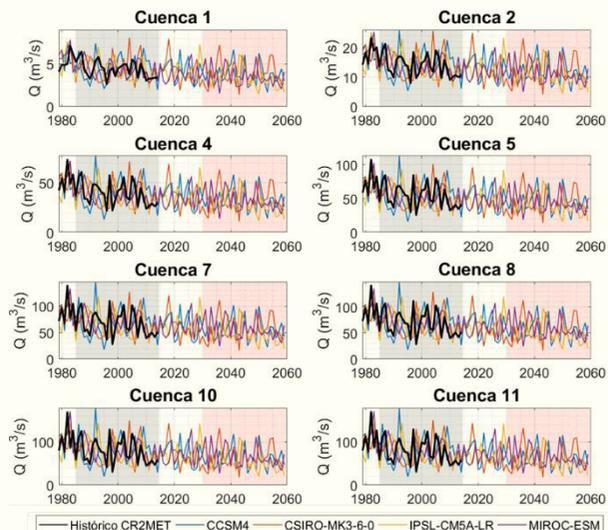


Figura 8: Serie de caudal medio anual en el periodo 1979-2060 generada a partir de cuatro modelos de circulación general según el escenario de emisiones RCP8.5 para una muestra de 8 de las 11 subcuencas estudiadas.

4.2.2 Sequías hidrometeorológicas

Para analizar la posibilidad de sequías en el futuro, se aplican los mismos índices del periodo histórico, pero a los valores mínimos anuales derivados de cada modelo de cambio climático para cada cuenca. Lo anterior, para caracterizar el caso más desfavorable que se puede esperar hacia el futuro. Así, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 9, donde se observa una tendencia sistemática a índices que dan cuenta de condiciones de sequía tanto meteorológicas como hidrológicas. A diferencia del periodo histórico, no se marcan diferencias entre los índices, los cuales apuntan a condiciones de sequía de igual magnitud entre ellos.

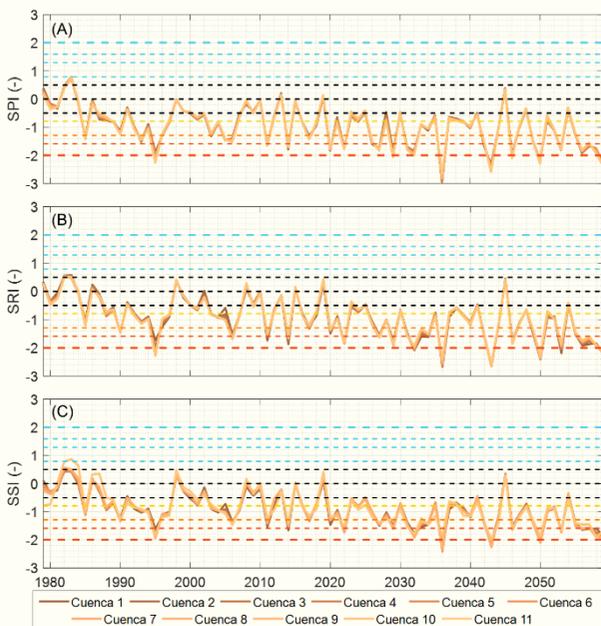


Figura 9: Caso más desfavorable entre modelos de cambio climático para los índices estandarizados para la estimación de sequías y/o superávit. (A) Índice estandarizado de precipitación (SPI). (B) Índice estandarizado de escorrentía (SRI). (C) Índice estandarizado de humedad de suelo (SSI).

En el periodo 2030-2060 se observa que la mayoría de los años se clasifican como secos, con intensidades que van desde sequías normales a excepcionales. Lo anterior se repite en todos los índices evaluados (i.e., SPI, SRI y SSI).

4.2.3 Proyecciones de brecha hídrica

Respecto a la brecha hídrica, al igual que en el caso de los índices de sequía, se considera para cada cuenca la condición más desfavorable proyectada por los modelos de cambio climático en cada año (i.e., el valor

mínimo de caudal medio anual). Así, se construyen las Figuras 10 y 11, donde se presentan los resultados asociados a los casos de demanda hídrica futura constante y linealmente creciente. Si bien las figuras se diferencian sólo en la magnitud asociada al índice de escasez hídrico, resulta importante notar que en ambos casos existen años en que no se satisface la demanda. En otras palabras, la condición actual de demanda hídrica ya sugiere un potencial problema futuro a causa de los cambios en la disponibilidad hídrica natural.

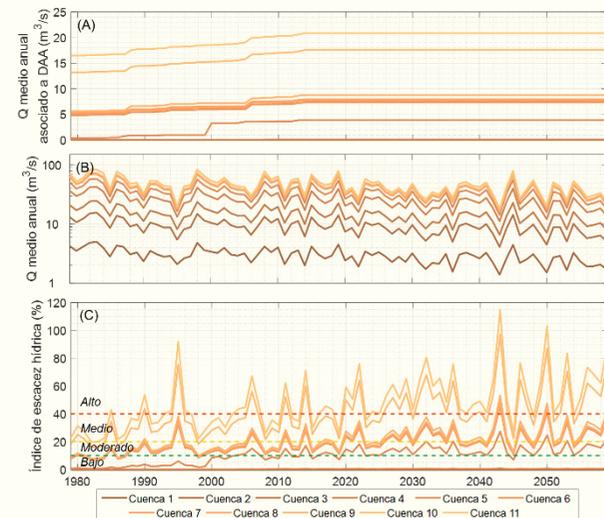


Figura 10: Índice de escasez hídrica para el escenario futuro de demanda hídrica (i) según la condición más desfavorable entre los modelos de cambio climático para las 11 cuencas de estudio.

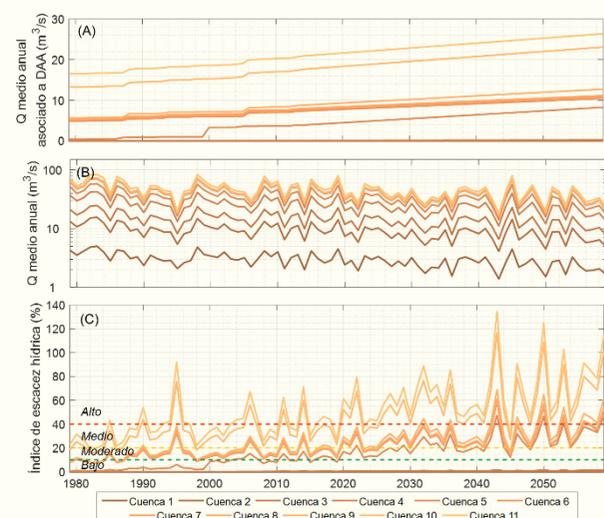


Figura 11: Índice de escasez hídrica para el escenario futuro de demanda hídrica (ii) según la condición más desfavorable entre los modelos de cambio climático para las 11 cuencas de estudio.

Más aún, para la mayoría de los años se tienen valores del índice de escasez hídrica altos para las cuencas 10 y 11. Esto indica que, para las cuencas cercanas a la desembocadura no estaría llegando el recurso hídrico que permita satisfacer la demanda asociada. Esto tiene especial relevancia pues, además, no estaría llegando agua al embalse Rapel, obra destinada a la generación hidroeléctrica.

4.2.4 Precipitaciones extremas

Para analizar potenciales cambios en los eventos de máxima precipitación, en la Figura 12 se ilustran los cambios en la función de distribución de probabilidad empírica acumulada asociada a la máxima precipitación diaria anual (Pd_{max}) en el periodo histórico (1985-2015) y futuro (2030-2060) dada por los modelos de cambio climático estudiados. Así, un desplazamiento de curvas hacia la derecha respecto al caso base (periodo histórico) implica un aumento en la magnitud de los eventos para una misma probabilidad de excedencia.

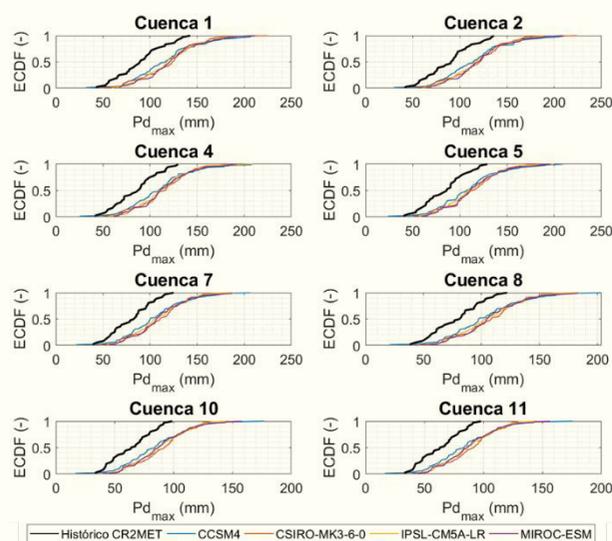


Figura 12: Comparación de la función de distribución de probabilidad empírica acumulada (ECDF) de la máxima precipitación diaria anual en el periodo 2030-2060 según cuatro modelos de circulación general según el escenario de emisiones RCP8.5 para una muestra de 8 de las 11 subcuencas estudiadas respecto al periodo 1985-2015.

En consecuencia, de los resultados se desprende que, para una misma probabilidad de excedencia, se proyecta una mayor magnitud de máxima precipitación diaria. En términos prácticos, lo anterior indica que eventos que hoy son poco frecuentes se podrían hacer

más frecuentes en el futuro, lo cual evidentemente sugiere un riesgo para la población y los servicios de infraestructura.

5 Conclusiones

El estudio tuvo por objetivo analizar la brecha y riesgo hídrico en un contexto de clima cambiante en diferentes subcuencas anidadas en la cuenca del río Tinguiririca, la cual abastece de agua a gran parte del Valle de Colchagua en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Para ello, se utilizaron los resultados generados en el contexto del proyecto "Actualización del Balance Hídrico Nacional", los cuales incluyen proyecciones de cambio climático según un escenario de emisiones RCP8.5 y cuatro modelos de circulación general, y los derechos de agua superficiales consuntivos catastrados para la cuenca de estudio.

A partir de los resultados obtenidos se desprende lo siguiente:

- La cuenca del río Tinguiririca presenta una alta demanda hídrica, por lo que resulta necesario articular planes de gestión integrada de cuenca porque, decisiones hacia aguas arriba de la cuenca condicionan la oferta hídrica en las zonas de mayor estrés hídrico.
- Todas las cuencas muestran, en el periodo futuro un aumento en la temperatura media anual y disminución en la precipitación y caudal medio. Lo anterior tendrá impacto directo sobre la disponibilidad hídrica y sobre los servicios en cada subcuenca (e.g., cuenca 1 y generación hidroeléctrica).
- Precipitaciones intensas que en la actualidad resultan poco frecuentes o "anormales" podrían volverse más frecuentes en el futuro.
- Se proyecta un futuro más cálido, seco, con menor disponibilidad hídrica y con eventos de precipitación más intensos.

Finalmente, se debe enfatizar que los resultados presentados, más allá pretender ser una especie augurio o presagio, son un llamado a la acción en materia hídrica bajo enfoques territoriales integrados, pues cada decisión que se toma a lo largo de la cuenca impacta, indudablemente, la disponibilidad del recurso hacia aguas abajo. Asimismo, los cambios proyectados en la recurrencia de eventos meteorológicos extremos ya

sean sequías o precipitaciones intensas, hacen urgente la toma de medidas que tiendan a la adaptación y mitigación, pues la inacción sugiere un aumento en la amenaza de la sociedad y los diferentes servicios.

Referencias

- Bambach, N.E., Rhoades, A.M., Hatchett, B.J., Jones, A.D., Ullrich, P.A., Zarzycki, C.M., 2021. Projecting climate change in South America using variable-resolution Community Earth System Model: An application to Chile. *Int. J. Climatol.* <https://doi.org/10.1002/joc.7379>
- Budde, N., 2021. Análisis del potencial de la información de derechos de aprovechamiento de agua para aplicaciones hidrológicas en Chile continental [aceptado/en revisión]. Universidad de Chile.
- Burke, E.J., Brown, S.J., 2008. Evaluating Uncertainties in the Projection of Future Drought. *J. Hydrometeorol.* 9, 292–299. <https://doi.org/10.1175/2007JHM929.1>
- Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q., 2015. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *J. Clim.* 28, 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- DGA, 2018. Aplicación de La Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Norte y Centro.
- DGA, 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Farahmand, A., AghaKouchak, A., 2015. A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Adv. Water Resour.* 76, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.012>
- FCH, 2018. Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile. Escenarios Hídricos 2030.
- Guttman, N.B., 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34.
- Hao, Z., Aghakouchak, A., 2013. Advances in Water Resources Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Adv. Water Resour.* 57, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in: CEUR Workshop Proceedings. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.* 99. <https://doi.org/10.1029/94jd00483>
- Liang, X., Wood, E.F., Lettenmaier, D.P., 1996. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Glob. Planet. Change* 13, 195–206. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00046-1)
- MMA, 2014. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Tercera comunicación nacional (Chile) 80.
- Pica-Téllez, A., Garreaud, R., Meza, F., Bustos, S., Falvey, M., Ibarra, M., Duarte, K., Ormazábal, R., Dittborn, R., Silva, I., 2020. Atlas de Riesgo Climático para Chile 181.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Turkes, M., Tatlı, H., 2009. Use of the standardized precipitation index (SPI) and a modified SPI for shaping the drought probabilities over Turkey †. *Int. J. Climatol.* 29, 2270–2282. <https://doi.org/10.1002/joc>
- Urzúa, C., León, V., 2020. Sequías y lluvias extremas, in: Colchagua En Emergencia. LOM, Santiago, Chile, pp. 119–186.
- Wood, E.F., Lettenmaier, D.P., Zartarian, V.G., 1992. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *J. Geophys. Res.* 97, 2717–2728. <https://doi.org/10.1029/91JD01786>

GEOPOLÍMEROS DE RELAVES PARA RELLENOS DE CASERONES

Investigación JRI¹ y CIMS-JRI²

RESUMEN

El Centro de Investigación en Minería Sustentable CIMS – JRI es una empresa chilena, filial de JRI Ingeniería S.A. con 11 años de experiencia en el desarrollo y adaptación investigativa aplicada en el área minero – metalúrgica, que cuenta con profesionales de alta especialización en el desarrollo de estudios enfocados al relleno de caserones de minas subterráneas utilizando relaves cementados, y en esta ocasión, trabajando en conjunto al Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de materiales de la Universidad Técnica Federico Santa María liderado por el Dr. Sergio Palma y con la colaboración de la Escuela de Ingeniería Química de la P. Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad de Santiago de Chile.

¹ JRI Ingeniería S.A., Luis Uribe 2343, Ñuñoa. Fono: 223618200, www.jri.cl

² Centro de Investigación en Minería Sustentable-JRI. www.ci-jri.cl

Introducción

Pensando en la minería del futuro y la responsabilidad que cada uno de los involucrados en esta industria tiene, JRI Ingeniería S.A. y el Centro de Investigación de Minería Sustentable CIMS-JRI se han propuesto pensar en la economía circular, incorporando nuevas tecnologías para el manejo y control de los desechos mineros, utilizando los geopolímeros en base a relaves de cobre, como alternativa, para el relleno de caserones en minas subterráneas.

El envejecimiento de las minas a rajo abierto, acompañado de las grandes profundidades en que se llevan sus operaciones en el presente, está impulsando, cada vez más, que las grandes Compañías Mineras comiencen a dirigir sus explotaciones hacia la minería subterránea. En ella se pueden utilizar métodos de explotación a gran escala o selectivos, de tipo Room & Pillar, Sub Level Stopping, Block Caving, entre otras.

Australia ya está implementando una técnica innovadora llamada Long Hole Open Stop with backfill, que consiste en explotación y relleno, sobre el cual se van construyendo los pilares laterales de los caserones de hundimiento, con una combinación de roca triturada con baja proporción de cementos. Este método ya se está usando en Chile con buenos resultados, sin embargo, tiene un valor por sobre el 25% del total del proyecto debido principalmente a la utilización de cemento.

Por otro lado, la minería y los procesos metalúrgicos generan grandes volúmenes de relave, desechos que contienen elementos y minerales de todo tipo ya sea sulfurados o de alta toxicidad como Arsénico (As), Cadmio (Cd), Vanadio (V), Antimonio (Sb) y en algunos casos partículas de tipo arcillas hasta arenas finas en distintas composiciones. Estos depósitos generan diversos problemas ambientales debido, en muchas ocasiones, a un manejo no correcto de estos depósitos. Este problema ambiental de la industria, llevó a JRI y a su Centro de Investigación, CIMS JRI, a investigar y desarrollar una nueva alternativa para el relleno de caserones, utilizando relaves mediante mezclas geopoliméricas.

¿Qué es un geopolímero?

El geopolímero es un polímero sintético inorgánico, producto de la reacción de una fuente de aluminosilicatos mezclado con un agente alcalino, obteniendo como resultado una sustancia semi - amorfa con fases sólidas, que depende de la temperatura de curado y la concentración de los minerales y reactivos. Los relaves se caracterizan por tener diversas fuentes mineralógicas, destacando así la cantidad de óxidos de silicio y aluminio, compuestos altamente propensos a la actividad química y principales para la formación del geopolímero. Este material tiene la característica de poseer una alta resistencia a la compresión uniaxial en la concentración y composición exacta entre el reactivo y la fuente de aluminosilicatos.

El producto de la reacción puede ser utilizado como alternativa para el relleno de caserones (backfill) en las minas subterráneas para los pilares laterales que soportan el desprendimiento generado y el sostenimiento del techo de material estéril, aumentando la vida útil de la mina y a su vez, reduciendo significativamente la cantidad de relave depositado, ya sea en tranques o embalses.

La investigación de JRI y CIMS JRI

En este sentido, JRI, representado por Hengels Castillo, Jefe del Área de Geociencias y CIMS JRI, con los memoristas Humberto Collado de la Universidad Técnica Federico Santa María y Sebastián Sánchez de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, han trabajado en la viabilidad técnica de obtener hormigones del tipo geopolimérico, utilizando relaves de flotación de cobre junto a reactivos industriales a diferentes condiciones de temperatura, tiempo, concentración y proporciones de los compuestos, con el fin de ser usados en el relleno de caserones mineros, cumpliendo con las normas y requisitos necesarios para el transporte y posterior llenado.

Basándose en la caracterización química de los reactivos, relaves de cobre y de los elementos constitutivos, se ha logrado determinar las proporciones óptimas para la mezcla a realizar, escogiendo mezclas geopoliméricas bajo diferentes condiciones de fraguado, curado, permeabilidad, resistencia química y compresión simple en ambiente de mina subterránea.

La investigación además ha permitido definir variables y ejecutar un extenso programa de estudios mediante análisis factorial, caracterización mineralógica, físico – química y micro estructural tanto para el relave como para el reactivo alcalino utilizado.

La realidad de los relaves en nuestro país

En Chile, las faenas mineras y plantas metalúrgicas generan anualmente alrededor de 530 millones de toneladas de relave, acumulando hasta el año 2020 alrededor de 24 mil millones de toneladas en todo el territorio nacional (Sernageomin, 2020). Algunos depósitos de relaves se encuentran en cercanías de ciudades o poblados, afectando a la salud y al ecosistema del entorno, debido a los agentes y elementos químicos que pueden causar problemas en la contaminación de las aguas o en la tierra para el cultivo, haciendo inerte y tóxico el entorno.

Por esto, los beneficios medioambientales que se consiguen con los geopolímeros aportan a una nueva

minería, tanto por la conciencia ambiental, por la reducción en la tasa de depósito de relaves y seguridad de los tranques, como por la encapsulación de estos minerales por parte de la mezcla, según los resultados arrojados en la investigación de JRI y CIMS JRI en cuanto al proceso de lixiviación y toxicidad. En comparación a la industria del Cemento Portland, el geopolímero produce una reducción en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) del 20% al 80%.

Desde el punto de vista económico, la recuperación de los pilares laterales en el relleno de caserones, sumado a la utilización de los relaves pasivos para lograr ser activos, mejora la competitividad y sostenibilidad, mediante el reciclado y reúso del relave.

Los próximos pasos son prometedores, ya que los resultados obtenidos son excelentes, tanto en la resistencia a la compresión como en la permeabilidad y baja toxicidad según la Norma US EPA Method 1311.

REFLEXIÓN SOBRE LOS NUEVOS CRITERIOS Y ESTÁNDARES DE CALIDAD PUBLICADOS POR LA CNA PARA LA ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL INTEGRAL

Fernanda Valdés Raczynski¹, Juan Music Tomicic²

¹ Licenciada en Educación, Profesora y Consejera Educacional, Pontificia Universidad Católica de Chile. PhD Candidate en Educación Superior, Universidad Diego Portales y Universidad de Leiden. Directora de Aseguramiento de Calidad, Universidad de los Andes y Directora de Aequalis

² Ingeniero Civil, Mención Estructura, Universidad de Chile. Académico Departamento Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte y Director de Aequalis

Introducción

En mayo del año 2018 se promulgó la Ley de Educación Superior (N°21.091) que modifica el Sistema Nacional de Aseguramiento de la Calidad y establece la “acreditación institucional integral”, obligatoria para las Instituciones de Educación Superior (IES) autónomas. Recientemente, el 30 de septiembre, y después de un extenso proceso de deliberación y elaboración con participación de las IES y del Comité de Coordinación, que reúne a la institucionalidad en la materia, la Comisión Nacional de Acreditación (CNA) dio a conocer formalmente los criterios y estándares de acreditación que entrarán en vigencia 24 meses después de su promulgación, es decir, el 1 de octubre del 2023.

Con la promulgación de los nuevos criterios y estándares se ha dado un paso importante en materializar lo establecido por la Ley de Educación Superior y se contribuye al esclarecimiento de exigencias y expectativas sobre el desarrollo de las IES. Preliminarmente, es posible advertir que las nuevas orientaciones parecen razonables y han sido bien recibidas por las IES, sobre todo porque consideran la diversidad que las caracteriza. No obstante, lo valorable de la publicación de la CNA, quedan desafíos relevantes que abordar para una adecuada implementación. Por ejemplo, delinear cómo se concretará la acreditación institucional integral si esta contempla, como señala la ley, una “muestra intencionada” de programas; actualizar a los pares evaluadores bajo estas nuevas orientaciones; implementar la política y hacer riguroso seguimiento de sus efectos en función de las expectativas de incremento de calidad.

En base a los lineamientos publicados, y bajo la premisa de que las IES son las primeras responsables del incremento de su calidad y que la agencia acreditadora debe promover que aquello ocurra, este artículo busca contribuir a explicar el alcance de la reciente publicación para las universidades. Para ello se revisará la noción de acreditación institucional integral, y cada dimensión, en función de lo establecido en la Ley. Luego se indagará en los criterios y estándares elaborados. Finalmente, se realizarán algunas sugerencias que podrían ser orientadoras para una adecuada implementación y para el trabajo que resta hacia delante, tanto para la CNA como para las IES, en esta nueva etapa.

Acreditación Institucional Integral

La acreditación institucional integral, así como la de programas de doctorado y de las carreras de Medicina, Odontología y Pedagogías es obligatoria. La acreditación de programas de magister es voluntaria y las de carreras o programas de pregrado (distintos a los mencionados), es voluntaria y entrará en vigencia a partir del 31 de diciembre del 2024.

La Ley establece que la acreditación institucional integral consistirá en la evaluación y verificación del cumplimiento de criterios y estándares de calidad que se referirán a recursos, procesos y resultados; el análisis de los mecanismos internos para aseguramiento de la calidad, considerando tanto su pertinencia como su aplicación sistemática y resultados; y concordancia con la misión y propósitos de las IES. Dicha acreditación considerará la evaluación de la totalidad de las sedes, funciones y niveles de programas formativos de la IES, y de aquellas carreras y programas de estudio de pre y postgrado, en sus diversas modalidades, tales como presencial, semipresencial o a distancia, que hayan sido seleccionadas por la Comisión para dicho efecto. Señala que un reglamento de la CNA establecerá el procedimiento de selección intencionada de carreras y programas de estudio de pre y postgrado que serán evaluados en el contexto de la acreditación institucional.

La Ley define los tipos de IES y explicita las funciones que han de desarrollar las universidades (docencia, investigación, creación artística, innovación y vinculación con el medio); institutos profesionales (docencia, innovación y vinculación con el medio, con alto grado de pertinencia al territorio) y Centros de Formación Técnica (docencia, innovación y vinculación con el medio, con pertinencia al territorio si corresponde). Asimismo, se reconoce la autonomía de las IES lo que implica que ellas tienen la potestad para establecer sus propósitos, énfasis y estrategias para llevar a cabo los aspectos que contempla el ejercicio de las funciones establecidas para cada tipo de IES.

En este contexto, la acreditación institucional integral consideraría la evaluación de las funciones misionales que la Ley establece según el tipo de Institución. Ello supondría deseable que dichas funciones estuvieran presentes en la misión y visión, formaran parte de los ejes u objetivos estratégicos del plan de desarrollo institucional, estuvieran contenidas en políticas formalmente aprobadas, exhibieran un sistema de

gobierno y una estructura orgánica que contemple la gestión de todas ellas y existiera un sistema interno de calidad que garantice su desarrollo.

Respecto a la muestra de carreras de pregrado y programas de postgrado, ella no daría lugar a la acreditación de esas carreras, ni tampoco les serían aplicables todas las dimensiones y criterios predefinidos por la CNA para la acreditación institucional integral. Su objetivo sería verificar en ellas la consistencia interna respecto de lo establecido a nivel institucional para cada función según sea el caso. Así, por ejemplo, se evaluaría si todas ellas están alineadas con el modelo o proyecto educativo institucional a nivel de diseño, implementación y evaluación, si se aplican las políticas, reglamentos y procedimientos institucionales en cuanto a la creación de la oferta, la admisión, el diseño e implementación y la evaluación de sus principales resultados en función de sus perfiles de egreso y progresión, entre otros. En suma, se trataría de verificar si en los programas de la muestra ha funcionado el sistema interno de aseguramiento de calidad de la institución.

Dimensiones, Criterios y Estándares de Acreditación Institucional

Las áreas de acreditación vigentes son modificadas y la ley las denomina dimensiones de acreditación. Las obligatorias son: docencia y resultados del proceso formativo; gestión estratégica y recursos institucionales; aseguramiento interno de calidad y vinculación con el medio. Como optativa se establece la investigación, creación y/o innovación. Sin embargo, si se aspira a acreditar por el máximo de años (7), será necesario contemplar el logro de todas las dimensiones¹.

Adicionalmente se señala que un reglamento de la Comisión determinará el contenido de cada una de las dimensiones de evaluación; no obstante, la Ley define de manera general cada una². Asimismo, para cada dimensión han de elaborarse criterios y estándares, cuyas definiciones también son amplias. Los primeros se refieren a elementos específicos vinculados a la dimensión; los segundos son descriptores del nivel de logro progresivo del criterio.

Desde el año 2019 la CNA se dio a la tarea de elaborar criterios y estándares conforme al nuevo marco regulatorio. Los resultados en las distintas etapas del proceso suscitaron polémicos debates y dejaron al descubierto interpretaciones de la Ley y expectativas disímiles, tanto en las IES como en la agencia estatal. Resulta valorable entonces, el hecho de que finalmente se escucharon las distintas partes y se logró llegar a definiciones en base a acuerdos. Para el caso del subsistema universitario se definieron 14 criterios y para el subsistema técnico profesional, 16. En los siguientes apartados se analizarán los criterios y estándares de cada dimensión de acreditación aplicables a las universidades.

Dimensión 1: Docencia y Resultados del Proceso Formativo

Criterio 1. Modelo Educativo y Diseño Curricular

Se espera que las universidades posean un modelo educativo característico de acuerdo a su proyecto, formalmente aprobado, y que oriente el diseño curricular de los programas que otorgan título y grado académico y el proceso de enseñanza y aprendizaje del pregrado y postgrado. El perfil de ingreso de los estudiantes, los mecanismos de egreso, titulación y graduación y planes de estudio son algunos de los componentes que se revisan periódicamente para ajuste o actualización de los perfiles de egreso y los programas. En este contexto, la relación con titulados y empleadores contribuye a conocer la pertinencia y eficacia del proceso formativo y también a la retroalimentación del perfil de egreso y pertinencia de los planes de estudios de las carreras y programas.

En resumen, contar con un modelo educativo explícito y que dé cuenta de programas de pregrado y postgrado alineados con él en cuanto a diseño, implementación, evaluación y planes de mejoramiento es el principal desafío de las universidades.

Eventualmente, la muestra intencionada de programas que seleccione la CNA será evaluada (entre otras materias) respecto a en qué medida el modelo educativo y el diseño curricular institucional se reflejan en los programas de dicha selección.

¹ Art.20, Título IV, Ley 21091

² Art.20, Título IV, Ley 21091

Criterio 2. Procesos y resultados de enseñanza aprendizaje.

Un aspecto relevante es que la Universidad ha de contar con las condiciones necesarias para el logro de los perfiles de egreso de los programas de pre y postgrado. Para ello se espera un monitoreo y seguimiento del nivel de logro de los mismos. Asimismo, se espera que las instituciones apliquen sistemáticamente apoyos para la progresión estudiantil, coherente con el perfil de ingreso. El objetivo del criterio es evidenciar el incremento en los indicadores de progresión y compromiso estudiantil, producto de acciones desarrolladas con ese fin.

Algunos aspectos para considerar en el desarrollo de este criterio son: mecanismos para conocer el perfil de ingreso de los estudiantes, acciones para la nivelación y apoyo integral a los estudiantes durante todo su proceso formativo, tales como inducción, remediales, tutoría, etc.

Criterio 3. Cuerpo Académico.

Las universidades han de contar con cuerpos académicos idóneos y suficientes y compatibles con sus funciones misionales según los requerimientos de su oferta educativa. Esto significa, a nivel de pregrado, que respondan a los requerimientos de las carreras y a nivel de postgrado, que conformen claustros o núcleos académicos, con alto nivel de productividad. Asimismo, resulta relevante la existencia y aplicación sistemática de una carrera académica que incentive el ascenso en el desempeño. Por último, es necesario para el personal académico y docente, contar con procedimientos de contratación adecuados y transparentes, una política de perfeccionamiento pedagógico y disciplinar, sistema de evaluación y de desvinculación.

Criterio 4. Investigación, innovación docente y mejora del proceso formativo.

Se espera que las universidades desarrollen investigación o innovación sobre su propia experiencia docente y mejoren los procesos formativos conforme con sus resultados y en coherencia con el propio proyecto. A nivel avanzado, la expectativa es que los nuevos conocimientos generados, se difundan a las comunidades disciplinares correspondientes, tanto a nivel local o internacional.

Dimensión 2: Gestión Estratégica y Recursos Institucionales.

Criterio 5. Gobierno y Estructura Organizacional.

En general, las misiones y visiones explicitan valores institucionales, funciones misionales (docencia, investigación y vinculación con el medio,) y su relación con la sociedad. Es necesario que exista coherencia entre ambas y que éstas sean difundidas y conocidas al interior de la universidad. Las políticas y normativas institucionales han de ser coherentes también con ellas. Asimismo, las decisiones estratégicas responden a un plan de desarrollo institucional de mediano y largo plazo, coherente con el ideario institucional, susceptible de monitorear y ajustar cuando sea necesario.

Contar con un Gobierno que permita gestionar todas las funciones institucionales requiere precisar quienes tienen los roles políticos, estratégicos y operativos; la separación entre los responsables de la implementación y seguimiento de las funciones misionales de la instancia de evaluar el nivel de logro de dichas funciones; lograr una gestión institucional integral basada en los objetivos o ejes estratégicos definidos en el plan de desarrollo y no en las funciones de cada unidad; mejorar los resultados e indicadores institucionales y su posicionamiento a nivel nacional; adecuación de estrategias económicas y financieras (dada la implementación de la gratuidad para la gran parte de las universidades) y otros aspectos con el fin de garantizar la sustentabilidad del proyecto institucional.

Es recomendable que las instituciones analicen la conveniencia de realizar eventuales ajustes a sus visiones y misiones conforme a las definiciones del quehacer universitario que define la ley. También se sugiere revisar si se cuentan con políticas y normativas coherentes. En particular, si existe una política financiera, de calidad, de vinculación con el medio, de investigación e innovación, de admisión, además de un Reglamento Académico y de Docentes, entre otros.

Criterio 6. Gestión y desarrollo de personas.

Se espera que la Universidad defina y lleve a cabo procesos de reclutamiento, selección, inducción, desarrollo profesional, evaluación y retiro. Se trata de observar oportunidades de desarrollo para las personas - académicos, profesionales y administrativos - y que éstas contribuyan, al mismo tiempo, al desarrollo institucional.

Criterio 7. Gestión de la convivencia, equidad de género, diversidad e inclusión.

Posiblemente este criterio resulte el más novedoso de todos; preliminarmente ha sido ampliamente valorado. Implica que la universidad promueve el desarrollo integral de la comunidad, en todo su quehacer y responde en su gestión a los desafíos en materia de convivencia, equidad de género, respeto a la equidad e inclusión, en función de sus propósitos institucionales. Requiere contar con una política o políticas de equidad de género, diversidad e inclusión, consistentes con el respectivo ideario institucional, y desarrollar iniciativas conforme a ellas.

Criterio 8. Gestión de recursos.

Refiere a los medios necesarios para el desarrollo del quehacer universitario, así como contar con políticas y procedimientos para la gestión de los recursos, tales como: planificación, adquisición, mantención, control, ajustes presupuestarios, inversiones y endeudamiento.

Posiblemente la CNA evaluará este criterio ponderando la información que le provea la Superintendencia de Educación Superior la que, dentro de sus competencias, fiscaliza que las IES destinen sus recursos a los fines que le son propios de acuerdo con la Ley y sus Estatutos³.

Dimensión 3: Aseguramiento Interno de Calidad.

Nominalmente esta dimensión es nueva, sin embargo, los criterios de acreditación vigentes presumen que las IES cuentan con algún grado de desarrollo de un sistema propio de resguardo de la calidad. En general, estos consisten en el desarrollo de mecanismos de gestión para el logro de la acreditación. En suma, los dos criterios exigen la formalización de esta nueva dimensión mediante una política, un sistema de información para la toma de decisión y avanzar en participación y compromiso de toda la comunidad universitaria.

Criterio 9. Gestión y resultados del aseguramiento interno de la calidad

La CNA definió que las universidades han de contar con una política de aseguramiento interno de la calidad que fortalezca la autorregulación y el mejoramiento continuo. Para ello, supone que la universidad registra y analiza información respecto de su desempeño y

fomenta la participación de la comunidad universitaria en este proceso. Se aspira a que la universidad promueva una cultura de calidad que comprometa a las personas, desde la perspectiva de su propio quehacer dentro de la institución.

Criterio 10. Aseguramiento de la calidad de los programas formativos

Además de la política de calidad (criterio 9), la universidad es llamada a contar con procedimientos para la mejora continua de la oferta formativa. En este criterio se hace alusión a la “muestra intencionada de programas”, se espera que ella evidencie mecanismos de revisión interna, resguardos de calidad equivalentes y uso de resultados para retroalimentar los programas.

Dimensión 4: Vinculación con el Medio

Se explicita claramente que esta función es bidireccional y que las universidades han de contar con una política y un modelo de vinculación con el medio. Éstos han de exhibir coherencia con la misión, valores y propósitos institucionales y declarar los impactos externos e internos que se espera de su implementación.

Criterio 11. Política y gestión de la vinculación con el medio

Respecto de la política, ella define los objetivos y propósitos. En relación con el modelo, explicita los ámbitos de vinculación, identificados y formalizados, y los instrumentos para su implementación (programas y proyectos). Asimismo, señala los impactos internos que se busca en las otras funciones misionales e identifica su público externo relevante y explicita los impactos externos buscados.

Por último, la institución ha de contar con recursos y medios de gestión para la planificación y ejecución de las acciones comprometidas.

Criterio 12. Resultados e impacto de la vinculación con el medio

Los resultados e impactos internos, y especialmente impactos externos, logrados por la institución son elementos claves en la evaluación de esta área. A través de este criterio se espera evidenciar el impacto positivo que realiza la universidad en su entorno relevante y en las funciones esenciales, es decir en docencia e investigación o innovación.

³ Art.19. Título III, Ley 21091 (2018)

Dimensión 5: Investigación, creación y/o innovación.

Se requiere contar con políticas y actividades sistemáticas para el desarrollo de la investigación, creación e innovación cuyos resultados incidan en las respectivas disciplinas, la docencia, la esfera pública, la actividad productiva, el medio cultural y la sociedad.

Criterio 13. Política y gestión de la investigación, creación e innovación.

Se espera que las universidades expliciten la investigación e innovación en sus misiones y propósitos institucionales, así como cuenten con una estructura adecuada para su planificación gestión, planificación y desarrollo.

Criterio 14. Resultados de la investigación, creación y/o innovación.

Acá se trata de evaluar principalmente los resultados logrados en dos aspectos: productividad y contribución o impacto. Desarrollo más avanzado implicaría incremento en la investigación e innovación en todas las disciplinas que la universidad cultiva; impacto a nivel nacional e internacional; adjudicación de fondos abiertos y competitivos; difusión de resultados a nivel internacional, sustentabilidad de doctorados acreditados. Por último, también implica el análisis sistemático de la investigación e innovación como contribución a la formación de los estudiantes, tanto de pregrado como postgrado.

Conclusiones.

Para llevar a cabo una adecuada implementación de las dimensiones y nuevos criterios y estándares de acreditación institucional, y con ello contribuir al mejoramiento de las instituciones y de la calidad del sistema, se requieren esfuerzos adicionales por parte de la CNA y de las propias instituciones de educación superior.

En cuanto a la CNA, sugerimos:

Esclarecer de qué forma se concretará la evaluación institucional integral. Entendemos que la integralidad estaría determinada por una evaluación multidimensional que incluye todas las funciones institucionales que explicita la ley en todas sus sedes, niveles, modalidades y jornadas de programas formativos y por otra, por una muestra intencionada de programas cuyo objetivo debería ser verificar en ellas

la consistencia interna, a través de evaluar la coherencia, integridad, pertinencia, eficacia con lo establecido a nivel institucional para dicha función y la aplicación del sistema interno de aseguramiento de calidad. Suponemos que de esta forma la evaluación reflejaría la calidad institucional como concepto integrado.

Elaborar y dar a conocer prontamente el procedimiento de selección de carreras y programas de estudio de pre y postgrado (muestra intencionada) que serán evaluados en el contexto de la acreditación institucional integral. Adicionalmente, será necesario explicar cómo se integra la revisión de esta muestra con la evaluación institucional integral en base a las nuevas dimensiones, criterios y estándares.

Establecer lineamientos o acciones para la comprensión y aplicación de los criterios y estándares como herramientas que incentivan el desarrollo académico y entregan orientaciones sobre caminos posibles a seguir para ello. Ello implica asumir, sobre todo, la función de promoción de la calidad de la diversidad de proyectos institucionales existentes.

Seleccionar rigurosamente a los pares evaluadores poniendo énfasis en la idoneidad académica y la trayectoria reconocida en gestión universitaria que poseen. Ambas características parecen más relevantes que la experiencia previa como par evaluador. Adicionalmente, capacitarlos en torno a los descriptores que se plantean en los estándares como elementos de análisis del desarrollo progresivo de los criterios.

Revisar y actualizar los procedimientos para la acreditación institucional que en adelante deberán ser “integrales”. Buscar lo esencial y evitar añadir mayor burocracia (a CNA y a las IES). Intentar pilotear procesos y la aplicación de criterios y estándares en función de las dimensiones de la acreditación institucional integral, previo a su implementación en dos años.

Dentro de dos años, realizar seguimiento de la implementación de los nuevos criterios y estándares, analizar sus efectos e ir consolidando experiencias que orienten la mejora del instrumento.

En cuanto a las universidades, sugerimos:

Analizar qué aspectos de la nueva acreditación institucional son de continuidad y cuáles resultan novedosos respecto de las dimensiones, criterios y estándares. En función de ello, tomar decisiones institucionales a nivel político, estratégico y operacional para adecuarse en lo que sea necesario, cuidando la continuidad del respectivo proyecto institucional. Por ejemplo, resulta conveniente revisar, actualizar y formalizar políticas institucionales referidas a las nuevas dimensiones.

Crear instancias de difusión y deliberación, tanto académica como administrativa, acerca de los cambios que se introducen, su sentido y sus posibles consecuencias. De esta forma se podrían resolver dilemas y desafíos, y también fortalecería el compromiso, la gestión y las estrategias que sean necesarias para responder institucionalmente al nuevo marco.

Formalizar el aseguramiento interno de la calidad de tal forma que permita cumplir los estándares exigidos y además, resguardar que éste sea consistente con el proyecto universitario y su cultura académica. Así podrá ser percibido como una herramienta para incrementar la calidad y no como nuevo procedimiento burocrático.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

AGUAS ANDINAS S.A.

ALSTOM CHILE S.A.

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

COLBÚN S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

EMPRESA CONSTRUCTORA GUZMÁN Y LARRAÍN LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

ENEL GENERACIÓN CHILE S.A.

FLUOR CHILE S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

SUEZ MEDIOAMBIENTE 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 INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

ZAÑARTU INGENIEROS CONSULTORES LTDA.



Wholesale & Investment Banking

Haciendo negocios diferentes

Agradecemos la confianza de nuestros clientes, depositada en Bci, para asesorarlos y apoyarlos en estas importantes transacciones.

 <p>Bono Corporativo</p> <p>Agente Estructurador y Agente Colocador</p>	 <p>Bono Corporativo</p> <p>Agente Estructurador y Agente Colocador</p>	 <p>Bono Corporativo</p> <p>Agente Estructurador y Agente Colocador</p>	 <p>Bono Corporativo</p> <p>Agente Estructurador y Agente Colocador</p>
 <p>Bono Securitizado Underwriting IFC</p> <p>Agente Estructurador y Agente Colocador</p>	 <p>Financiamiento Estructurado</p> <p>Agente Estructurador</p>	 <p>Financiamiento Estructurado</p> <p>Agente Estructurador</p>	 <p>Financiamiento Adquisición</p> <p>Agente Estructurador</p>
 <p>Financiamiento Adquisición</p> <p>Agente Estructurador</p>	 <p>Financiamiento Adquisición</p> <p>Renta Comercial Fondo de Inversión</p> <p>Agente Estructurador</p>	 <p>Financiamiento Corporativo</p> <p>Agente Estructurador</p>	 <p>Crédito Sindicado</p> <p>Agente Estructurador</p>
 <p>Project Finance Infraestructura</p> <p>Co-Agente Estructurador</p>	 <p>Fondo de Inversión Crédito Sindicado</p> <p>Filial Ameris Alternativos I</p> <p>Co-Agente Estructurador</p>	 <p>Estructuración Fondo de Inversión</p> <p>Asesor Financiero y Agente Estructurador</p>	 <p>Adquisición Paquete Accionario Cap</p> <p>Asesor Financiero</p>
 <p>Tender Offer</p> <p>Agente Colocador</p>	 <p>Valuation</p> <p>Asesor Financiero</p>	 <p>Crédito Sindicado</p> <p>Agente Estructurador</p>	 <p>Project Finance Proyecto Minero</p> <p>Mandated Lead Arranger</p>

Financiamiento Estructurado

Project Finance

Bonos

Asesoría y M&A

Reestructuración