

Revista Chilena de
INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 / N° 505 / Agosto 2025

Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 137, N° 2 / ISSN 0716 - 2340

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

Juan Carlos Barros Monge

Primer Vicepresidente

Ricardo Nicolau del Roure G.

Segunda Vicepresidenta

Ximena Vargas Mesa

Secretario

Germán Millán Valdés

Prosecretario

Mauro Grossi Pasche

Tesorero

Jorge Pedrals Guerrero

Protesorero

Javier García Monge

DIRECTORIO 2025

Alejandra Acuña Villalobos

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Pablo Daud Miranda

Rodrigo Fernández Aguilera

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Javier García Monge

Jorge Gironás León

Mauro Grossi Pasche

Cristian Hermansen Rebolledo

Viviana Meruane Naranjo

Germán Millán Valdés

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Verónica Patiño Sánchez

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Ximena Vargas Mesa

Scarlett Vásquez Paulus

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADÉMICAS

MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA DE SISMOLOGÍA
E INGENIERÍA ANTISÍSMICA, ACHISINA.

Presidente: Mario Lafontaine T.

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

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA, SOCHID.

Presidente: Jorge Gironás L.

SOCIEDAD CHILENA
DE GEOTECNIA, SOCHIGE.

Presidente: Paulo Oróstegui T.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
DE TRANSPORTE, SOCHITRAN.

Presidenta: Camila Balbontín T.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN
EN INGENIERÍA, SOCHEDI.

Presidente: Raúl Benavente G.

COMISIONES DEL INSTITUTO

Seguridad Hídrica.

Presidenta: Ximena Vargas M.

Infraestructura Digital para el Siglo XXI.

Presidente: José Orlandini R.

Encadenamientos Productivos en torno al Hidrógeno Verde en Chile.

Presidente: Cristian Hermansen R.

Desafíos para la Ingeniería en Relación con la Seguridad Alimentaria.

Presidente: Javier García M.

Ingenieros en la Historia Presente.

Presidente: Miguel Ropert D.

Convergencia Biológica Digital.

Presidente: Alejandro Steiner T.

Ingeniería y Seguridad (Ad-hoc).

Presidente: Raúl Manásevich T.

CONSEJO CONSULTIVO

Renato Agurto Colima

Raquel Alfaro Fernandois

Iván Álvarez Valdés

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Francisco Brieva Rodríguez

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Joaquín Cordua Sommer

Raúl Demangel Castro

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Sergio Lavanchy Merino

Agustín León Tapia

Nicolás Majluf Sapag

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Rodrigo Muñoz Pereira

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Andrés Navarro Haeussler

Ricardo Nicolau del Roure G.

Guillermo Noguera Larraín

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

José Rodríguez Pérez

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

Hans Weber Münnich

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



Nuestra portada

¿Qué es la escasez hídrica? Básicamente es un desbalance entre el agua que requerimos para nuestras actividades y el agua que tenemos disponible (fotografía: Markus Spiske en unsplash.com).

REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 505, agosto de 2025

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

DIRECTOR

Javier García M.

CONSEJO EDITORIAL

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

REPRESENTANTE LEGAL

Juan Carlos Barros Monge

SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

EDITORIAL.

Pág. 2

LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR COMO CAMINO A LA SEGURIDAD HÍDRICA EN CHILE .

Pág. 4

Conferencia del Sr. Alberto Kresse, Presidente de la Asociación Chilena de Desalación y Reúso, ACADES.

APORTES DE LA INGENIERÍA AL MANEJO DE LOS VIRUS RESPIRATORIOS.

Pág. 27

Conferencia del Sr. Leonardo Basso, Director del Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI).

MEDICIONES DEL BIENESTAR ORGANIZACIONAL.

Pág. 49

Capítulo 5, por Ricardo Nanjarí Román.

ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS.

Pág. 59

– SR. CLAUDIO MUÑOZ ZÚÑIGA.

EN MEMORIA DE SR. GERMÁN MILLÁN PÉREZ.

Pág. 63

El 30 de abril de 2025 se realizó la conferencia “**La Desalación de Agua de Mar como Camino a la Seguridad Hídrica en Chile**”, presentada por don Alberto Kresse, Ingeniero civil de la Universidad Técnica Federico Santa María y Presidente de la Asociación Chilena de Desalación y Reúso, ACADES. La seguridad hídrica es un tema muy relevante, no sólo para el futuro de nuestro país, sino también para toda la humanidad. En particular, la desalación de agua de mar es una excelente alternativa para enfrentar la eventualidad de una escasez de agua. **¿Por qué desalar?**, se pregunta el señor Kresse. Su análisis y respuestas se nutren de las perspectivas, necesidades y oportunidades, pero no ignoran las aprensiones y realidades, entre las que destacan el a veces innecesario exceso de consumo de energía eléctrica; la operación de los inmisarios y emisarios, los desafíos que plantea la disposición de la salmuera; el impacto de las obras marinas y de los productos químicos. Para dar contexto a su propuesta, se apoya en la situación que vivió Ciudad del Cabo en 2018 y explica que, en el día cero, cuando iban a partir las medidas más restrictivas de consumo de agua en la ciudad, pues ya se habían agotado todas las fuentes de suministro, se llegó al estado de escasez hídrica total: completo desbalance entre el agua requerida y el agua disponible.

Llevado esto al caso de Chile, recuerda la mega sequía de 14 años continuos de precipitaciones por debajo de los niveles promedio del siglo XX, en circunstancias que cualquier sitio del país está a menos de 200 km de la costa, lo que significa que tenemos una fuente prácticamente “infinita” de agua y sabemos desalar. Chile debe tener agua, llueva o no. Hay que recordar que en el mundo hay 20.000 plantas de desalación, de las que aproximadamente 9.000 (datos al 2021) son de agua de mar.

Concluyó su presentación exponiendo el caso de la planta de Caldera, que entró en operaciones el año 2021 y que el año 2022 obtuvo el premio del *Global Water Awards* a la mejor planta de desalinización del año.

El viernes 30 de mayo de 2025 se realizó la segunda conferencia del año, que tuvo como invitado a don Leonardo Basso, Director del Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI). El señor Basso es Ingeniero Civil y Máster en Ingeniería en Transporte de la Universidad de Chile y PhD en Economía de la Universidad de British Columbia. En su conferencia expuso sobre los “**Aportes de la Ingeniería al Manejo de los Virus Respiratorios**”, trabajo que ISCI realiza desde 2022 para apoyar al Ministerio de Salud, en las campañas de invierno, cuando los virus respiratorios estresan la red asistencial. Este trabajo se enlaza con lo que se realizó durante la epidemia de COVID, en que se usaron los modelos para predecir casos de atenciones de urgencia por causas respiratorias y con el papel que jugó la Ingeniería, al implementar la exitosa estrategia chilena de prevención del virus respiratorio sincial iniciada en 2024. Señala el señor Basso que, en el ISCI, comenzaron trabajando en esta materia a partir de 2023, con las campañas de invierno del Ministerio de Salud que, posteriormente, los llevó a colaborar de manera muy estrecha y relevante en la exitosa estrategia chilena de prevención del virus respiratorio sincial. Manifiesta que, en la pandemia, la idea era poder aportar con iniciativas que ayudaran al control de contagios, el cuidado de la infraestructura y del personal crítico, y con el análisis de factores socioeconómicos.

A la luz de lo observado al comienzo de la pandemia, en China y después en Europa, no existía más alternativa que la cuarentena, con el fin de tratar que la población no circulara, para evitar, de alguna manera, la transmisión del virus. Lo primero que se hizo, a través de un convenio con Entel, fue la transformación de la información de conexión de los celulares a las diferentes antenas que están en todo el país, para identificar la movilidad. Esto permitió entender lo que estaba pasando con nuestras cuarentenas, poniendo de paso la información a disposición de las autoridades y de toda la población, midiendo los efectos reales de esta drástica medida de reclusión.

El problema requerido a continuación era: ¿cuántas camas se tenían que habilitar, ahora, ya? El equipo de trabajo se enfocó, de inmediato, en la generación de un modelo más adecuado para hacer una predicción de corto plazo, pues el de inventario no era suficiente, debido a que los datos de casos sintomáticos llegaban tarde o simplemente no llegaban y el virus iba evolucionando. Para obviar este problema, crearon modelos de redes neuronales, entre otros, para luego generar una mejor predicción a partir de todos estos modelos que corrían en simultáneo. Una vez superadas todas las crisis, se pudo determinar que, pese a todos los problemas de la información recibida, se tuvo una tasa de falla de 4% a una semana y 9% a dos semanas.

El detalle de todos los pasos siguientes se encuentra en el documento inserto en el cuerpo de la revista. Lo concreto es que, cada vez con mayor precisión, fueron aproximando las predicciones de los modelos a la realidad, ampliando el campo de trabajo a otras enfermedades epidémicas. Chile fue el primer país del hemisferio sur que inició esta estrategia nacional universal, logrando coberturas óptimas, calificadas como las mejores del mundo, lo que le valió a este equipo de profesionales chilenos el reconocimiento internacional, al recibir el Premio *Franz-Edelman* en el año 2022.

El destacado ingeniero civil industrial, don Ricardo Nanjarí Román, presenta en esta edición el capítulo 5, “**Mediciones del bienestar organizacional**”, de su libro inédito: “**Bienestar y felicidad en organizaciones saludables: de la planificación a la ejecución**”, que identifica uno de los grandes desafíos de las organizaciones: lograr conciliar el éxito económico con el bienestar de sus colaboradores. Destaca especialmente que, cuando las empresas crean o analizan sus planes estratégicos, recurren a información de sus ventas, las cuotas de mercado, los cambios tecnológicos y sus impactos, la eficiencia de los procesos y los resultados financieros. Cuando se aborda el tema del bienestar de los trabajadores, los datos cambian y se transforman en conceptos e ideas, ya sea acerca de la felicidad, la calidad de vida, satisfacción o motivación.

Un rol importante en este objetivo consiste en determinar el mejor criterio de medición, para ayudar a que los planes conduzcan a resultados comprobables, a identificar oportunidades de mejora, a corregir desviaciones, a tomar decisiones y a ordenar prioridades. Las mediciones requieren “Indicadores”, los que proporcionan información relevante para la planificación, la toma de decisiones y el mejoramiento continuo, para cuantificar cambios y hacer seguimientos. Particulariza el ciclo de Mejoramiento Continuo, PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) y la Metodología SMART (*Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Timely*).

Se refiere, finalmente, al Bienestar y la Felicidad en el Mundo y en Chile, poniendo el foco en la Salud Mental de las personas, a través de la estrategia que combina un presupuesto y la priorización de este ítem en el área de Recursos Humanos. La tasa de retorno de la Inversión en Bienestar debe ser simple de medir, utilizar métodos y técnicas que sean creíbles y prácticas acordes a la cultura organizacional.

Se completa el contenido de esta edición, con un magnífico relato de la experiencia profesional y de vida de don Claudio Muñoz Zúñiga, un ingeniero que exhibe una extraordinaria trayectoria empresarial.

Además, se incluye un sentido homenaje del Instituto de Ingenieros de Chile a don Germán Millán Pérez, recientemente fallecido, quien fuera presidente del Instituto y a quien cupo una muy destacada presencia en grandes proyectos nacionales.

LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR COMO CAMINO A LA SEGURIDAD HÍDRICA EN CHILE

¿Por qué desalar? Aprensiones y realidades.
El desarrollo de la desalación en Chile.
Perspectivas, necesidades y oportunidades.

Sr. Alberto Kresse, presidente de la Asociación Chilena de Desalación y Reúso, ACADES.



Sr. Alberto Kresse.

El miércoles 30 de abril de 2025 —vía zoom—, ante una gran asistencia se realizó la conferencia “La Desalación de Agua de Mar como Camino a la Seguridad Hídrica en Chile”. En esta ocasión nuestro expositor fue don Alberto Kresse, presidente de la Asociación Chilena de Desalación y Reúso, ACADES.

El Sr. Alberto Kresse Zamorano es Ingeniero civil de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), con 29 años de experiencia en diseños de ingeniería, construcción, evaluación de empresas y consultoría; a cargo de la definición, control y ejecución de las inversiones en infraestructura del grupo Aguas Nuevas, empresa que opera servicios sanitarios en seis regiones de Chile, con más de 600 mil clientes. Entre sus funciones, es responsable de los procesos tarifarios de las filiales, de la elaboración de procedimientos para el seguimiento de obras y estudios, y de la evaluación técnica de negocios.

Actualmente es Gerente de Planificación de Aguas Nuevas y presidente de la Asociación Chilena de Desalación y Reúso, ACADES.

A continuación, su presentación.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente.

—Muy buenos días a todos y todas. Como presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, les quiero dar la más cordial bienvenida a esta conferencia que hemos titulado: “La desalación de agua de mar como camino a la seguridad hídrica en Chile”.

El Instituto de Ingenieros de Chile es una corporación sin fines de lucro que, desde hace 137 años, se ocupa de hacer aportes a la excelencia de la ingeniería, a su enseñanza y al desarrollo del país. En este contexto realizamos periódicamente foros, seminarios y charlas que se ocupan de temas que, por su relevancia para el país, requieren ser expuestos ante la comunidad.

Nuestra conferencia del mes de abril, que está dedicada a un tema muy relevante, no sólo para el futuro de nuestro país, sino que para el de toda la humanidad: la desalación de agua de mar como una alternativa para enfrentar la escasez de agua.

Agradecemos la participación en esta Conferencia de Alberto Kresse. Él abordará 3 temas: en primer lugar, nos planteará ¿por qué desalar?, posteriormente, nos comentará sobre el desarrollo de la desalación en Chile, y terminará con una visión sobre las perspectivas, necesidades y oportunidades que la desalación representa para el país.

Esperamos que esta conferencia nos inspire a trabajar juntos hacia un país más resiliente y seguro desde la perspectiva hídrica.

Muchas gracias.

Sr. Alberto Kresse.

—Muchas gracias, Juan Carlos. También buenos días a todos quienes están conectados (Figura 1).



Figura 1

ACADES: ¿Por qué desalar?

La desalación en Chile.

Como les decía Juan Carlos, vengo en representación de ACADES, la Asociación Chilena de Desalación y Reúso, que partió por allá por la pandemia el año 2022. Lo primero que quería abordar con ustedes es ¿por qué desalar agua de mar o agua salobre? (Figura 2).

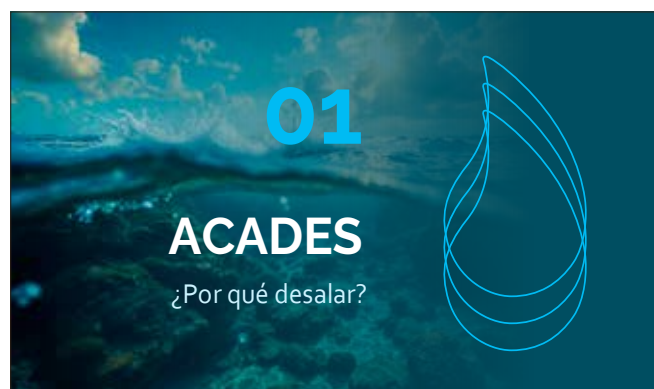


Figura 2

Y me gusta partir con la situación que vivió Ciudad del Cabo por allá por el año 2018. Creo que muchos de ustedes pueden haber escuchado del famoso “día cero” que se venía por ahí por abril o mayo de 2018. El día cero se denominó al día en que iban a partir las medidas más restrictivas de consumo de agua en la ciudad, correspondiente al “nivel 7”, que ya había agotado todas sus fuentes tradicionales o continentales.

A partir de ese día, se iba a cortar definitivamente el suministro de agua a través de redes y todas las personas tendrían que obtener su ración de agua haciendo colas, desde puntos de reparto previamente definidos. Felizmente para la ciudad, ese día no alcanzó a llegar. Se aplicaron todas las medidas hasta el nivel 6 —correspondiente a cortes programados en ciertas zonas—, entre otras: incrementos de precio gigantesco, prohibición de uso para un montón de actividades. Y partieron un plan que iba a rematar con una desaladora de agua de mar que debería estar en operación en estos días (Figura 3).



Figura 3

Pero esa situación que vivió Ciudad del Cabo tan crítica, la verdad es que no es propia sólo de esa ciudad de Sudáfrica, sino que también de muchos otros lugares: Montevideo ha estado meses con agua salobre saliendo de sus grifos. En México, Barcelona, en el sur de Francia, se prohibió el llenado de piscinas. O sea, es una situación que producto del cambio climático, ha estado dándose en todo el mundo. No estamos teniendo agua donde acostumbrábamos a tenerla y debemos ver otras fuentes o ir a buscarlas y que pueden estar un poco más lejos, un poco más saladas, un poco más contaminadas y que evidentemente requieren un esfuerzo de infraestructura y coordinación de recursos para disponer de ellas (Figura 4).

Si vamos a distintas fuentes, Chile siempre aparece entre los países más expuestos a las consecuencias del cambio climático. De hecho, en Latinoamérica es el más expuesto, de acuerdo con el World Resources Institute y es una condición a la que vamos a tener que acostumbrarnos. Sabemos que el escenario cambió un poco (Figura 5).



Figura 4

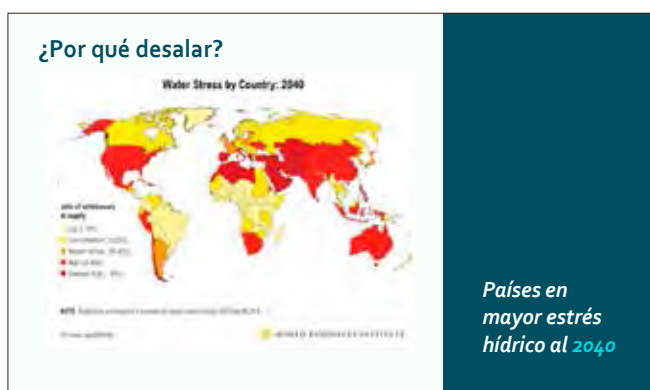


Figura 5

Pero cuando pensamos en esta escasez que se está dando en muchas partes, en el caso particular de Ciudad del Cabo, uno piensa ¿esto fue escasez hídrica?

¿Qué es la escasez hídrica? Básicamente es un desbalance entre el agua que yo requiero para mis actividades y el agua que tengo disponible.

Entonces, si vamos a Ciudad del Cabo y lo *googleamos*, uno mira las fotos de Ciudad del Cabo y lo que más ve es agua. ¿Entonces, cómo puede ser que Ciudad del Cabo haya llegado hasta esa condición? Uno ve que tiene unas marinas muy bonitas. Un estadio que parece olímpico. Quizá debió haber sido más prioritario haber asignado recursos para disponer de agua en todo momento, quizás se debió invertir en otro tipo de infraestructura.

Lo importante y que sí sabemos, es que el agua que tenemos hoy en el planeta es el agua que ha habido siempre. Es el agua que había en la época de los dinosaurios. Una de las

grandes magias del agua es que se transforma, que tiene un ciclo, que siempre está disponible en el planeta. Como les decía: un poco más lejos, un poco más contaminada, un poco más salada. Pero tenemos también el conocimiento y los recursos para la disponibilizar esa agua (Figura 6).



Figura 6

¿Qué pasa en Chile? En Chile, como todos sabemos, tuvimos una mega sequía: 14 años continuos de precipitaciones por debajo de los niveles promedio que habíamos tenido en el siglo 20. Eso hace que tengamos este cambio de escenario, donde lo que tenemos que determinar y lo que dicen múltiples estudios, no es si vamos a recuperar los niveles del siglo 20. La pregunta es, ¿cuánto más abajo va a estar en promedio nuestra pluviometría en los próximos años? Por lo tanto, cuánta menos agua vamos a tener disponible en nuestros ríos, en nuestros lagos, en nuestros acuíferos subterráneos. Podemos estar después, por lo tanto, tomando distintas decisiones: podemos trabajar para administrar esta escasez de recursos continentales o nos ponemos a rezar todos los creyentes, mirar al cielo y pedirle a San Isidro que llueva un poco más, o hacernos cargo de una condición distinta, hacernos cargo del problema.

Y en ese contexto, tenemos las herramientas para hacerlo. Todo Chile está a menos de 200 km de la costa. Tenemos una fuente —en la práctica— infinita de agua y sabemos desalar. Lo estamos haciendo, lo hemos hecho bien. Es un proceso que es muy conocido, muy controlado, muy monitoreado, pero nos enfrentamos muchas veces con las tensiones y con desconocimiento que hacen muy difícil desarrollar este tipo de proyectos (Figura 7).

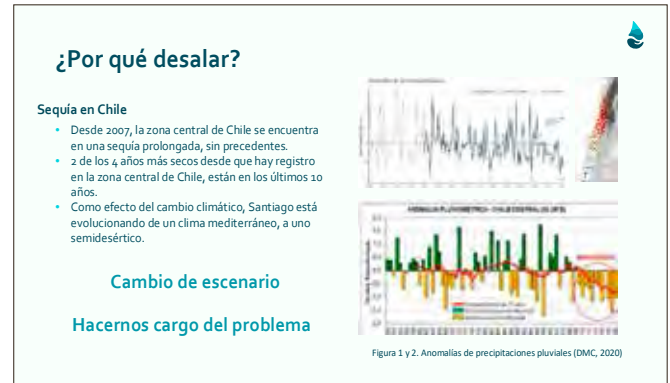


Figura 7

Por esa condición se forma en 2022 ACADES, una asociación, que la verdad es que no está por la desalación exclusivamente como tecnología, sino para que Chile tenga agua. Tenemos propósitos, misión, pero la parte que a mí más me gusta de nuestras declaraciones es la visión. Nosotros queremos que Chile tenga agua, llueva o no llueva. No tiene sentido estar pensando en racionamiento, no tiene ni un sentido estar pensando en afectar el funcionamiento de las ciudades por falta de agua, cuando tenemos la fuente a la mano. Esta comunidad o esta asociación parte con 12 empresas, un par de sanitarias, unos consultores, abogados, todos participantes en proyectos que muchas veces tenían una contraparte que nos hacían distintas exigencias. Pensamos que debíamos tener una voz única para validar y empujar este tipo de fuentes. Insisto, no solamente desalación de agua de mar, sino que reúso de aguas servidas o todas las nuevas fuentes. Todas las fuentes no convencionales de agua son válidas, en la medida que podamos apuntar a esta visión de que Chile tenga agua (Figura 8).



Figura 8

Hoy día somos prácticamente 80 empresas. Ya que tenemos distintos estamentos, como les decía ahora mismo Juan Carlos, esto es bien variopinto. Tenemos oficinas de abogados, servicios jurídicos, financieros, proveedores, consultores de ingeniería, tecnólogos, desarrolladores de proyectos y lo que llamamos los *owners*, que son los que operan muchas de estas instalaciones y los mandantes de este tipo de proyectos.

Y todos estamos con el mismo foco, ¿cómo hacemos que Chile tenga agua en el futuro? Entonces, ¿por qué desalar? Porque cambió el escenario, porque tenemos necesidades y porque sabemos que tenemos una tecnología y una alternativa a la mano, que vamos a ir planteando a lo largo de la presentación y que todos tenemos que empujar como sociedad (Figura 9).



Figura 9

Desalación de agua de mar.

Vamos a la desalación de agua de mar entonces. Si tenemos esta alternativa para suplir la escasez hídrica de las fuentes continentales ¿por qué no estamos yendo hacia allá? (Figura 10).

Vamos viendo.

Primero, yo les decía que esto es una fuente prácticamente infinita. En la práctica, toda la humanidad en la historia se ha podido abastecer de agua a lo largo de todo nuestro desarrollo, principalmente con agua continental o agua dulce. Como ustedes deben saber, representa un 3% del agua total, y de esa, la verdad que estamos trabajando con

un 1% de ese stock, que es el agua que está más o menos accesible para el ser humano. Hemos lidiado con mucho menos del 0,5 por ciento del agua disponible en el planeta, para abastecer todo nuestro desarrollo como humanidad. O sea, una fuente que, además, al ser parte de un ciclo, es en la práctica infinita (Figura 11).



Figura 10

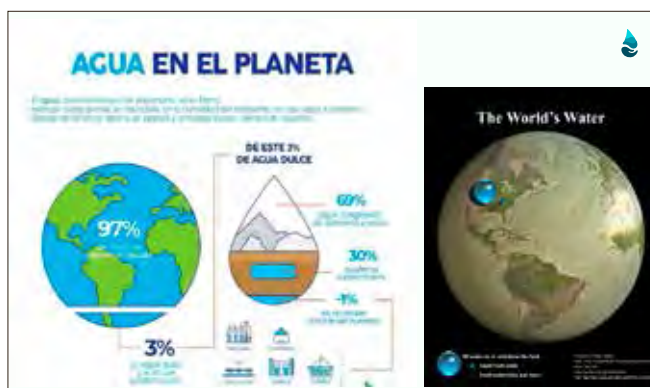


Figura 11

¿Qué es la desalación? Básicamente tomar esta agua salada o salobre, porque también tenemos agua que tienen contenidos de sales más bajos dentro del continente, separarla y extraerle la sal con distintas metodologías. Pero normalmente, en el caso de la osmosis inversa, concentrando las sales en la mitad del agua de mar que yo saco y dejando la otra mitad del agua sin sal. Ese es más menos el concepto general. De hecho, acá en la osmosis inversa, que vamos a ver a continuación, normalmente la tasa de recuperación de agua respecto del agua de mar es cercana al 45% de agua desalada respecto al agua de mar (Figura 12).

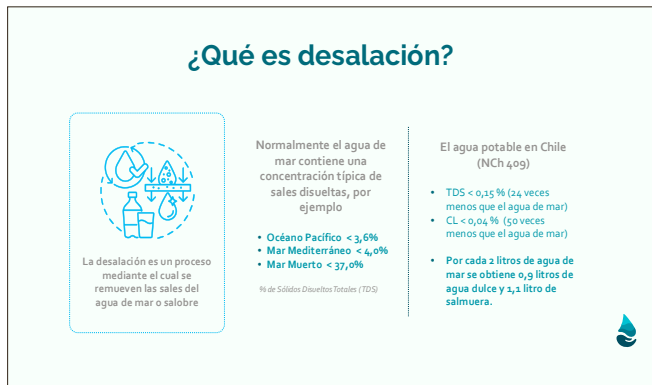


Figura 12

¿Esto es algo nuevo en Chile? Tenemos sistemas de desalinización en Antofagasta desde el siglo 19. Luego se han desarrollado múltiples procesos térmicos, pero hoy en día la principal técnica utilizada para quitarle la sal al agua de mar es la osmosis inversa. Son procesos físicos donde el agua a alta presión la hacemos pasar a través de una membrana que se llama precisamente osmosis inversa, muy fina, que ayuda a retener prácticamente todas las sales del agua de mar, en aproximadamente la mitad del volumen inicial (Figura 13).



Figura 13

El proceso cuenta con la captación de unas torres que se ubican a una cierta altura, donde se capta el agua de mar, se bombea hacia los sistemas; normalmente se hace un tipo de filtración inicial porque las membranas de osmosis inversas son muy delicadas, son muy finas y no queremos que se obstruyan. Por lo tanto, hago el proceso de filtración muchas veces en etapas y luego paso a la de la osmosis, donde tengo que ponerle altísimas presiones, estamos hablando de 400

metros cúbicos de agua aproximadamente y, la mitad del agua se desala completa, al punto que en los sistemas que son de abastecimiento de agua potable o cuando tengo que transportar el agua, le tengo que agregar algunas sales, un poco de cal y otras sales para que el agua no sea corrosiva y se entrega al consumo.

El agua con las sales que recién saqué del mar, ahora concentrada en la mitad de volumen, por lo tanto, al doble de concentración, normalmente se descargan directamente de vuelta al mar, devolviendo la misma sal que acabo de sacar. Es un proceso.

Ahora, el agua que se entrega, por ejemplo, a consumo humano, luego pasa por la ciudad y sale como agua servida que se trata y se disponen de vuelta, normalmente en el medio marino. En ese sentido es suma cero, ya que después devuelvo al mar la misma agua que se acaba de sacar, así como le devolví las mismas sales (Figura 14).



Figura 14

En el mundo hay 20.000 plantas de desalación. De esas, aproximadamente 9.000, datos al 2021, son de agua de mar (Figura 15).

En Latinoamérica, Chile es líder con 24 plantas y todo eso lo tenemos en un catastro que identificó plantas de tamaño industrial de 20 litros por segundo hacia arriba. La mayor parte está concentrada en Antofagasta y da con una capacidad total del orden de 10.000 litros por segundo, que son utilizados aproximadamente 3/4 partes, 70 o 75% por la minería, y el resto principalmente hacia el consumo humano. Las ciudades de Antofagasta, Tocopilla, Mejillones, Caldera, Chañaral se abastecen 100% con agua desalada de

mar. Copiapó también y Tierra Amarilla, con una parte importante y algunas caletas y sistemas menores también dentro de otras ciudades.

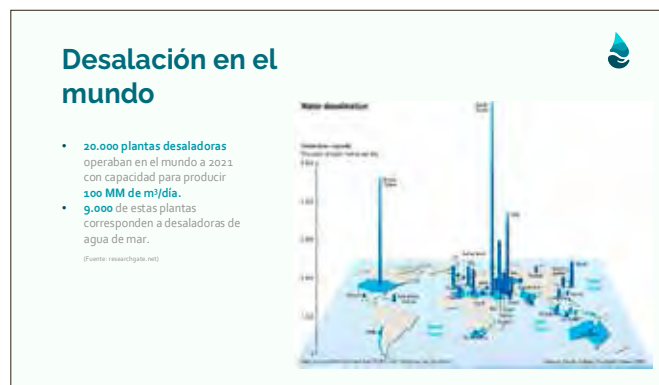


Figura 15

Con 24 plantas en Chile, somos los líderes en desalación en Latinoamérica. ¿Dónde están los mercados grandes? Básicamente en España, Israel, Arabia, todo el Golfo Pérsico y en Australia.

O sea, tenemos un sistema muy expandido, con mucha historia, que ha ido mejorando radicalmente en el tiempo, pero aun así estamos llenos de mitos. Y mucha gente piensa que la salmuera es casi un barro tóxico blanco que va matando a todos. Lo hemos escuchado, por eso se lo estoy contando (Figura 16).

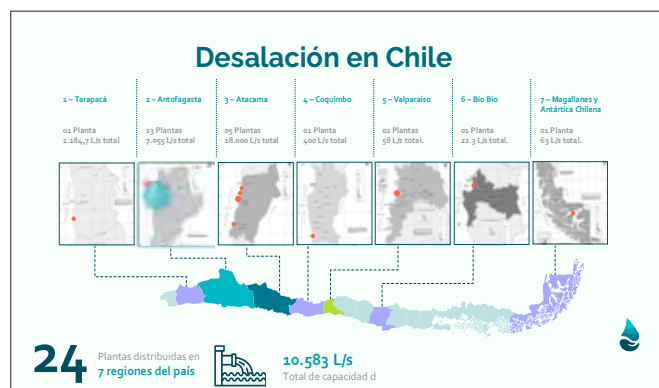


Figura 16

Apreensiones: Mitos, realidades y conocimiento.



Figura 17

Entonces, queremos un poco antes de ir a la visión y a algunos números, ver algunas de estas apreensiones que se tienen. ¿Por qué? Porque “lo nuevo” en general, genera algún tipo de desconfianza y se exacerban algunos miedos. Y aparecen una serie de temores que redundan en algunos mitos.

Es muy interesante la “historia del tenedor”. Lo dejo de tarea para que lo busquen y lo googleen, que tiene que ver precisamente con esto. Pero ha pasado a lo largo de toda la historia: con los celulares, con la electricidad, con las vacunas. La gente genera ciertas teorías que empiezan, sobre todo hoy día en los medios y redes sociales, generando mitos o *fake news* (Figura 18).

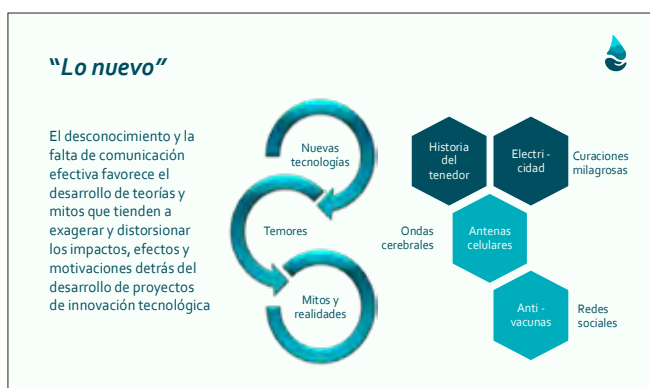


Figura 18

1. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

¿Entonces, qué ha pasado? Aquí tenemos varios temas. Se habla mucho de consumo energía eléctrica. Hoy día el consumo de energía que se requiere para desalar 1 metro cúbico de agua de mar está cercano a los 3 a 3,5 kwh/m³. La planta de Caldera, que la vamos a ver un poco más adelante, que opera Nueva Atacama para suplir Caldera, Chañaral, Copiapó y Tierra Amarilla tiene un consumo de 2,7 o 2,8 kilowatts hora por metro cúbico. ¿De qué estamos hablando? de que una familia de cuatro integrantes con un consumo que debe ser de 100 o 120 litros por persona al día, la energía que requeriría para desalar el agua que se consume en esa familia, es equivalente más o menos a 60 minutos de una plancha o de una estufa eléctrica, 40 minutos de un hervidor. Esa es la energía que se necesita para disponibilizar agua de mar desalada para una familia de cuatro personas.

Todos estamos por la electromovilidad, ¿cierto? Si lo llevamos a la electromovilidad, estamos hablando del consumo de 4 km de un auto eléctrico, promedio. O sea, sí es mucho más intensiva en energía que, por ejemplo, sacar agua de un pozo o de un río, pasándolo por un proceso de filtros gravitacionales, evidentemente. Se requiere mucha más presión, mucha más energía, pero respecto de las actividades cotidianas o de los consumos normales de una familia, es un valor sumamente razonable y que se ha optimizado significativamente en los últimos 20 o 30 años. Cuando yo partí estudiando esto, en otro tipo de procesos tarifarios de empresas sanitarias, siempre se habla de 4 a 5 kilowatts hora por metro cúbico y ahora estamos en 2,7-2,8; ya con un promedio cercano, como les decía, a los 3-3,5. Además, muchos de los proyectos hoy día están siendo suministrados a través de contratos específicamente con energías renovables no convencionales. El mismo ejemplo que les daba de Caldera o la planta de agua de Antofagasta, tienen convenios con fuentes de energía solar o eólica, que están siendo los proveedores de energía para este tipo de proyectos (Figura 19).

2. OPERACIÓN DE LOS INMISARIOS.

Segunda aprehensión. Pero ¿qué pasa con los inmisarios? Ustedes captan agua del mar y se chupa a los peces, nos dice mucha gente, ¿cierto? Y, además, arrastran el fondo marino.

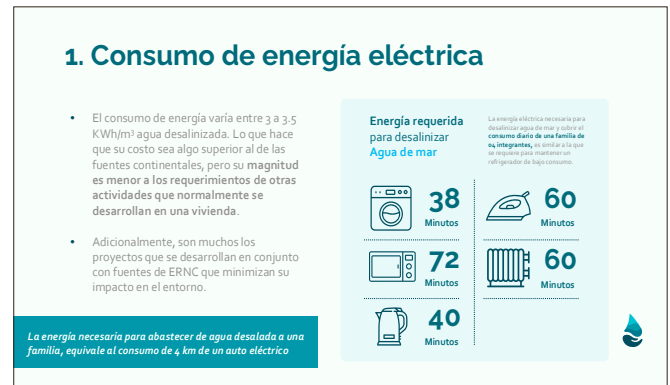


Figura 19

Bueno, en general hay un montón de normativas, de estándares, muchos de ellos que tomamos nosotros como referencia principalmente de Australia y España, que establecen criterios que son los que se han utilizado en Chile para diseñar las instalaciones. Entre otros, la velocidad de captación en la torre, que se ubica a una cierta distancia del fondo marino y a una cierta distancia en la superficie, que es donde más se genera la vida en el medio marino. La velocidad de inmisión es de máximo 0,15 m/s. Prácticamente no hay especies, no hay pez que no pueda salir nadando sin ningún problema. Esto se ve normalmente. Lo que menos queremos nosotros es que se nos meta todo tipo de *biota* dentro de estas líneas. Por lo tanto, se le ponen mallas, se le ponen filtros y todo tipo de cortinas, buscando minimizar precisamente eso, pero con el cuidado de que, además, la velocidad en esa zona no supere los 0,15 m/s.

Como les decía, esto se instala a varios metros sobre el suelo, se hace una caracterización de la *biota* en la zona de la captación. Es toda una serie de estudios para minimizar el ingreso de esta biodiversidad dentro de las líneas. Muchas veces, se van incrustando bivalvos en las líneas y hay que hacer limpieza periódica de ese tipo de vida dentro de los tubos.

También estamos buscando modelos y herramientas para minimizar el ingreso de plancton y especies microscópicas que van a pasar por estas barreras de filtro, porque al final igual nos generan algún tipo de dificultad en el proceso propiamente tal (Figura 20).

2. Operación de los inmisarios

- ¿La toma de agua de mar ¿se "chupa" a los peces?

La captación de agua de mar de los sistemas de desalación se diseña considerando velocidades del agua ($0,25 \text{ m/s}$) que permiten la salida de peces y otras especies en caso de pasar las mallas y **barreras** normalmente utilizadas para proteger estas instalaciones.

- ¿A qué nivel se hace la captación?

La captación se hace también **varios metros sobre el suelo**, para evitar la alteración del fondo de marino.

Asimismo, se trabaja en modelos y diseños que **minimicen el ingreso** a la captación de plancton y especies microscópicas, de manera de acotar eventuales afectaciones a estas especies y a los ecosistemas relacionados.



Figura 20

Video: Tengo un vídeo que me mandó Humberto Díaz. Se muestra cuál era la fuente en la que estaba buceando y monitoreando la instalación. Como se puede ver, el lugar está lleno de vida. Y los peces están muy cercanos a la captación.

¿Se podría evitar la entrada de plancton? Hoy día hay herramientas para tratar el ingreso de plancton y de fitoplancton, de zooplancton, de larvas. Hay un montón de herramientas que se están utilizando precisamente para proteger la captación (Figura 21).

¿Es posible Evitar la entrada de plancton?



Figura 21

Hay cortina de burbujas con distintos proveedores canadienses, chilenos, o noruegos. Los que se han utilizado exitosamente, básicamente para prevenir, sobre todo las medusas que tienden a bloquear en algunas zonas estas torres de captación. O sea, las torres de captación buscan captar el agua con la menor cantidad de *biota* posible. Hoy día existen técnicas y eso se logra.

Los peces que lograsen pasar, que llegan hasta la zona de la reja o filtro para su retiro, son normalmente cantidades muy bajas. En el caso de varias plantas que se han evaluado en Chile, lo que se saca de ahí es menor al consumo de uno o 2 pelícanos en promedio. Y las larvas, que pasan eventualmente hacia el proceso, se miden en peces adultos equivalentes y, normalmente, estamos hablando de que en la mayoría de los casos que hemos analizado, son menores al 1% de las cuotas de pesca de las especies de cada zona: estamos hablando de 0,2 o 0,3%. Estos son los números que se observan en proyectos como el de la planta de Aguas Pacífico, en la quinta región. De todas formas, vamos a seguir buscando técnicas y aplicándolas para minimizar esto, pero no tiene un impacto realmente significativo en el entorno (Figura 22).

¿Es posible evitar la entrada de plancton?

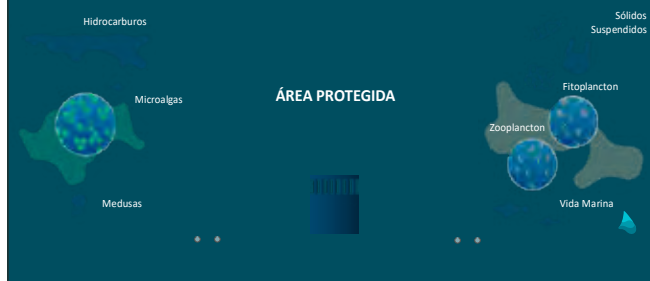


Figura 22

3. EMISARIOS Y SALMUERA.

Pero más allá de estas aprensiones, la que normalmente aparece como el temor más expandido, tiene que ver con la salmuera que, en realidad, es el agua de rechazo del proceso que tiene el doble de concentración de sal que el agua de mar. Un poquito menos, estamos hablando de un 6% de salinidad. Porque como les decía al principio, el agua de mar la captamos, la pasamos a través de estas membranas con alta presión y el agua que pasa —que es un poco menos de la mitad—, queda sin ninguna sal y la otra mitad queda con todas las sales que recientemente habíamos sacado del mar (Figura 23).

Pero vamos viendo este fantasma que aparece con la salmuera. ¿Cómo se descarga? Normalmente la salmuera se descarga a través de emisarios submarinos que tienen una serie de difusores donde tratamos de maximizar la dilución inicial.



Figura 23

Esto es como la challa de la ducha, una cosa es que salga todo con un gran chorro concentrado en un punto; otra cosa es que yo pueda usar una challa que disperse más rápidamente el agua con sal concentrada. Si esta challa fuera infinita, básicamente tendría un impacto cero en el fondo marino.

Acá sí hay una zona donde hay más salinidad. Es agua la que se descarga, no es barro tóxico, es agua con el doble de sal y, rápidamente esa salmuera se dispersa y se equipara su concentración con la del entorno. Estoy hablando de plantas que estamos monitoreando como la de Caldera, o el modelo que se está aplicando en Quintero en el proyecto de Aguas Pacífico, y tenemos una diferencia de concentración respecto del entorno, menor al 5% que es el estándar australiano, que eso considera que ya está fuera del área de influencia (Figura 24).



Figura 24

¿Qué pasa en esta área de influencia? Vamos viendo. Se hacen estos modelos de dilución, se utilizan distintos elementos, se modela todo, olvídense de la cantidad de tiempo que uno tiene que dedicarle a la caracterización del medio marino como elemento corriente. Se fondean correntómetros por campañas de verano e invierno. Estamos hablando que, en varios meses, estos correntómetros toman registros, hacen mediciones en profundidad, estudios de oleaje. Derivadores hacen modelos de dilución inicial y luego de dispersión de estas concentraciones de sales.

¿Todos esos modelos de información, en qué redundan? En que la zona en torno al difusor, la que tiene mayor salinidad, en la planta más grande de Chile, es cercana a 1/4 de una cancha de fútbol. La planta que opera en Nueva Atacama, en Caldera, la zona de mayor salinidad vista en planta es más chica que una cancha de tenis. Si hubiese una zona de afectación, estamos hablando de una superficie del tamaño de una cancha de tenis, en el caso de Caldera. Esto les permite a las ciudades de Caldera, Copiapó, Chañaral y Tierra Amarilla tener la seguridad de que contarán con agua, llueva o no llueva. Zonas que ya tuvieron cortes de agua los años 2012 y 2013, precisamente porque bajaron los niveles de los acuíferos al punto que no podían ser explotados. Con esta solución que tiene una zona “de influencia o de afectación”, más chica que una cancha de tenis, la verdad es que se puede dar seguridad hídrica a estas regiones (Figura 25).



Figura 25

Video: Pero la pregunta que me hago a continuación, ¿es realmente una zona que está afectada? y acá voy a ir directo al video. Esta es una filmación. El vídeo es de la descarga de la planta de Caldera. Como se puede ver, parece un

acuario. Está lleno de vida, una zona que tiene un poco más de salinidad, sí, pero que no tiene una sola especie que podría verse afectadas por la salinidad un poco más alta. Se tiene hecho un catastro.

Por lo tanto, en general en el tema de la salmuera hace mucho rato que dejó de ser tema, ya no es algo que realmente genere algún tipo de preocupación particular. Mucha gente nos pregunta ¿y va a aumentar la salinidad de los océanos si hubiese muchísimas plantas? Como les decía, esto tiene suma cero. Lo que se capta se devuelve, con las mismas sales que tiene el mar originalmente. Y si nosotros pudiéramos sacar el agua directamente del mar sin tener que hacer esta separación en Tierra, estaríamos haciendo lo mismo que hace la naturaleza. La naturaleza evapora agua de mar y es lo que hacen las 20.000 plantas que hay en el mundo, que es más o menos la milésima parte de lo que hace la naturaleza todos los días cuando se evapora agua de mar. Nosotros aceleramos este ciclo básicamente.

Otra cosa que nos preguntan es: ¿Hay aumento de la temperatura? En general, prácticamente todos los procesos que hoy día se destinan a desalación de agua de mar como producto se hacen a partir de procesos físicos, como la osmosis inversa, no son procesos térmicos. En los procesos térmicos que todavía se aplican en algunas partes, normalmente el agua desalada también es un subproducto de una torre de enfriamiento donde se capta el vapor y se aprovecha a desalar agua de mar, pero no es el foco inicial del proyecto (Figura 26).



Figura 26

4. OBRAS MARINAS.

Volvemos, entonces ¿hay otras aprensiones? Sí, hay aprensiones respecto a las obras marinas y lo que se refiere al ruido submarino, a la aplicación de tronaduras, que a veces son necesarios cuando no se hacen tuneleras, por ejemplo, o la resuspensión del sedimento. En todas estas áreas, créanme que hay muchas oportunidades, además, hay mucha tecnología, hay mucho diseño, hay muchas técnicas de construcción que hoy día han minimizado estos efectos y por supuesto que los tenemos que monitorear, por supuesto que tenemos que hacer el seguimiento a todos estos efectos, tal como se hace en cualquier tipo de instalación (Figura 27).



Figura 27

5. PRODUCTOS QUÍMICOS.

Respecto a los químicos, nosotros tratamos de minimizarlos. En general, todo se neutraliza previo a su descarga. Las concentraciones son muy bajas y estos productos ya están neutralizados. En general, se utilizan sobre todo en consumo humano, productos que tienen que ser autorizados por la autoridad marítima y por la autoridad de salud correspondiente.

Desde ACADES estamos diseñando hace un tiempo un proyecto de transparencia operacional. Lo que me encantaría tener es este mismo vídeo que acabamos de ver aquí en línea, para que lo viera cualquier persona, en cualquier momento del día, como pasa con las calles de muchas ciudades de Chile. Para generar esa confianza, de que es un proceso conocido, donde hay mucho análisis, mucha ingeniería en el diseño, en los efectos, y con modelos que me encantaría que pudiésemos tener registro en línea que estuvimos calibrando permanentemente que es lo que se hace.

Se hizo una memoria en la Universidad Santa María, donde básicamente una estudiante tomó todos los planes de vigilancia ambiental, todos los modelos de los estudios de impacto ambiental y los contrastó con las mediciones de estos planes de vigilancia y, en general, las mediciones de salinidad terminaron siendo menores, hasta la fecha, que las que se había modelado inicialmente en el proyecto.

El registro en línea es un desafío técnico súper interesante. Hemos estado viendo con distintos proveedores cómo puedo tener un sistema que ayude a medir salinidad y tener estos modelos calibrados en línea. No es fácil, tanto desde el punto de vista técnico, como también de seguridad. Hemos sabido de algunas boyas que han puesto algunas empresas que han aparecido luego vendiéndose en una feria de pulgas en algunas localidades (Figura 28).

5. Productos químicos

Aspectos Claves	Neutralización y control de impactos
Desafíos	Reactivos químicos en pretratamiento que acondicionan agua para desalinización
Mitigante	- Neutralización de productos químicos. - Productos químicos autorizados por la Autoridad Marítima. - Registro y transparencia

Proyecto de Transparencia operacional / Calibración de modelos / Registros en línea



Figura 28

Visión: ¿Dónde queremos estar? ¿Cuáles son los costos?

Por lo tanto, tenemos la necesidad de contar con agua porque cambió el escenario. Sabemos, además, que existe la oportunidad de hacer un proceso que es controlado, que es conocido, que puede ser súper amigable con el medio ambiente, que puede utilizar energía renovable no convencional, cuyo impacto, realmente, es una cuestión muy acotada y la verdad que muy menor. Entonces, ¿cómo deberíamos avanzar?, ¿dónde querríamos estar? (Figura 29).

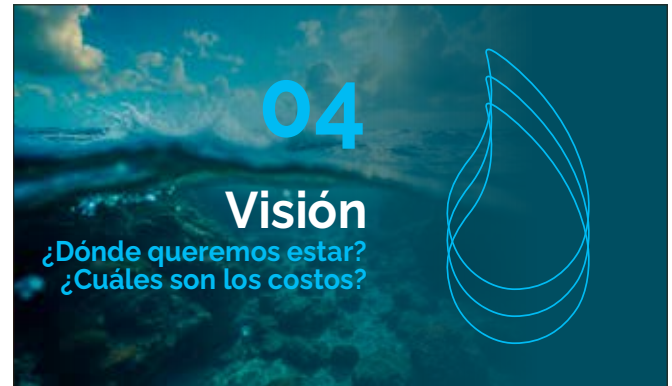


Figura 29

Reflexiones.

Y la reflexión que nosotros hacemos, nos encantaría que todo Chile tuviese seguridad hídrica. Que tuviese agua, llueva o no llueva. Que estemos en las condiciones de Antofagasta, Tocopilla, Caldera, Chañaral, Copiapó en lo que se refiere a la disponibilidad de agua. O que esté en el estándar de Australia. Australia pasó por una condición de sequía muy similar. ¿Y qué hizo? Empezó a construir desaladoras de agua de mar, recuperó las condiciones del continente. Empezó a llover y siguieron construyendo desaladoras de agua de mar. ¿Y por qué lo hizo? Porque los australianos entendieron la importancia de la seguridad hídrica y lo que hacen hoy día es mantener un equilibrio, vale decir: si no llueve ocupo más la desaladora; si aumentan mis fuentes continentales bajo el uso de las desaladoras y se mantiene el equilibrio de todas las fuentes y tienen esta seguridad que les permite hacer crecer y desarrollar las ciudades (Figura 30).

Reflexiones

¿Dónde queremos estar?

Ciudades en Chile:
Antofagasta, Tocopilla, Caldera, Chañaral, Copiapó tendrán agua... llueva o no llueva

Australia:
Melbourne, Sidney, Brisbane, Perth, Adelaide

Equilibrio y seguridad en sus fuentes...para todos sus usos



Figura 30

Visión.

¿Dónde quisiéramos estar? Esta es la foto que les decía de la planta de Caldera, la construyó ECONSSA, una empresa del Estado. La opera Nueva Atacama desde el año 2021 y el año 2022 obtuvo el premio del Global Water Awards a la mejor planta de desalinización del año. 5 razones: proyecto público-privado para agua potable, con energías renovables no convencionales, que se construyó con tunelera, no tocó el borde costero y además tiene un consumo de energía de los más eficiente del mundo: 2,7 a 2,8 kilowatt hora por metro cúbico.

¿Y en esta foto que está acá? Aparecen las 2 boyas, créanme que cuando vayan para allá, están invitados todos, van a ver 2 boyas, una del inmisario y otra del emisario. Donde está precisamente la captación y donde está la salida. Están a 75 metros una de otra. Seríamos muy poco inteligentes de poner la captación cerca de la descarga si es que tuviésemos la percepción de que, eventualmente, la descarga llegue allá y estuviésemos captando muchas más sales. Pero es tan rápida la dilución, tan eficiente y conocido, que están instalados como les decía, a 75 metros una de otra (Figura 31).

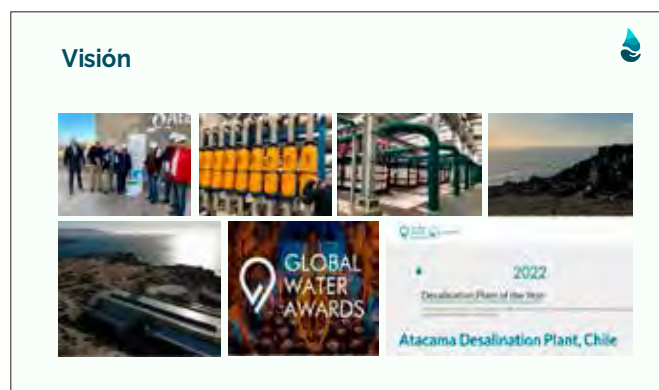


Figura 31

A nivel de la producción de agua desalada, estamos hablando de entre 1 o 2,2 dólares por metro cúbico la experiencia en Chile. Evidentemente, depende mucho de una serie de condiciones, de las obras marítimas y, sobre todo, también de la escala. En una planta chica, proporcionalmente, es mucho más caro el dólar por metro cúbico, que en una planta más grande. Y son mayores los costos. Son más altos que sacar agua de un pozo, por ejemplo, o sacar agua

de un río. Pero ¿qué hago cuando no tiene agua el pozo, cuando no tiene agua el río? ¿Suspendo la operación de la ciudad?, ¿afecto todo el crecimiento, el desarrollo de la ciudad? Debo tener una alternativa.

Esto nos ha pasado en Chile con otras fuentes. En el caso del río Maipo, todos sabemos que Aguas Andinas tuvo que construir una laguna para tener 36 horas de autonomía, cuando el río baja turbio porque la isoterma subió, y porque donde nevaba ahora cae agua que arrastra el sedimento, y la planta de Las Vizcachas no puede operar. ¿Qué se hace en esas instancias?, Aguas Andinas va y abastece a Las Vizcachas desde unas lagunas gigantes que están en la zona de Pirque. ¿Cuánto cuesta esta obra? Del orden de 100 millones de dólares. ¿Cuánto fue el impacto en la tarifa de Santiago? Del orden de 1%.

¿Qué pasó en Magallanes, en Puerto Natales? producto de lluvias que no se habían registrado en 40 años, la turba, que es una condición natural de los ríos, hizo que la fuente de Puerto Natales se transformara en un té. Tenía filtración directa a la planta. Hubo que hacer una nueva planta, un floco-decantador, que opera un par de meses al año, cuando llueve y cuando se arrastra turba.

En esos casos, esto tiene impactos tarifarios. Aun así ¿cuánto vale eso? Bueno, la fórmula es la que está en la ley de tarifas del sector sanitario, básicamente paga una cuota por las inversiones, más los costos de operación, pero estamos hablando que, con todo, en Chile, los servicios sanitarios que incluyen todas las etapas de servicios cuestan entre \$1 y \$3 pesos por litro. ¿Esto podrá subir? En el caso de Aguas Andinas en 1 por ciento. En Aguas Magallanes no sé si será 5 puntos, 10 puntos lo que fuese. Pero la pregunta es ¿cuánto nos cuesta? ¿Cuánto es el costo de quedarnos sin agua? Pero no solamente el costo de quedarnos sin agua. ¿Cuánto es el costo de no saber si voy a tener agua? (Figura 32).

En el caso de Arica, hicimos otro análisis. Arica, que es una ciudad que se abastece de una batería de pozos de 2 valles, Azapa y Lluta. En Azapa hay del orden de 3.000 litros por segundo en derechos otorgados. La recarga sustentable, de acuerdo con la DGA y a muchos otros análisis que se han realizado en la zona, es cercana a los 700 u 800 litros por segundo. Eso podría ser el equivalente al 90% de excedencia de los ríos. ¿Qué pasa entonces si no sé cuánta agua tendré en el futuro cercano? Todos los veranos, la sanitaria de la zona que se llama Aguas del Altiplano, pasa susto porque

no sabe cuánto le van a rendir los pozos. El acuífero se mueve todos los años (Figura 33).



Figura 32

0,7 puntos porcentuales menos que lo que crecería con seguridad hídrica (Figura 35).



Figura 34



Figura 33

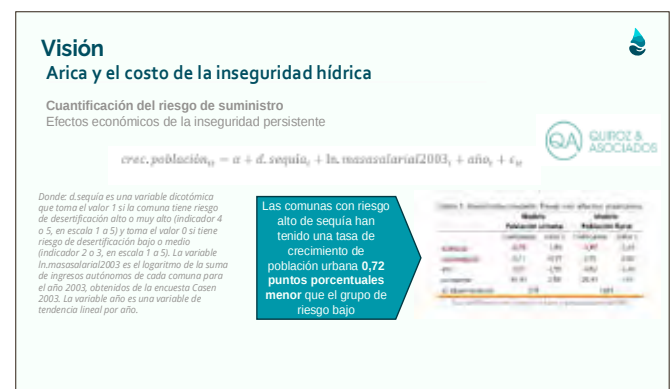


Figura 35

En esa condición de escasez, que le pasó a Coquimbo en algún momento, las ciudades tienden a crecer menos porque hay proyectos de tipo industrial, turístico, habitacionales que se desarrollan normalmente fuera de la zona de concesión de las sanitarias. Y si las sanitarias no tienen certeza de que van a tener agua para sus clientes regulados, es mucho más complejo decirle a un señor inversionista de un proyecto turístico, por ejemplo: yo le puedo entregar agua, pero no será seguro que el próximo verano vaya a tener, puede que no. Eso hace que se detengan los proyectos (Figura 34).

Aguas del Altiplano trabajó con Quiroz y Asociados para determinar cuánto menos podría crecer la ciudad. Y a partir de una serie de análisis estadísticos, llegó a la conclusión de que, producto de la inseguridad hídrica, la ciudad crecería

¿Eso en qué se traduce? Se traduce en que el PIB regional, a lo largo de 10 años, disminuiría del orden de 400 millones de dólares. Ahora, dependiendo del estadígrafo, si tomamos una desviación estándar menos, estamos hablando entre 180 y 400 millones de dólares menos de crecimiento de la ciudad de Arica, producto de no saber si voy a tener agua en el próximo año (Figura 36).

Si a eso le agregamos el riesgo de que se cortará el agua como le pasó a Copiapó, como le pasó a Ciudad del Cabo, el costo por año de no contar con agua, calculado a partir de la reducción de bienestar social, del costo sanitario, es del orden de 60 millones de dólares por año, para una reducción de la disponibilidad de agua de 1/3 de su capacidad, 200 litros por segundo (Figura 37).

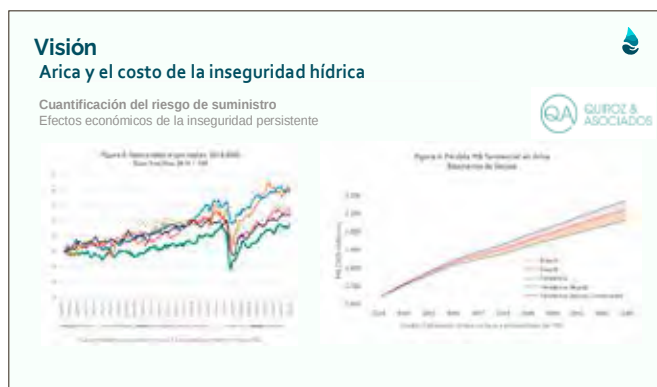


Figura 36

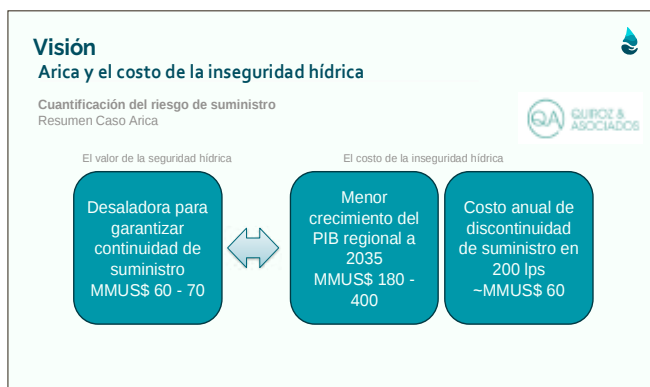


Figura 38

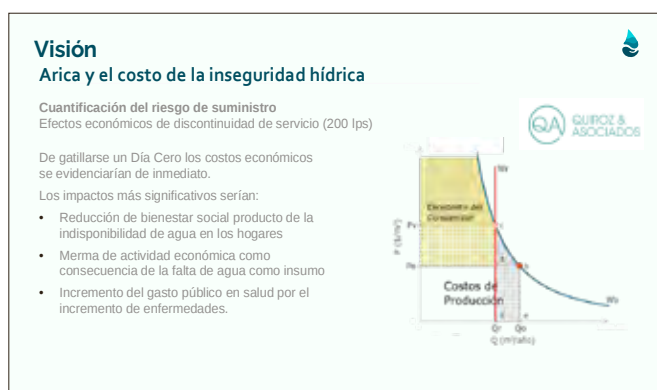


Figura 37



Figura 39

Entonces la pregunta es ¿cuál es el caso si yo tuviese una desaladora que pudiese garantizar la continuidad de suministro? Estaríamos hablando que me cuesta 60 a 70 millones de dólares, pero ¿cuánto me cuesta no saber si voy a tener agua? Por ahora me cuesta entre 180 y 400 millones de dólares en 10 años, más 60 millones de dólares por año, en caso de que tenga que rotar consumo y afectar el funcionamiento completo de la ciudad, por un déficit de 200 litros por segundo. Parece tan evidente que deberíamos tener un *backup* que debería tener una fuente que le dé seguridad hídrica a Arica, pero nos cuesta mucho tomar la decisión. Entre otras cosas porque esos 60 millones de dólares hay que financiarlos y tomando la misma referencia de Santiago, en el caso de Arica, podrían ser 20 puntos de tarifa. La pregunta es ¿cómo lo hacemos eficiente para que minimizar ese costo y destinar ciertos recursos que impliquen un impacto en el primer foco que es que la comunidad, siga operando, la ciudad siga funcionando? (Figura 38).

Tenemos muchas oportunidades (Figura 39).

Proyectos multipropósito.

Tenemos que ser eficientes para esto, ¿eficientes con qué tipo de medidas? Como el proyecto Aguas Pacífico, primer proyecto multipropósito desde el origen que está en Quintero, que va a abastecer una fuente en el sector de Quilapilún para un cliente minero, pero que fue diseñado con el doble de capacidad y le permite entregar agua a un montón de usuarios en el camino, que están con escasez y que no podrían haber accedido a un proceso de desalación si no hubiesen tenido esta conducción que pasaba cerca de ellos, y que fue pensada precisamente para compartir esta economía de escala, esta capacidad disponible (Figura 40).



Figura 40

Transporte del agua.

¿Eficiente en el transporte? No puede ser que cada proyecto minero de alguna región tenga que ir a la playa a buscar agua y muchas veces no es suficiente. Muchos proyectos chicos de minería de oro en la tercera región, por ejemplo, que necesitan 50 litros por segundo, no pueden desarrollarse con agua de mar porque no le dan los números para ir a buscar agua desalada y llevarla hacia arriba. Nótese que, en proyectos grandes, por cada 500, 600 metros de elevación estamos hablando de una desalación adicional. O sea, hay proyectos grandes que cuestan 6 dólares por metro cúbico en la cordillera: 1 dólar en desalar, 5 dólares el transportarla.

Entonces, tenemos que buscar redes eficientes como el sistema interconectado eléctrico para poder aprovechar esta economía de escala, sobre todo en lo que se refiere al transporte (Figura 41).



Figura 41

Estos estudios los hizo la Universidad de Queensland, en la tercera región, con el patrocinio de Mitsubishi Corporation, y han generado modelos de redes de transporte eficiente de las aguas, para que el día de mañana alguien llegue y se conecte a estos *hub* de distribución, desde carreteras hídricas que optimicen este transporte del agua desde la costa hacia los valles (Figuras 42 y 43).

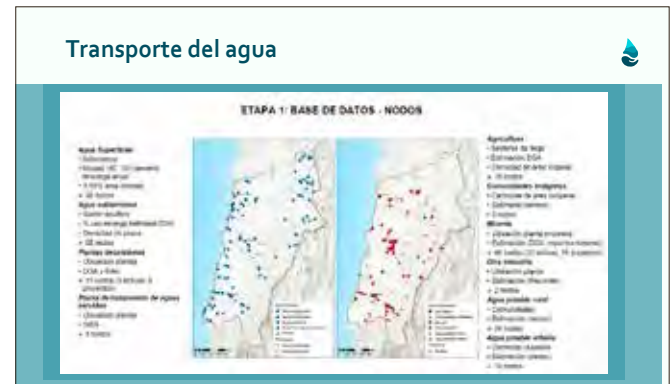


Figura 42



Figura 43

Permisos y Licencia social.

Por último, tenemos que avanzar y estamos convencidos de que podemos hacerlo en forma eficiente. Mucha pega para la ingeniería acá, pero topamos con los permisos, topamos con la burocracia. En Chile, estamos hablando de que un proyecto de desalación de agua de mar se está demorando entre 8 y 10 años desde que se toma la decisión de invertir, se hacen los estudios de línea base, se hacen los estudios

ambientales, se presentan para evaluación y luego se licita, se construye y hasta que opera: 8 o 10 años. No podemos con esos plazos (Figura 44).



Figura 44

Y hemos estado muy presentes en la discusión regulatoria desde ACADES para actuar en esto, precisamente creo que es el corazón de la asociación. Sabíamos que venían proyectos de ley asociados a desalación y creíamos que debíamos tener una voz como desarrolladores, como operadores, como proveedores de este tipo de servicio (Figura 45).



Figura 45

Hemos estado en múltiples actividades, no nos ha ido muy bien. Creemos que los procesos, en vez de estar simplificándose y haciéndose más eficientes, están complejizándose e incorporándole mucha más dispersión al proceso, que lo hace más riesgoso, más largo, más caro. Pero bueno, estamos a full trabajando en eso (Figura 46).



Figura 46

Nuestra visión incluye la vinculación con la Academia (o Instituto). Tenemos muchas asociaciones con distintos gremios y universidades, porque tenemos que partir desde abajo. Hemos llegado mucho a los tomadores de decisión, a los ministerios, a distintos inversionistas, pero en realidad la licencia social se obtiene desde la comunidad. Y eso lo hemos visto en varios proyectos (Figura 47).



Figura 47

Y estamos buscando obtener esa licencia social con información, con antecedentes. Acá hay algunos ejemplos de Atacama, donde precisamente la misma planta cuya descarga les mostré, junto con la Universidad de Playa Ancha, el hub ambiental, se instalaron bioindicadores, algas especialmente sensibles a la sal a distintas distancias del difusor. A los 10 metros las algas mostraban que no tenían ningún tipo de afectación. Eso, en la medida que llegamos a la comunidad y vamos comunicando esto e invitamos a toda la comunidad a la planta. Porque cuando uno ve la planta, se da cuenta que en realidad esto es bastante positivo.

Así va mejorando la percepción de la gente. Atacama hace mediciones permanentes del nivel de calidad y la que era la peor empresa sanitaria de la industria, hoy día está por encima de la media (Figura 48).



Figura 48

En ACADES hacemos mucha, mucha comunicación. Estamos permanentemente participando en columnas, en entrevistas, difundiendo este conocimiento. Los invitamos a ustedes a difundir conocimiento. Estuvimos en el Congreso el año pasado como mucho éxito, más de 700 personas y vamos a seguir trabajando en eso (Figura 49).



Figura 49

Y aprovecho para invitarlos inmediatamente al Congreso de 2026, que lo vamos a hacer en el Metropolitano, ex Casa de Piedra, en la semana del Agua los días 18 y 19 de marzo. El 17, de hecho, ya estamos viendo también hacer algunos *side events* de capacitación y de divulgación (Figura 50).



Figura 50

Eso es lo que tenía para presentarles Juan Carlos. Se me pasó un poco la hora, pero uno se entusiasma aquí y empieza a contar quizá con un poco más de detalle algunas de estas materias.

Gracias.

A continuación, el Sr. Kresse responde algunas preguntas y comentarios.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Muchas gracias, Alberto. Muy interesante la presentación. Se ve que hay una necesidad y están todas las herramientas para poder satisfacerla. Hay varias consultas que nos han hecho.

Sr. Roberto Cádiz.

—¿Cuánto tiempo está tomando el proceso de permisos completo, desde la Concepción del proyecto hasta la operación de la planta?

Sr. Alberto Kresse.

—Comentaba hace poco de que está tomando entre 8 y 10 años promedio. Hay algunos casos más largos y en algunos casos más cortos. Creo que el más corto puede haber sido Aguas Pacífico, del orden de seis años. ¿Cuál es la gran

dificultad? Es muchas veces la discrecionalidad que todavía existe respecto de la revisión de algunos antecedentes y sus alcances. El hacer los estudios de línea base, que incluyen campañas de invierno, de verano, correntometría, modelaciones, etcétera.

Partimos de la base que hay que tomar datos durante al menos un año. Que luego, en algunos casos, se hacen algunas observaciones que como te decía, no son las mismas en todos lados. Tenemos que tratar de acotar esos alcances y que te obligan a repetir campañas. Y eso le agrega inmediatamente 6 meses más o lo que fuese, si es que es necesario avanzar en esa línea.

Es fundamental, a mi juicio, que se haga de manera eficaz y eficiente. La concesión marítima que ha sido un tema bien emblemático hoy se puede demorar 3 años en que te lo otorguen. Y no existen plazos, no existe silencio administrativo que combinen o que de alguna u otra forma castigue a quien los excede. Entendemos que hoy día se está buscando tratar de hacer el proceso más eficiente, más riguroso, pero ahí tenemos una tarea grande por hacer aún.

Sr. Sebastián Bernstein.

—¿Qué son los rangos de costo de desalación en Chile a nivel del mar, pensando en el potencial uso para la agricultura?

Sr. Alberto Kresse.

—Estamos trabajando con una empresa consultora precisamente en tratar de definir mejor esos rangos. Porque con el rango, uno tiene en referencias internacionales, en la asociación somos socios también de Desaldata, tenemos una base de datos muy fuerte a la que tienen acceso todos nuestros socios, pero cuando lo llevamos a la realidad chilena, aparecen precisamente estas contingencias, algunas que son de tipo administrativo y que muchas veces te extienden los plazos y los plazos, significa costos. Con todo el estándar que normalmente se manejaba en torno a 1 dólar por metro cúbico para plantas grandes, ese dólar por metro cúbico hoy día, con plantas grandes, está subiendo bastante más. Pero eso acotado a las obras marítimas y la planta. Las obras marítimas son significativas dentro del costo total. Si te encuentras con condiciones particulares

que te obligan, por ejemplo, a hacer un túnel, esos costos pueden ser mucho más altos.

Proyectos bien emblemáticos hoy día, están más cerca del dólar y medio, incluso los 2 dólares por metro cúbico cerca de la costa, dependiendo de las exigencias. Estamos viendo algunos proyectos que van por zonas súper escarpadas en el borde costero del norte de Chile, mitad del desierto, que normalmente como pasaba con muchas tuberías de otros servicios, iban sobre el terreno, anclados con machones. Hoy día no, tienen que ser completamente enterrados en este farellón que te obliga a hacer instalaciones con helicóptero, que te obliga a hacer una especie de cable cars, se me fue la palabra, pero tú tienes que hacer todo esto como estonilla de teleférico. Todos esos costos adicionales muchas veces redundan en un mayor costo final del producto. Pero estamos hablando, si se hace bien, de CAPEX y OPEX del orden de dólar y medio por metro cúbico en plantas grandes, plantas pequeñas, como una caleta, evidentemente tienen otros valores.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Gracias. Tú planteaste el caso de la de un proyecto minero en Quilapilún, en que había una desaladora que atendía a diferentes sectores.

Sr. Javier García.

—¿Existen algún otro tipo de barreras para el desarrollo de este tipo de proyecto específicamente de barreras: legales, administrativas, fallas de mercado?

Sr. Alberto Kresse.

—Hay una barrera gigante que nosotros quisiéramos sacar. El proyecto de Aguas Pacífico está en la Villa Quintero en la comuna de Puchuncaví. El agua desalada del mar se va a transportar hasta la zona de Til Til y Lupilún, para un proyecto minero que demanda la mitad del caudal. Para la otra mitad, los inversionistas tomaron el riesgo de sobredimensionar todo y reservarse el derecho de proveer de agua, aprovechando la economía de escala, principalmente de las conducciones, a distintos usuarios de la línea.

El gran problema que enfrentó ese proyecto fue en la gestión de terreno, creo que fueron 105 distintos dueños de terrenos, con quienes se tuvo que negociar 1 a 1 por servidumbre, la propiedad del trazado, cosa que no tienen que hacer otras industrias como la minera o la sanitaria que tienen derecho a imponer servidumbre. Evidentemente compensando el costo del uso de la faja, pero no dejando esta negociación uno a uno en cada uno de estos tramos. Esa facultad de imponer servidumbres, como pasa con cualquier otra infraestructura de bien común, de uso público, como pueden ser las carreteras u otro tipo de instalaciones, debería ser reconocida porque evidentemente acá lo que se está haciendo al final del día, es entregándole agua a una cuenca, que si tiene desaladora es porque naturalmente tiene un déficit hídrico.

Todo proyecto de desalación reemplaza o libera recursos continentales, llámese ríos, acuíferos, lagos, al incorporarle agua a una cuenca. Es un bien público que debería ser reconocido por lo menos en la constitución de servidumbres y, sobre todo, para proyectos multipropósitos. Si no, se hace mucho más complicado desarrollar proyectos.

Sr. Javier García.

—¿Cuál es el rol que debería tener el Estado en este tipo de proyecto?

Sr. Alberto Kresse.

—Debería favorecer, porque lo que se hace en ese tipo de proyecto es integrar demanda, disponibilizar agua para actores, muchos de ellos APR; el mismo proyecto de Aguas Pacífico, creo, tiene convenio con 40 sistemas de agua potable rural para entregar agua en el camino, que hoy se está comprando a camiones aljibes. Eso tiene impacto, digamos ambiental. Entonces, si hay alguien que esté dispuesto a apoyar la entrega de agua a una cuenca y a apostar un poco a hacer uso de esta capacidad de estas economías de escala, debería, a mi juicio, tener facilidades, en vez de dificultades.

Srta. Melanie Gauthier.

—Precisamente a raíz de esta gran cantidad de plantas desaladoras que se están instalando y la aparición de nuevos proyectos de hidrógeno verde ¿se puede considerar la desalinización como una alternativa sostenible a largo plazo, sin comprometer los sistemas marinos? ¿Pensando en la gran cantidad de plantas que se van a instalar?

Sr. Alberto Kresse.

—Una vez me preguntaron ¿cuántas plantas aguanta el borde costero? Y yo le decía, mira, es lo mismo que preguntarme ¿cuántos hoteles puede aguantar el borde costero? El impacto en el borde costero propiamente tal es del tamaño de un galpón, de un galpón grande dependiendo la escala. Y el impacto en el medio marino, veíamos recién que, en realidad, es marginal. Toda actividad que hacemos todos los días tiene algún tipo de impacto, pero la verdad es que no es significativo, es muy menor. Por lo tanto, a mí me encantaría tener una batería de plantas desaladoras que se interconectarán en un sistema, que aprovecharán economías de escala y que pudiésemos separar la producción del transporte y del consumo, de manera de darle seguridad hídrica y que todos tengan la certeza de que van a contar con el recurso para desarrollar sus actividades. Mientras mejor lo hacemos, mientras más estructurado y aprovechando las economías de escala, lo más probable es que va a ser más barato.

Respecto al hidrógeno verde, evidentemente no tiene mucho sentido que, si tenemos 5 o 10 proyectos en Magallanes o en Antofagasta, que cada uno tenga su propia desaladora y tenga su conducción, pero no por un tema ambiental, sino que por un tema de eficiencia económica. Es muchísimo más barato tirar un tubo grande que tirar 3 tubos chicos, muchísimo más barato. Normalmente, subir un diámetro de tubo no te modifica en mucho el presupuesto, pero muchas veces te duplica o te cuadruplica la capacidad de porteo. Entonces, en ese sentido, de la eficiencia económica, de la eficiencia también de los procesos y de los proyectos, lo más natural sería que buscásemos esta sinergia, pero de verdad, desde el punto de vista ambiental yo no le veo ningún problema, ningún riesgo a que tuviésemos 5, de hecho, en Caldera tenemos 4 plantas en 20 km. de distintas empresas y la verdad que el impacto es prácticamente cero, como le mostrábamos recién ahí en el vídeo.

Sr. Jaime Ulloa.

—*Tu opinión respecto al uso de tecnología modular y de pequeña escala para desalación pensando en localidades pequeñas.*

Sr. Alberto Kresse.

—Ahí nuevamente. Absolutamente bienvenido. Sobre todo, caletas del norte de Chile. Había un par de caletas en el norte de Chile que tienen el sistema de desalación. Muchas veces el gran problema es del tipo operacional, hay que hacer una buena capacitación o hay que tener un operador o hay que reconocer que hay que destinar ciertos recursos para esos efectos. Pero lo otro súper importante es que la discusión regulatoria que estamos teniendo hoy día, donde la cantidad de requisitos que se están tratando de instalar para obtener una concesión de desalación pueden ser muy difíciles de alcanzar para cualquier proyecto, pero sería prácticamente imposible para un proyecto de un condominio, de una caleta, de algún centro turístico, que quisiera utilizar este tipo de tecnologías, que en esa escala es absolutamente inocuo, pero que hoy día tienen que pasar por un derrotero que realmente sería inalcanzable para proyectos de menor escala. Ahí creo que la parte fundamental va a estar en que entendamos que hay proyectos en que hay que pedir todas estas campañas de monitoreo, etcétera, pero debería haber proyectos como estos que estoy mencionando que deberían tener algún tipo de proceso simplificado para esa implementación.

Sr. Wilder Ortiz.

—*¿Si la contaminación de los mares con los plásticos y residuos no perecibles afecta la desalinización del agua para consumo humano?*

Sr. Alberto Kresse.

—Lo que más podría pasar si es que hubiese una contaminación realmente significativa en alguna zona, es que los filtros previos, los que protegen a las membranas de osmosis, deberían obturarse de manera más permanente. Entonces habría que hacer retro lavado. Por lo tanto, habría

una menor recuperación, de 45% que se tiene hoy día. A lo mejor baje un poco. A lo mejor te van a aumentar un poco los costos, producto precisamente de estos procesos, o sea, de estos procesos de limpieza de filtros que precisamente buscan proteger a las membranas de osmosis. Pero como les decía antes, las membranas son capaces de retener virus, bacterias son elementos microscópicos que normalmente son mucho menores que los que podrían darse por contaminación de microplásticos, por ejemplo. Pero sí vas a tener en todo el proceso previo, que también son algunos casos, filtros granulares y luego tienes otro tipo de membrana de ultrafiltración previo a la osmosis inversa, vas a tener que estar lavando y en el peor de los casos, debiendo tener un tren adicional a lo mejor, para garantizar una cierta continuidad en la operación sin tener que detener el proceso.

Sr. Humberto Peña.

—*¿Qué opinión tiene ACADES sobre el proyecto de ley en debate en el Congreso sobre desalación? ¿Ayuda a la incorporación de la desalación como alternativa?*

Sr. Alberto Kresse.

—Para nosotros ha sido uno de nuestros principales motivos de la asociación, el tratar de apoyar este tipo de iniciativas, pero para hacerlas también eficientes. Diría que eso tiene un poquito de sentimientos encontrados. Tiene cosas buenas, evidentemente. Primero se regulariza una condición que se llama la Concesión Marítima, que hoy día es el permiso para ocupar un espacio del fondo marino, pero que no te autoriza a sacar agua de mar, se te genera una condición medio incierta. Por lo tanto, esto te dice que “ok, usted va a poder usar una concesión marítima para desalación y va a poder sacar el agua de mar”. Segundo, aborda el tema de la servidumbre, todo proyecto de desalación de agua de mar va a poder constituir servidumbre para el transporte de esa agua hasta el punto de consumo o hasta el estanque, hasta la planta, etcétera. Hoy día es una incertidumbre para proyectos como Aguas Pacífico, que tiene doble check. Tercero, el proyecto de ley establece que todo proyecto multipropósito, por ejemplo, una empresa minera o bueno de cualquier tipo, tiene que disponibilizar al menos un 5% de su capacidad productiva y transporte para eventuales demandas en el entorno de esta infraestructura.

Esto se daba en las evaluaciones ambientales, en que las comunidades cercanas decían: “oye, cómo van a instalar una planta acá al lado, yo necesito agua, cómo no me va a dar”; se da una discusión que no estaba reglada. En este caso, el proyecto de ley establece mínimo un 5% y además establece que no es a título gratuito, sino que quien quiera usarla tiene que pagar un OPEX que va a ser definido por la Superintendencia de Servicios Sanitarios. Esto también favorece la economía de escala para beneficiar a las comunidades cercanas a las instalaciones.

Por ese lado bien, pero la verdad es que tiene otras cosas que nos inquietan. No tiene una gobernanza clara, no sabemos exactamente quién va a ser la contraparte al final de esto porque se habla del ministerio competente y esto está entre varios ministerios que han estado participando en el tema. Tiene unos plazos que realmente son inalcanzables en algunas instancias. Te dice, usted va a tener 180 días desde que obtiene la concesión de desalación hasta iniciar la obra y ese es un plazo inalcanzable. O sea, una hay que hacer una licitación, hay que constituir los consorcios, proyecto de financiamiento, así es que realmente es ridículo ese número.

Entonces, tiene cosas que nosotros hemos tratado de levantar. Hay unas condiciones dentro de los informes para obtener la concesión, que podrían interpretarse como una segunda evaluación ambiental. Hay cosas que se van incorporando en la discusión legislativa que, en cierta medida, al final, lo que están poniendo es un poquito más de ladrillos en la mochila y van a hacer el proceso más lento. Creo que, si nos enfocamos en estos temas buenos y sacáramos alguna ley mucho más sencilla, un proyecto de desalación va a poder constituir servidumbres y vamos viendo caso a caso; sería un proceso mucho más eficiente.

Esa es mi opinión y bueno, está bien tener normas, está bien regular, pero tenemos que hacerlo buscando favorecer la seguridad hídrica, no ponerle más años, a estos 8 o 10 años que estamos demorando hoy día.

Sr. Juan Carlos Latorre.

—Es importante abordar un modelo de negocio con participación pública y privada, orientado a proyectos de desalación que tengan una finalidad múltiple. ¿Qué opina al respecto?

Sr. Alberto Kresse.

—Respecto a los modelos, si esto tiene que ser público, privado o mixto, nosotros hemos tomado la definición de que vamos a apoyar todo proyecto que genere más fuentes de agua para Chile. En ese contexto, bienvenido un proyecto público, sí es que se quiere desarrollar en esa línea. Bienvenido un proyecto público privado, como es la planta desaladora de Coquimbo, que se está viendo a través de la Dirección General de Concesiones, como una concesión a 30 años, y bienvenidos también los proyectos privados.

Creo que deberíamos buscar incentivos para empujar algunos proyectos, quizás emblemáticos desde el Estado. Pero no podemos ponerle trabas tampoco a desarrollos de proyectos que pueden ser multipropósito con este 5% que, por ejemplo, establece el proyecto de ley, para entregarle agua a las comunidades cercanas. No podemos ponerle trabas a ese tipo de proyectos porque muchas veces tienen plazos, ubicaciones y condiciones técnicas que pueden diferir de proyecto macro que puedan ser liderados desde el Estado. Es super bueno tener economías de escala y agregar demanda para obtener un proceso mucho más eficiente, pero no puede ser forzado y obligatorio. Si hay un tercero que en realidad necesita el agua y que puede hacer una desaladora en otro punto más cercano, debería tener también todas las facilidades para poder desarrollarlo.

Entonces, nuevamente lo que andamos buscando es que Chile tenga agua, nosotros hemos planteado esa línea, vamos a apoyar todo tipo de proyectos que busquen ese tipo de soluciones. Estoy de acuerdo con Juan Carlos, que el Estado tiene algunos roles que tomar. Pienso, sin embargo, que donde tienen más incidencia, donde podría ser más eficiente es en el transporte, porque si el Estado el día de mañana toma estos estudios de transporte de carretera eficiente y dice: acá vamos de construir un tubo, vamos a concesionar, yo me voy a encargar de los tubos ambientales, yo me voy a encargar de los permisos sectoriales, voy a encargar toda la gestión de servidumbres y terreno. O bien decir: ¿quién quiere construir este tubo o poner uno por un cierto tiempo y cobrar peaje a las desaladoras que en la costa se conecten acá y que entreguen agua en un punto del valle? Ahí que el Estado de alguna manera garantice, estoy hablando de un modelo genérico, por ejemplo, el consumo de los sistemas de agua potable rural de algunos sectores, creo que ahí podría tener mucho que decir y mucho que

optimizar dentro de una instancia que es muy compleja, que es el transporte del agua, que normalmente puede ser más compleja que el proceso de desalación en sí.

Esa es una opinión que hemos estado tratando de construir dentro de la asociación, estamos haciendo algunos estudios de gobernanza precisamente en esa línea.

Sr. Sebastián Bernstein.

—*¿Existen casos de uso de agua desalada para agricultura en algún lugar?*

Sr. Alberto Kresse.

—Sí, los más desarrollados están en España. Bueno, hay zonas donde no tienen otra fuente como Medio Oriente, pero en España hay varias experiencias al respecto. Se forman comunidades, en Almería, sobre todo, en que hay uso de agua para agricultura. Hay algún tipo de subsidios que han favorecido esto y se han complementado con proyectos de tecnología de riego y se han complementado

también con el desarrollo de ciertos cultivos específicos que tienen un valor agregado, que les permite cubrir los costos de operación, principalmente del proceso de desalación, que debe estar cerca de los 4 dólares por metro cúbico, como OPEX sin la inversión. Entonces sí, hay experiencia. Estamos estudiando también eso. Queremos ver la forma de replicar. Muy importante el tema del consumo spot o el consumo permanente. O sea, si tú vas a una infraestructura para operarla para una demanda que es estacional es mucho más complicado que una demanda permanente en el tiempo para efectos de financiamiento de los proyectos, pero sí hay experiencia y sí, nos encantaría trabajar con la industria agrícola en Chile. Tenemos algunos convenios ahí para tratar de ver esa opción dentro de un proyecto multipropósito, sobre todo.

Sr. Juan Carlos Barros.

—*Muchas gracias. Quiero agradecer tu disposición y presentación. Agradecer a todos los asistentes.*

Fin de la conferencia.

APORTES DE LA INGENIERÍA AL MANEJO DE LOS VIRUS RESPIRATORIOS

Sr. Leonardo Basso, Director del Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI).



Sr. Leonardo Basso.

El viernes 30 de mayo de 202, vía zoom, se realizó la segunda conferencia del año, que tuvo como invitado a don Leonardo Basso. En la ocasión, ante una gran asistencia, expuso sobre los “Aportes de la Ingeniería al Manejo de los Virus Respiratorios”.

El Sr. Basso se refirió al trabajo que el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) realiza desde 2022 para apoyar al MINSAL en las campañas de invierno, cuando los virus respiratorios estresan la red asistencial. Hablará de cómo este trabajo se enlaza con lo que se realizó durante COVID, de los modelos usados para predecir casos de atenciones de urgencia por causas respiratorias, y del particular papel que jugó la Ingeniería en la implementación de la exitosa estrategia chilena de prevención del virus respiratorio sincicial iniciada en 2024.

Don Leonardo Basso es Ingeniero Civil y Máster en Ingeniería Transporte de la Universidad de Chile y PhD en Economía de la Universidad de British Columbia.

Actualmente, Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y, Director del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI).

A continuación, su presentación.

El Presidente.

—Muy buenos días a todos y a todas. El Instituto de Ingenieros de Chile es una corporación sin fines de lucro y desde hace 136 años se ocupa de hacer aportes a la excelencia en la ingeniería, a su enseñanza y al desarrollo del país. En este contexto, realizamos periódicamente foros, seminarios o charlas que se ocupan de temas que, por su relevancia para el país, requieren ser expuestos ante la comunidad. El día de hoy quiero darles la bienvenida a nuestra conferencia del mes de mayo que está dedicada a un tema muy relevante, no sólo para el futuro de nuestro país, sino que para el de toda la humanidad, que se llama “Aportes de la Ingeniería al Manejo de los Virus Respiratorios”.

En esta oportunidad contamos con Leonardo Basso, quien es Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Director del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, Ingeniero Civil y Máster en Ingeniería Transporte de la Universidad de Chile y PhD en Economía de la Universidad de British Columbia.

Como de costumbre, al final de la presentación, ustedes podrán hacer, utilizando la sección preguntas y respuestas, sus consultas a nuestro expositor. Les solicitamos además que respondan a una encuesta que normalmente realizamos y queremos expresar finalmente nuestro agradecimiento a REUNA que hace posible esta conferencia.

Dejo con ustedes a Leonardo Basso.

Sr. Leonardo Basso.

—Muchas gracias, Presidente. Muy buenos días a todos quienes nos acompañan desde diferentes partes del país.

Como bien explicó el Presidente, de lo que yo les voy a hablar es del aporte que hacemos los ingenieros, quizás en un área menos tradicional, que tiene que ver con el manejo de los virus respiratorios.

Como decía el Presidente, yo soy Profesor Titular en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile y dirijo el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería - ISCI (Figura 1).



Figura 1

Esta es una presentación bastante lineal. Tengo que hablar de la contribución que hemos hecho para el manejo de los virus respiratorios y la verdad es que comenzamos trabajando en el Instituto con virus respiratorios cuando comenzó la crisis del COVID. Por lo tanto, voy a partir contándoles qué es lo que hicimos durante la crisis del COVID de manera relativamente resumida y de qué manera eso se enlazó con nuestro trabajo que comenzó el año 2023, colaborando con el Ministerio de Salud durante las campañas de invierno. Y, luego, de qué manera eso mismo, nos llevó a colaborar de manera muy estrecha y relevante, en la exitosa estrategia chilena de prevención del virus respiratorio sincicial, que tanto daño había causado hasta el año pasado (Figura 2).

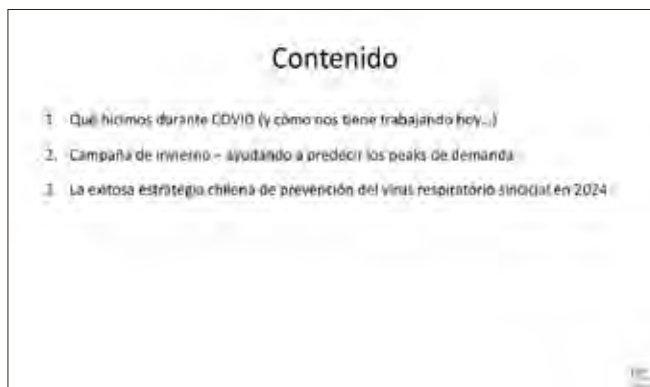


Figura 2

Tengo una sola diapositiva de propaganda, por lo menos la única explícita, las otras van a ser implícitas, respecto a lo que el ISCI - Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, es. Es un centro de excelencia, parcialmente financiado por el

Ministerio de Ciencia, en el que concurren investigadores de diferentes universidades; está albergado en la Universidad de Chile, tiene como institución asociada a la Universidad Católica y otras instituciones que colaboran. Convergen, además de diferentes universidades, diferentes disciplinas de la ingeniería, la economía y desde 2020, la salud.

Tenemos que desarrollar investigación científica y tecnológica y, por cierto, contribuir a la formación de nuevos investigadores, pero, un elemento central de un centro como ISCI, es que nos tenemos que vincular con el entorno externo para transformar investigación en desarrollo y ese desarrollo en soluciones a problemas reales.

Y así llegamos a COVID, porque como bien explica esta diapositiva, tratar de colaborar con la crisis del COVID era algo misional (Figura 3).



Figura 3

Y tal vez algunos de ustedes me han escuchado o han escuchado antes respecto de lo que hicimos durante COVID, pero quisiera resumir de manera breve, cuál fue este papel tan especial que tuvo la ingeniería en Pandemia (Figura 4).

Nuestra idea, cuando comenzamos a trabajar en el tema de la pandemia, era poder aportar con iniciativas que ayudaran a los diferentes elementos que eran necesarios para luchar en la crisis: el control de contagios, el cuidado de la infraestructura y del personal crítico, el análisis de factores socioeconómicos. Y les voy a hablar aquí, muy brevemente, de las iniciativas que, primero, enlazan con lo que hicimos después y, segundo, son aquellas que terminaron siendo premiadas internacionalmente en 2022 (Figura 5).



Figura 4



Figura 5

La pandemia en 2020, parte por el norte: primero China y después Europa. Por lo tanto, teníamos un par de meses de advertencia sobre cómo se venía a la mano, de qué es lo que nos iba a tocar. Y sabíamos que, tanto en China como en Italia, Europa en general e Italia en particular (que es la imagen que tengo ahí a la derecha), lo que se estaba haciendo en esos momentos, porque no teníamos más alternativa, era cuarentenas: tratar de que la población no circulara para evitar de alguna manera la transmisión del virus (Figura 6).

Lo primero que nosotros quisimos hacer fue tratar de ayudar a generar información respecto de cómo funcionaban nuestras cuarentenas en Chile. Y para eso, firmamos un convenio de colaboración con la compañía Entel. Y esta colaboración, en este trabajo muy extenso que hicimos, consistió en transformar la información de conexión de los celulares a las diferentes antenas que están en todo el país, para permitir identificar la movilidad.



Figura 6

La idea es muy sencilla, cuando un teléfono celular se desplaza, se va conectando a diferentes antenas celulares, a medida que se mueve se va conectando a otras antenas celulares y eso de alguna manera realiza un procesamiento que permite identificar movimiento (Figura 7).



Figura 7

Entonces, después de mucho trabajo con el equipo Kamal de Entel Ocean, hoy llamado Entel Negocios Digitales, generamos información de movilidad que pusimos a disposición de toda la población y las autoridades, que nos permitió entender qué es lo que estaba pasando con nuestras cuarentenas (Figuras 8 y 9).

Entonces, pusimos toda esta información en un visor que nos permitía, por ejemplo, identificar cuánto era la reducción de movilidad en función de cuál era el estado de cierre de cada una de las comunas. Ustedes pueden ver aquí, por ejemplo, que las primeras cuarentenas, las primeras semanas de cuarentena en Quinta Normal, lograron una

reducción de movilidad de 35% y digo sólo 35% porque a medida que avanzaban las semanas, la disminución de la de movilidad se reducía, llegando a sólo 15%. Finalmente se liberan esas primeras cuarentenas, pero lo que vemos es que las segundas cuarentenas no consiguen reducciones de movilidad más allá del 20% (Figura 10).



Figura 8



Figura 9



Figura 10

Pudimos, entonces, generar información respecto de cuáles eran los efectos reales de las cuarentenas y compartir esa información con el público (Figura 11).



Figura 11

Esta información fue muy relevante para el público general y para las autoridades (Figura 12), porque mostraba que las cuarentenas iban a tener un efecto limitado para controlar la transmisión de este virus.



Figura 12

Y entonces, de manera esperable y como sucedía en otras partes del mundo, tuvimos casos muy severos o momentos muy severos de transmisión que nos llevaron a momentos de mucho estrés en la red asistencial (Figuras 13 y 14).

Fue más o menos entre mayo y julio de 2020 en que tuvimos la primera gran ola y hablábamos del “dilema de la última cama”.



Figura 13

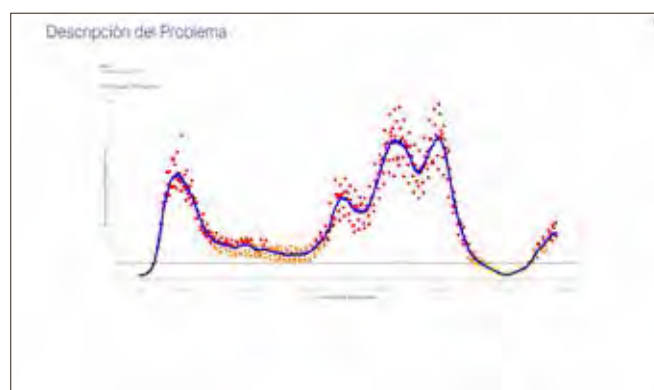


Figura 14

En ese momento, el Ministerio de Ciencia nos preguntó en el ISCI si podíamos ayudarlos con una pregunta muy específica: ¿Cuántas camas vamos a necesitar habilitar en una y dos semanas? Lo que sucedía aquí es que los modelos epidemiológicos generaban predicciones que eran de largo aliento, pero el problema era mucho más acuciante. El problema era ¿cuántas camas teníamos que habilitar ahora ya?

Hubo una segunda ola donde tuvimos que hacer lo mismo. Entonces nos preguntaron si podíamos hacer eso. Nosotros dijimos que sí, aunque no sabíamos mucho sobre el cómo (Figura 15).

Y nos lanzamos a tratar de generar un modelo que hiciera una predicción de corto plazo, a una y dos semanas, de cuántas camas se iban a necesitar.

En este equipo trabajó, entre otras personas, el profesor Marcel Goic y lo que hicimos fue partir de la base de datos de casos sintomáticos y tratar de estudiar y calibrar un

modelo en el que, dependiendo de las características de la población: hombres, mujeres, edades, etcétera, estimar cuántos de los casos sintomáticos iban a pasar a UCI y por cuánto tiempo. Y de nuevo, estocásticamente, cuánto iban a estar en UCI y luego salir de ahí, o porque estaban sanados o por fallecimiento.

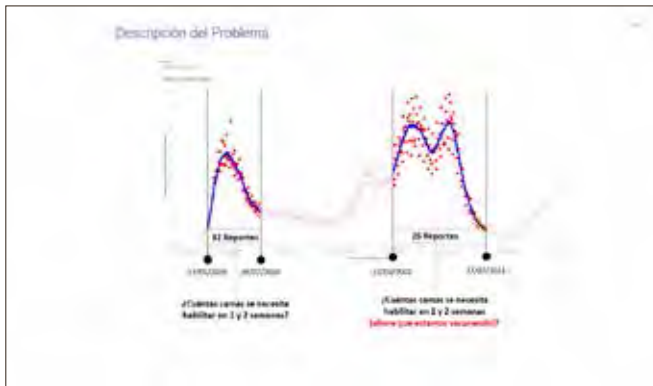


Figura 15

Así, a medida que íbamos teniendo información de nuevos casos sintomáticos, podíamos ir generando estas entradas a UCI, estadía a UCI, todo de manera estocástica y muy heterogénea y podíamos generar un modelo de inventario (Figura 16).

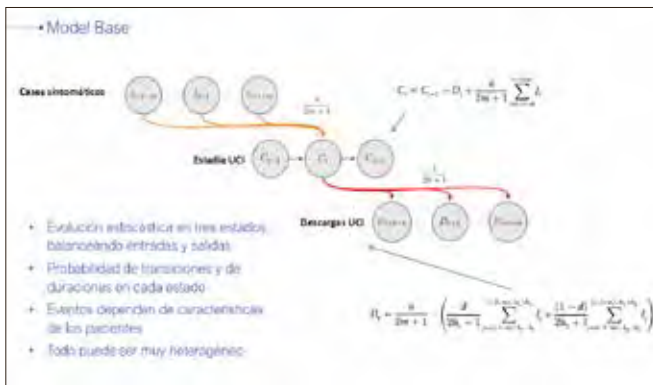


Figura 16

Ahora, lo que fue pasando es que el modelo de inventario no era suficiente porque muchas veces los datos de casos sintomáticos llegaban tarde o simplemente no llegaban. El virus iba evolucionando y, por lo tanto, estas entradas a la UCI, estas duraciones también variaban, y además los

equipos clínicos aprendían a tratar de manera diferente a los pacientes (Figura 17).

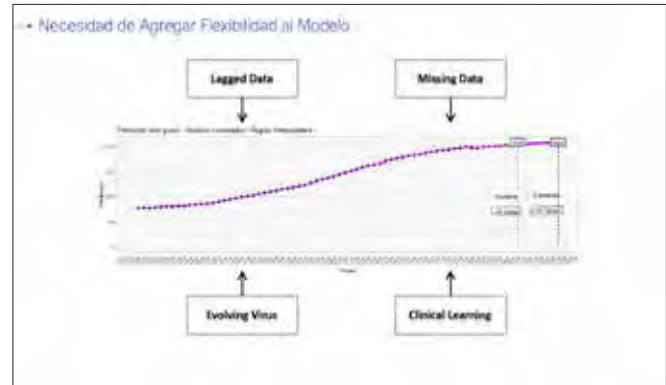


Figura 17

Lo que hicimos entonces fue: mantener el modelo de inventario que habíamos construido, pero, además, aplicar modelos de redes neuronales, modelos de aprendizaje de máquina, modelos autorregresivos, todo junto a los mismos datos, para luego generar una mejor predicción a partir de todos estos modelos que corrían en simultáneo (Figura 18).

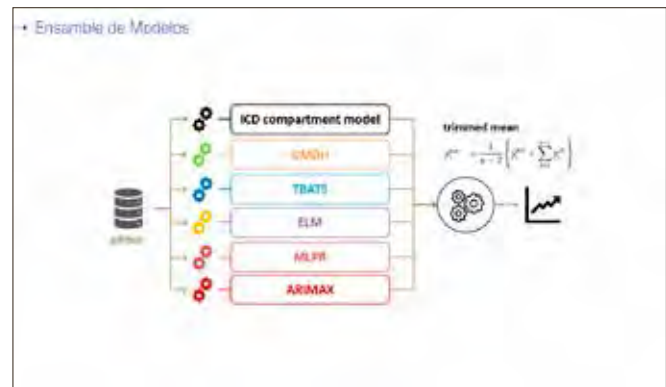


Figura 18

Y esto nos permitió generar 58 reportes cada 2, 3 o 4 días, en los dos periodos más críticos y que entregábamos, literalmente a las 3 de la mañana, vía whatsapp, al Ministerio de Salud, al Ministerio de Ciencia, a la Sociedad Chilena de Medicina Intensiva, para que estuviese en la mesa de crisis a las 7 de la mañana en La Moneda.

¿Cómo lucía un informe? Uno de estos informes lucía de la siguiente manera: por ejemplo, en Coquimbo decíamos: las camas UCI están ocupadas al 95% pero, afortunadamente, el modelo acá arriba, en morado, predice la liberación de una cama en una semana y la liberación de dos camas en dos semanas.

En este gráfico, lo que ustedes ven en negrita, son los puntos reales y en morado es la predicción en cada instante. Por lo tanto, Coquimbo lucía bien (Figura 19).

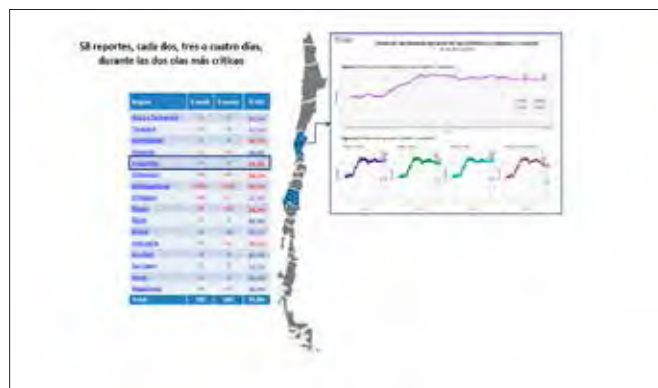


Figura 19

Sin embargo, en Maule, la situación era muy compleja, porque el 20 de abril la ocupación era 97%. Si ustedes miran el lado derecho del gráfico, la dotación inicial era del orden de 100 camas, y ya estábamos llegando a las 150 camas. Se había aumentado un 50% la capacidad de las camas críticas, pero se iban a necesitar 8 más a una semana y 3 más a la otra semana. Este tipo de información permitía que las autoridades adelantaran la situación, eventualmente, teniendo que trasladar pacientes (Figura 20).

Quiero contarles que estos modelos de predicción mostraban cosas muy terribles. Por ejemplo, esto es Región Metropolitana, el 20 de junio, que nos decía que a una semana se iba a necesitar 269 camas adicionales, cuando ya se había casi triplicado la cantidad de camas críticas en Santiago (Figura 21).

Una vez pasadas todas las crisis, pudimos evaluar cómo les fue a estos modelos de predicción de demanda de corto plazo por camas UCI, y encontramos que este modelo, en promedio tuvo una tasa de falla de 4% a una semana y 9% a dos semanas (Figura 22).

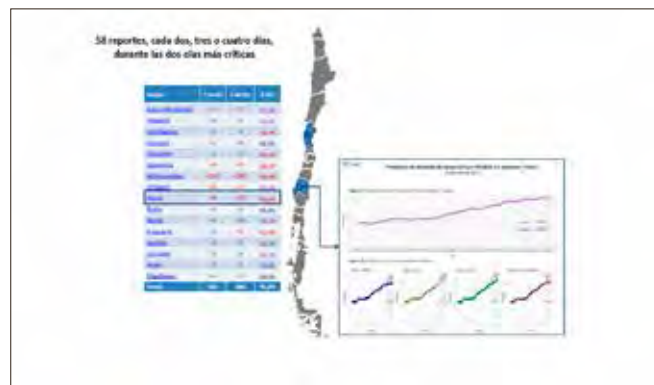


Figura 20

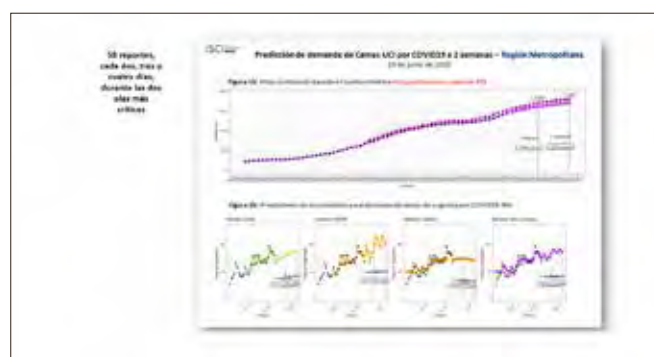


Figura 21



Figura 22

Lo siguiente etapa, una vez que pasó esta primera ola, fue pasar al ataque, adelantarnos al virus; comenzamos a ayudar con testear más y mejor, y parte de ese mejor testeo consistía en poder orientar la búsqueda activa de casos asintomáticos en el espacio público, algo que nosotros llamamos, de manera bien poco creativa, el índice BAC, el índice de Búsqueda Activa de Casos (Figura 23).



Figura 23

Y nuestra idea fue la siguiente, nosotros teníamos la información epidemiológica del proyecto anterior, de cuánta gente estaba contagiada en cada una de las zonas censales, porque usábamos esa información para predecir el uso de camas.

Sabíamos también de la información de movilidad, cuánta gente se movía desde cualquier zona de una ciudad hacia otra zona.

Lo que hicimos, entonces, fue hacer una estimación de cuánta de la gente que se mueve de una zona a otra podría estar contagiada asintóticamente, basada en la información de los contagios conocidos, y de esa manera podíamos hacer una estimación de cuántos casos asintomáticos estaban circulando dentro de una zona dada de una ciudad (Figura 24).



Figura 24

Y eso nos permitía decir: mire, si usted quiere ir a buscar casos asintomáticos en alguna ciudad, hay ciertas zonas en las que la probabilidad de detectarlos es más alta, y a eso le llamamos el índice BAC. Y aquí les muestro, por ejemplo, cómo se lo entregábamos al Ministerio de Salud para su personal pudiese ir a buscar casos activos en aquellos lugares donde era más probable encontrarlos (Figura 25).



Figura 25

Esta fue la forma de testeo para ir a buscar a estos pacientes enfermos asintomáticos con COVID. Ustedes recuerdan que una de las cosas terribles del COVID es que la gente se enfermaba y podía estar asintomática 5 o 7 días contagiando a otros antes de mostrar síntomas. Lanzamos un piloto primero en Santiago Centro. Luego fuimos a Ñuble a lanzarlo y se convirtió en una estrategia nacional de búsqueda de casos en el resto del país. Acá lo estamos lanzando con la doctora Daza en Talcahuano, esto es Valparaíso, y aquí estamos en Aysén (Figura 26).



Figura 26

Entonces, en todos esos lugares se instalaban esos “carritos” del Ministerio para hacer PCR's gratuitos buscando casos asintomáticos de COVID.

Pero después se nos ocurrió una idea más, y esa idea era: tenemos a un montón de gente que se acerca voluntariamente a hacerse estos test de PCR, ¿qué pasa si nosotros usamos unos test que no son PCR y que habían sido pensados al principio para tratar de saber si una persona había estado contagiada o no? Ese era el famoso test de anticuerpo, que se pensó usar al principio de la pandemia, pero después fue desechado porque su sensibilidad no era suficientemente grande.

Pero a nosotros se nos ocurrió que, si bien su valor individual podía no ser suficiente, su valor poblacional podía serlo. Y lo que comenzamos a hacer es que a todas las personas que se acercaban a hacer PCR's gratuitamente en el espacio público, los invitábamos a hacer un test de anticuerpo. Si la persona no estaba vacunada, permitía saber cuánta gente se había enfermado de COVID o no, en su valor poblacional. Pero si la gente ya estaba vacunada, podíamos ver de manera muy temprana, si es que esa persona había desarrollado anticuerpos dada la vacuna (Figuras 27 y 28).

Y entonces nos lanzamos y nos desplegamos por todo Chile. En lugares estratégicamente calculados a partir de la información de movilidad, para tratar de estudiar cuál era la respuesta de anticuerpos de las personas a lo largo del país. Desde enero 2021, la vacunación anduvo muy expedita y, por lo tanto, pudimos muy rápidamente estudiar la respuesta de protección vía el anticuerpo IgG de la población a las vacunas.

Esto era muy importante porque Chile era el primer país en vacunar masivamente con Sinovac y, por lo tanto, la información poblacional iba a demorar muchísimo en aparecer. Había que esperar a ver si la gente se enfermaba o no, en cambio con este estudio muy masivo, podíamos ver si la gente había desarrollado los anticuerpos e inferir de ello la protección (Figura 29).

Los resultados fueron súper importantes. Esta fue la primera información a nivel poblacional de la protección que entregaba la vacuna Sinovac y los resultados fueron que la vacuna Sinovac protegía. Sin embargo, su protección parecía decaer a lo largo de los meses y por lo tanto se iba a necesitar una

tercera dosis con tecnologías más avanzadas como vector viral o RNA mensajero, que no estaban disponibles para Chile al principio pero que ahora sí lo estaban.



Figura 27



Figura 28



Figura 29

Y aquí quiero hacer un punto que nos llena de orgullo. Esta fue la primera vez que en The Lancet Infectious Diseases y en The Lancet Microbe equipos, solo de chilenos, publicaban y, sin duda, era la primera vez en que había ingenieros en estas publicaciones (Figura 30).



Figura 30

Una vez que el COVID estaba terminado y comenzamos de vuelta a la normalidad, desde el Ministerio de Salud del nuevo Gobierno, ahora dirigido por la doctora Begoña Yarza, nos dijeron que: “si pudieron predecir la demanda por camas durante COVID ¿por qué no nos ayudan durante la campaña de invierno?” (Figura 31).

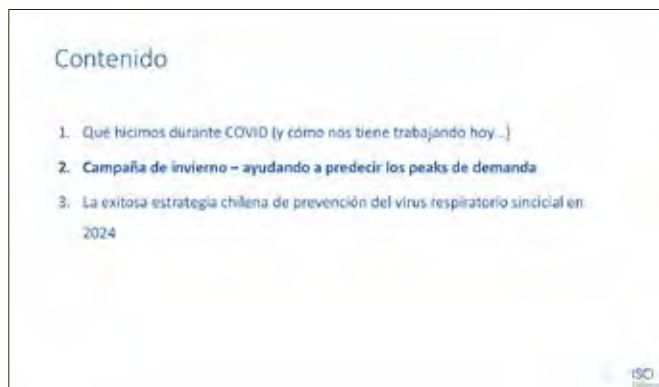


Figura 31

Lo que ocurría es que cada año antes de la campaña de invierno el DEIS del Ministerio de Salud, que maneja muchos datos, entregaba figuras más o menos como ésta (Figura 32). Y estas figuras lo que muestran son el número de consultas de urgencia por razones respiratorias en lo

que va del año hasta la semana 12, que dice que: vamos aquí como la curva roja. Y lo que le queremos mostrar es cómo ha sido en el pasado. Un escenario bajo, es el celestito; en un escenario promedio, es este más oscuro; el azul de acá es un escenario pesimista y, entonces, así viene más o menos la cosa.



Figura 32

Pero esto no es de verdad una predicción, lo que muestra son promedios y percentiles. Entonces nos pidieron ver si podíamos hacer algo más y bueno, uno diría “si hicieron lo anterior con el COVID, ¿por qué no?” Pero hay más dificultades. El COVID estaba muy testeado y nosotros conocíamos los casos detectados y podíamos predecir, pero la predicción además era de corto plazo, era una predicción a una semana, a dos semanas y acá, la verdad es que lo que se necesitaba saber es más o menos cuándo vienen los peaks y de qué tamaño van a ser.

Lo que comenzamos a trabajar y detectar fue lo siguiente: lo que ustedes están viendo es una serie de tiempo histórica del número de atenciones de urgencia respiratoria, en este caso del Servicio de Salud de Arica. Teníamos los datos desde 2010, entonces aquí tienen 2018, 2019, está súper claro cuándo ocurren las campañas de invierno, entre abril y septiembre, luego vienen los años de pandemia 2020, 2021, con un 2021 muy extraño (Figura 33).

Y lo que se grafica encima ahora además es la serie promedio, en gris (Figura 34). Lo que ustedes pueden ver es que, si bien el promedio es un predictor razonable, obviamente, muchas veces puede andar mal. Por ejemplo: el promedio no era un buen predictor en 2018 y era un buen predictor en 2019. Y cuando uno observaba ya las primeras semanas

de 2023, que son las que están marcadas en ese rectángulo rojo, ya había señales de que la situación inicial difería del promedio. Y nosotros dijimos, esta información de que ya estamos en una situación diferente del promedio es información que se puede usar y que en una predicción basada en el promedio simple no se utiliza.



Figura 33



Figura 34

Entonces lo que dijimos es que una alternativa de predicción va a ser usar la información de las primeras semanas del año, y la idea, explicado en sencillo, es que a partir de esa información de las primeras semanas vamos a identificar qué otros años se comportan “parecido” al año actual en estas primeras semanas. Y esos años se seleccionan para darles más peso en el cálculo de un promedio que ahora va a estar ponderado por similitud de las primeras semanas y, por supuesto, no queríamos usar ni 2020 ni 2021, y terminamos no usando 2022 tampoco, porque hubo mascarillas hasta muy avanzado el año (Figura 35).



Figura 35

Entonces el método lo que lo que busca estos pesos para cada uno de los años por similitud, les da más peso a los años que más se parecen a las primeras semanas; y, además, a medida que vamos agregando semanas a la observación, las semanas más recientes tienen más peso que las menos recientes. Impusimos que los parámetros no podían ser negativos, y utilizamos el método Lasso para dar mayor relevancia a los años de mayor similitud y evitar un sobreajuste (Figura 36).

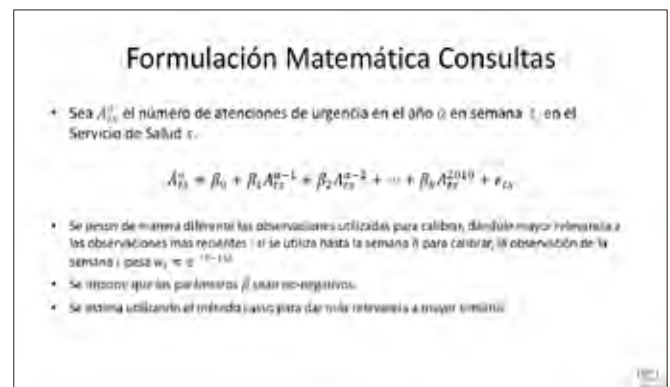


Figura 36

Y entonces, lo que ustedes ven en rojo (Figura 37) es: cuáles hubieran sido las predicciones si las hubiésemos utilizado primero en 2018 y en 2019. Lo que pueden ver es que la predicción, basado en este promedio ponderado por similitud de las primeras semanas, en 2018 identifica bien la magnitud del *peak* aunque lo entrega adelantado. En 2019 identifica muy bien la magnitud del primer *peak* en cantidad y en fecha, pero no el segundo. Después las predicciones 2020, 2021 y 2022 están acá, pero no fueron relevantes, y

lo que decíamos entonces a la semana 16 para el Servicio de Salud de Arica, es que la cosa viene, así como se ve en la figura, y esto es más o menos lo que podemos esperar, por supuesto muy lejos del promedio.



Figura 37

Les muestro otro ejemplo: Coquimbo (Figura 38), y ustedes pueden ver en Coquimbo que en 2018 el promedio era un gran predictor, en 2019 era un predictor un poco peor, y en 2023 habíamos comenzado ya más lejos del promedio y, por lo tanto, la aplicación de esta forma de predecir entregaba esa señal más severa en ese momento. Si hubiéramos aplicado esta predicción en 2018 nos hubiera parecido exagerado, pero en 2019 hubiéramos andado muy bien.

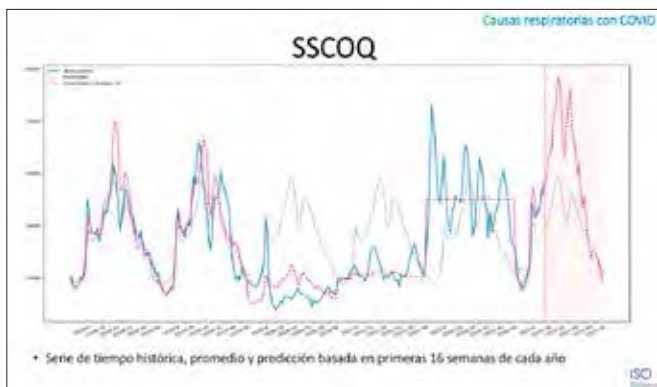


Figura 38

Entonces en 2023 comenzamos a hacer estas predicciones y a hacerlas, además, desagregadas: por si la consulta era en atención primaria de salud, en APS, o si era en hospital; y desagregada por edades: entre 0 a 14 años y 15 o más.

Y, por lo tanto, comenzamos a entregar predicciones de consultas de urgencia por virus respiratorio. De acuerdo con esto, ustedes pueden ver acá en cada caso cómo hubiese sido la predicción 2018-2019, por edad y por tipo de infraestructura, por APS o por hospital, y las predicciones hubiesen andado bastante bien en 2018-2019, lo que nos da confianza para decir que este es un futuro posible, lo que está en la cajita rosada de predicciones (Figura 39).



Figura 39

La novedad al pasar de 2023 a 2024, que introdujimos, fue que, por cierto, todos los virus no se comportan igual y hay diferentes virus o hay diferentes condiciones que generan estas atenciones por consultas de urgencia (Figura 40).



Figura 40

Y, por lo tanto, lo que comenzamos a hacer en 2024 fue tratar de generar estas predicciones, pero ahora separados por causa. Entonces lo que ven acá (Figura 41) es la predicción con datos hasta la semana epidemiológica número 20, esto

es del 28 de mayo de 2024, hace casi exactamente un año, donde decíamos: las consultas de urgencia separadas por atención primaria o por hospital y separadas por edades, por causa de influenza, se van a comportar más o menos de esta manera. Y teníamos predicciones muy terribles respecto de cómo se había comportado la influenza en 2024 y eso fue así, el año 2024 fue un año muy complejo en términos de influenza, de hecho, el peor año de todos desde que se tiene el registro desde 2010 hacia acá.

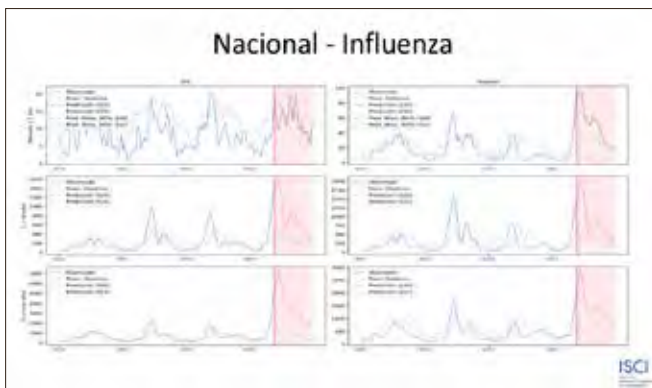


Figura 41

Y aquí estamos en 2025. En 2025 generamos ahora para la autoridad un visor, un *dashboard* (Figura 42) que, por ejemplo, permite mostrar cuál es nuestra predicción para la causa bronquitis bronquiolitis en el grupo etario de 15 o más, pero ahora mostramos dos escenarios: un escenario promedio y un escenario severo. Lo que ven en este gráfico, acá abajo en celeste, es el mínimo histórico de consultas de urgencia; lo que ven en naranja es el máximo histórico de consultas de urgencia; y lo que está en negrito son los casos que van a la fecha del año 2025 a la semana 20. Por último, la franja celeste indica los cuartiles, lo que está capturado entre el cuartil 25 y el cuartil 75, es decir, es el espacio más probable. Por lo tanto, lo que mostraban los datos hasta la semana 20, es que estamos juntando una masa súper importante de bronquitis bronquiolitis adelantada a lo que se observa usualmente, aunque parecido al máximo histórico que es, por cierto, 2024.

Y dos escenarios posibles, un escenario promedio y un escenario severo, son el escenario azul y el escenario rojo. ¿En qué difieren esos escenarios? Difieren en que ponemos ahora una restricción respecto de cuál es la cantidad total de gente que se va a enfermar, recogiendo de esa manera

un concepto menos de ajuste de regresión y algo más de un modelo epidemiológico en el que hay una cierta cantidad de personas que se pueden enfermar.



Figura 42

Ahora eso es bastante heterogéneo. A lo largo de los años, la cantidad de personas enfermas en total cambia, pero en la curva azul estamos imponiendo que el total de enfermos a lo largo de todo el horizonte de predicción está entre el decil 50 y el 70, en cambio el rojo representa un año que va a ser mucho más severo.

Eso es lo que estamos entregando hoy a la autoridad y es un trabajo continuo desde 2023, en la mejora de los modelos.

Algo que quisiera decir es que este año cuando comenzamos, cuando el Ministerio de Salud comenzó la campaña de inmunización, el 1 de marzo de 2025 de este año, una de las preguntas de la prensa a la ministra fue ¿cómo viene la influenza este año? Y la respuesta de la ministra, epidemióloga ella y con mucho conocimiento, fue que todo libro de epidemiología va a decir en sus primeras páginas que la influenza no se puede predecir, que es exactamente lo que nosotros estamos intentando hacer y, por lo tanto, estamos metidos en profundidades de alta complejidad, pero creemos que estamos teniendo éxito, que estamos entregando información que es muy bien recibida por la red asistencial y por las autoridades, con modelos cada vez más sofisticados y que entendemos que se comportan bien con respecto a lo que se hace en otros países.

Les mostré lo que hicimos para la campaña de invierno desde 2023 a 2024 y 2025, en lo que estábamos trabajando (Figura 43).

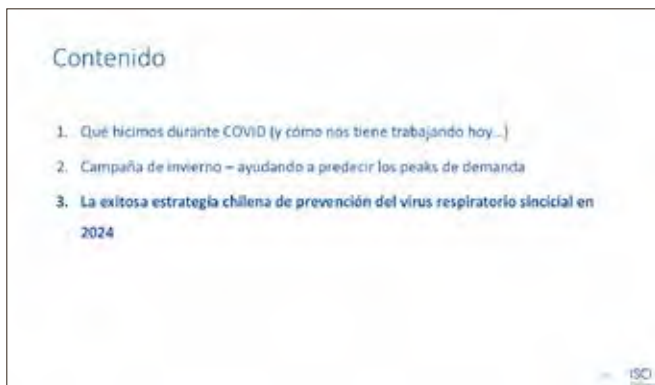


Figura 43

Quiero llevarlos de vuelta a 2023. En 2023 el virus respiratorio sincicial golpeó a este país de una manera tremenda. Las urgencias pediátricas estaban colapsando, hubo varias muertes, 12 muertes de lactantes por virus respiratorio sincicial, se hablaba de una crisis tremenda (Figura 44).



Figura 44

Lo que ocurre con el virus sincicial es que, a diferencia de la influenza que tiene una vacuna y, además, si una persona se enferma tiene además retrovirales, el virus sincicial no tenía una estrategia de prevención o al menos no una masiva y, cuando un niño se enferma sólo puede contar con su propia fuerza y el cuidado de los equipos clínicos, sin existir remedios que lo ayuden a cursar la enfermedad.

En 2023, para que se hagan una idea, se generó la siguiente carga con el virus respiratorio sincicial (Figura 45). Lo que está acá en rojo horizontal era la capacidad de camas críticas pediátricas. Lo que está en azul fue la ocupación de camas críticas y lo que está en puntitos es la conversión de camas

básicas a camas críticas. Si ustedes ven esta zona que está acá, antes de junio, fue un verdadero tsunami, ya que la red asistencial tuvo que ir convirtiendo camas básicas a camas críticas, cosa que no es automática, a una tasa tremenda porque enfrentaba una demanda que era gigantesca por ocupación de camas UCI por virus respiratorio sincicial.



Figura 45

Por cierto, cada vez que una cama básica se convierte en una cama crítica para recibir a un niño con virus sincicial, significa que hay otras patologías o necesidades que dejan de atenderse porque las camas básicas ya no están disponibles, por ejemplo, para recibir a algún niño que requiera una cirugía.

La estrategia, la única estrategia que estaba disponible para prevenir el virus sincicial, era un anticuerpo monoclonal llamado Palivizumab, que servía para proteger contra hospitalización grave a los niños que la recibían, pero es de verdad muy caro. Era muy caro y se utilizaba, por lo tanto, solo en los grupos de riesgo, es decir, niños muy prematuros o cardíacos o con problemas pulmonares. El grupo de riesgo era menos de un 2% de los niños nacidos, por ejemplo, durante la campaña invierno. Y el Palivizumab requería además la inyección de 5 dosis. Su estrategia era muy limitada (Figura 46).

Hubo, sin embargo, un desarrollo muy relevante que venía gestándose desde hace años, que era un nuevo anticuerpo monoclonal que se llamaba Nirsevimab.

Y el Nirsevimab generaba una nueva oportunidad. Los estudios clínicos mostraban una alta eficacia para prevenir hospitalización. Su presentación requería una sola dosis y

estaba pensada por lo tanto para una utilización mucho más masiva (Figura 47).



Figura 46

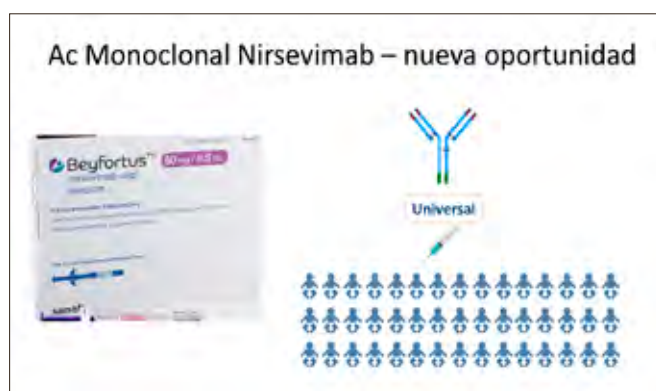


Figura 47

Nirsevimab (o Beyfortus) durante 2023 ya estaba aprobado por la FDA y estaba comenzado a ser utilizado limitadamente en algunas partes de Estados Unidos, Francia y España, Galicia en particular.

Había una oportunidad gigante aquí de hacer algo. Pero Nirsevimab estaba muy lejos de Chile, porque estaba recién utilizándose en los países desarrollados y los productores pensaban venir, en Latinoamérica, más bien a Brasil, un mercado grande.

Sin embargo, desde el Instituto y continuando nuestro trabajo conjunto con la Facultad de Medicina, tuvimos una reunión con el proveedor para contarles qué es lo que habíamos aprendido desde la pandemia, de la importancia de la transdisciplina y de lo que habíamos hecho en Chile,

de la enorme cultura de inmunización que existe en nuestro país, de la muy buena toma de datos que tenemos en Chile y, por lo tanto, de la posibilidad de tener datos pre y post intervención para medir impacto y poder hacer el tipo de cosas que habíamos hecho durante el COVID y durante las campañas de invierno (Figura 48).



Figura 48

Al proveedor le pareció interesante la idea de venir a Chile, dado todo lo que le habíamos contado, pero la verdad es que lo que faltaba era estudiar si para un país de ingreso medio como Chile, esta era una estrategia efectiva y, en particular, si era una estrategia costo-efectiva.

Comenzamos entonces a mediados de 2023, y mientras trabajamos en esa campaña de invierno cuya proyección nos estaba dando tan malas noticias, a estudiar la efectividad y la factibilidad de una campaña de inmunización de VRS en Chile, utilizando este nuevo anticuerpo monoclonal (Figura 48).

Lo que hicimos fue un análisis retrospectivo durante 2023. Construimos escenarios contrafactuales para 2019-2022-2023, utilizando la base de datos de ingresos que nos entrega toda la información de todas las hospitalizaciones en el país de manera muy detallada. La base de datos del Departamento de Estadística e información en Salud (DEIS) es realmente una maravilla. Y lo que hicimos, esencialmente, fue tratar de estudiar qué hubiera pasado si se hubiera usado el Nirsevimab en términos de reducir la utilización de camas básicas UCI, reducir ingresos hospitalarios, consultas de una urgencia y también, por cierto, reducir la necesidad de usar Palivizumab, que era muy caro.

Y finalmente lo que queríamos hacer era un análisis costo-beneficio comparando los ahorros en los costos directos asociados a la hospitalización y la consulta de urgencia contra el costo del medicamento del Nirsevimab, que era caro. Queríamos saber además cuál es la estrategia óptima para Chile, es decir, a quién inmunizábamos (Figura 49).

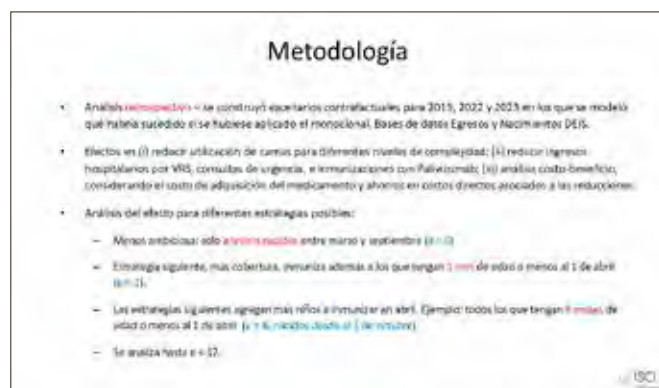


Figura 49

Lo que hicimos entonces fue utilizar las eficacias conocidas de los estudios clínicos que nos decían que la reducción contra la admisión, contra la probabilidad de ser hospitalizado cuando usamos el Nirsevimab era del orden del 76% y generamos un modelo de simulación (Figura 50).

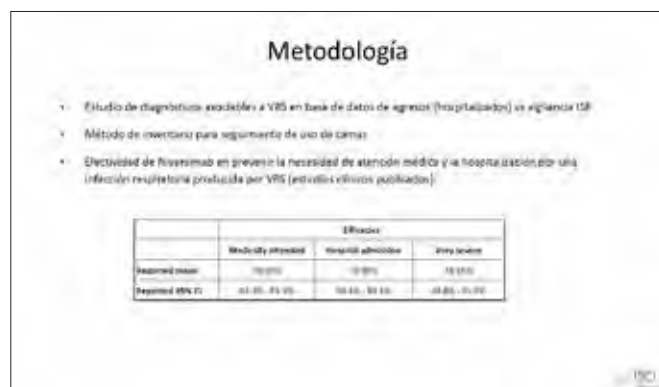


Figura 50

Es decir, en los años anteriores identificábamos a la población que en la estrategia que estamos estudiando hubiese sido elegible para utilizar el Nirsevimab. Y a esa persona le lanzamos un dado y decíamos: este niño que tiene tres meses al inicio de la campaña de invierno, si hubiese usado

el Nirsevimab con 76% de probabilidad no hubiese sido hospitalizado, pero con 24% de probabilidad sigue al hospital. Y generamos universos paralelos en que la población era inmunizada y, por lo tanto, no utilizaba el hospital, esa cama quedaba liberada, mientras que los que no estaban en la población elegible para la estrategia analizada seguían su curso real. Por lo tanto, si no estaban inmunizados y hubiesen sido hospitalizados, seguían hospitalizados (Figura 51).

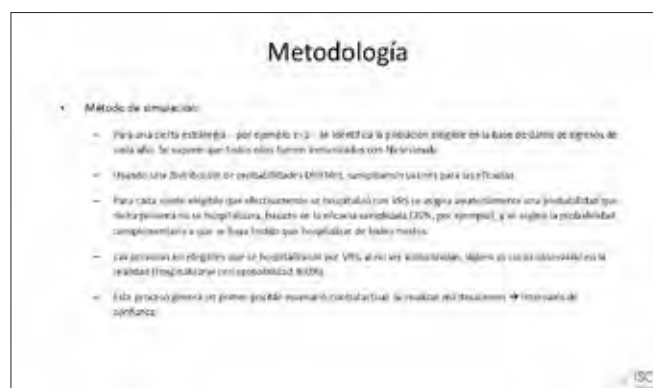


Figura 51

Con esto generamos escenarios contrafactuales que iteramos miles de veces para generar intervalos de confianza y generar escenarios como estos (Figura 52). Esta es nuestra predicción de cómo se hubiese aplanado la curva de la campaña de invierno de 2023, si es que se hubiese utilizado el Nirsevimab. Entonces, lo que decimos es que, en vez de la curva azul de utilización de camas, si se hubiese inmunizado a todo niño recién nacido, hubiéramos tenido la curva celeste de arriba que se muestra. Pero si se hubiese inmunizado, además de todos los niños nacidos en temporada, a todo niño de seis meses o al menos al inicio de la temporada del sincicial, la curva hubiese sido esta que está acá, que corresponde a $e=6$. Es decir, sólo hubiese habido un aumento, un traspaso de la capacidad breve, pequeño, en un espacio breve de tiempo.

Estimamos entonces cuántos días-camas se hubieran ahorrado por tipo de cama, cuantas consultas de urgencia y muy relevantemente, tomando en cuenta los costos de las hospitalizaciones, demostramos que una estrategia de inmunizar a todo niño menor de seis meses era costo-efectiva, es decir, los ahorros en hospitalizaciones más que cubrían los costos de adquisición del medicamento (Figura 53).



Figura 52



Figura 53

Esto lo terminamos publicando en el Journal of Infection and Public Health posteriormente (Figura 54).



Figura 54

La decisión entonces fue proceder. El 2 de febrero de 2024, el MINSAL, en una decisión pionera, tomó la decisión de adquirir Nirsevimab a un costo de 65 millones de dólares y comenzar una inmunización universal contra el virus sincial (Figura 55).



Figura 55

¿A quién se iba a inmunizar? a todo lactante menor de seis meses y a todo nacido durante la temporada de circulación del VRS, de abril a septiembre (Figura 56).

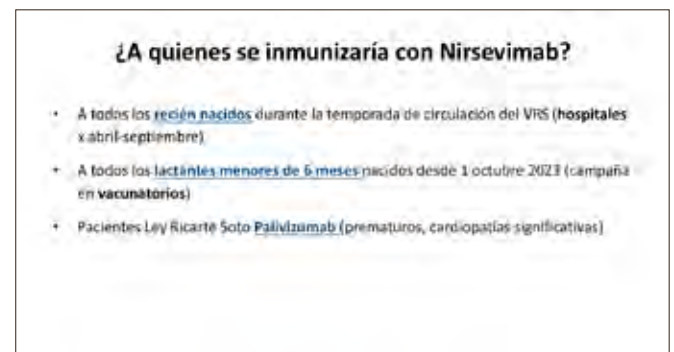


Figura 56

La población objetivo se calculaba en 170.000 niños, un trabajo gigantesco (Figura 57).

Y la primera dosis de Nirsevimab del hemisferio sur se inyectó el 26 de marzo de 2024 para proteger a Samantha contra el virus respiratorio sincial. Nosotros comenzamos en ese momento a monitorear el impacto de la estrategia (Figura 58).



Figura 57

No hubo ningún problema grave atribuible a Nirsevimab, cero. Por lo tanto, resultó ser una estrategia muy segura (Figura 60).



Figura 58

Las coberturas en Chile fueron óptimas, 98% en los recién nacidos y 90,3% en los niños ya nacidos durante la campaña (Figura 59).

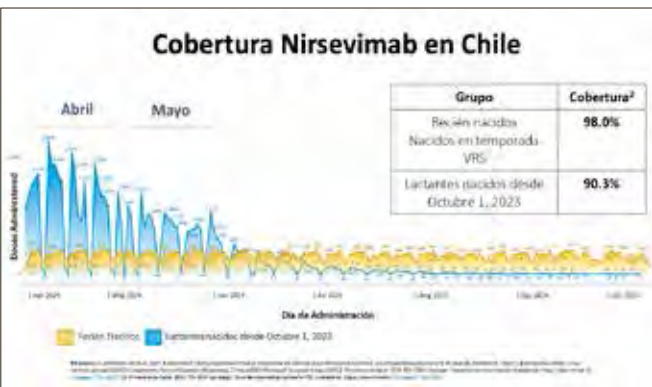


Figura 59

Seguridad Nirsevimab

- 17 ESAVIs
- 3 pasaron a estudio
- Ninguno atribuible a nirsevimab
- MUY seguro

Comunicación personal, Programa Nacional de Inmunizaciones, MINSAL, Chile

Figura 60

¿Y qué es lo que encontramos al terminar la campaña de invierno? Lo que ven a la derecha (Figura 61) son los casos acumulados, hospitalizaciones acumuladas por virus sincicial en la población que no era elegible en 2024 para Nirsevimab. ¿Por qué nos interesaba mirar esto? Porque nos decía cómo hubiese sido, dado que esta es la población no elegible, cómo hubiese sido VRS el 2024. Y lo que vemos al compararla con los otros años es que hubiese estado entre 2019 y 2022, más o menos. Pero lo que ocurrió en la población elegible, en el panel de la izquierda, es que los casos acumulados fueron realmente pocos y el impacto fue gigante.



Figura 61

Si lo quieren ver de esta otra manera, se pueden ver los *peak* de hospitalizaciones (Figura 62), aquí se puede ver a la derecha que, en las camas básicas, 2024 en la población no elegible se parecía mucho a 2022. Y, sin embargo, lo que pasó en la población elegible, en el panel de la izquierda, fue que ese *peak* no existió. Y, por lo tanto, no hubo estrés de camas básicas por virus respiratorio sincicial.



Figura 62

Y en camas críticas, que en 2023 nos tuvo contra las cuerdas, se puede ver perfectamente que no hubo, efectivamente no hubo una campaña de invierno como en los años anteriores (Figura 63). No existieron estos *peaks* tremendos que sufríamos, sino que las camas críticas estuvieron casi siempre en 2024 con disponibilidad.

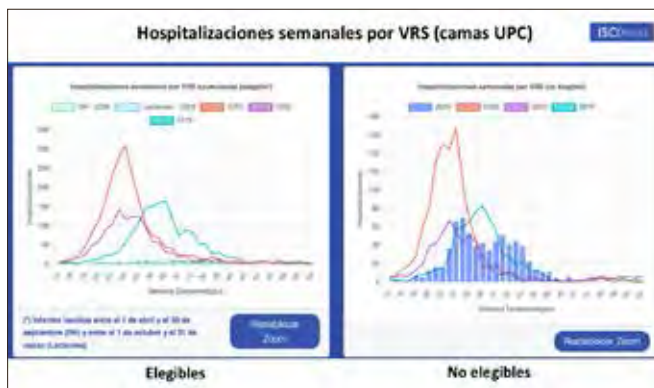


Figura 63

Y pudimos ver que incluso para aquellos niños que estando inmunizados se enfermaron, sus estadías en la hospitalización fueron más cortas. Es decir, la inmunización, incluso

para aquellos niños que se enfermaron a pesar de estar inmunizados, permitió que estuvieran menos tiempo en el hospital: Cerca de dos días y medio menos, en promedio, en las camas críticas (Figura 64).

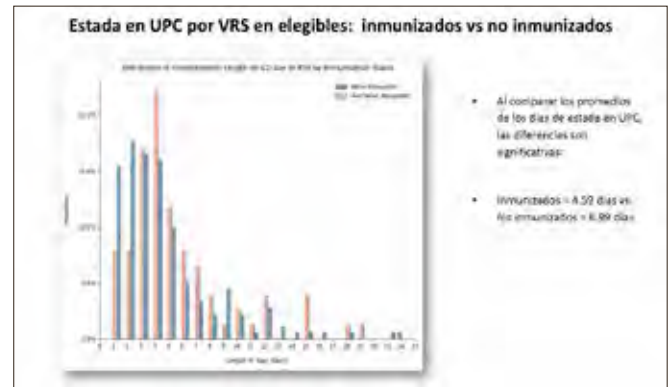


Figura 64

Muy importantemente, todos estos ahorros, toda esta disminución de hospitalizaciones significa no solo menos niños enfermos, sino padres y madres que pueden trabajar, que no los tienen que cuidar. En términos de muerte, pasamos de 13 muertes en 2023 a cero muertes en 2024, que es una gran noticia: en la campaña de invierno 2024 no se registraron fallecimientos en menores de un año (Figura 65).



Figura 65

Con estos números enormes, 160 mil inmunizados —la estrategia de inmunización más grande contra el VRS de todo el mundo— pudimos estimar la efectividad, la protección contra hospitalización grave con esta estrategia (Figura 66).

Effectiveness of RSV Prevention Strategy in Chile with nirsevimab

	Immunized (N=145090)		Non-immunized (N=6087)		Effectiveness % (95% CI)
	Events	Person-years	Events	Person-years	
RSV-related LRTI hospitalization	957	125,28.35	117	15,807.48	79-83 (72.57-79.72)
RSV-related ICU admission	180	124,79.62	85	15,809.90	84-94 (79.47-88.95)
All-cause LRTI hospitalization	2005	173,733.88	438	15,776.54	96-98 (93.97-99.50)
All-cause hospitalization	6714	168,807.67	1,776	18,084.63	87-98 (84.85-93.23)

Nirsevimab effectiveness using Stratified Cox proportional Hazard rate models. LRTI: Lower respiratory tract infections.

RSV Hospital admission reduction: 80% (2019) 90% (2022) 95% (2023)

Figura 66

Y esto, el 11 de junio, la estrategia chilena va a salir publicada en The Lancet Infectious Diseases de nuevo, cosa que nos llena de orgullo, donde demostramos con diferentes modelos COX estratificados cuáles son las eficacias y el impacto de la estrategia (Figura 67).

Effectiveness of RSV Prevention Strategy in Chile with nirsevimab

	Immunized (N=145090)		Non-immunized (N=6087)		Effectiveness % (95% CI)
	Events	Person-years	Events	Person-years	
RSV-related LRTI hospitalization	957	125,28.35	117	15,807.48	79-83 (72.57-79.72)
RSV-related ICU admission	180	124,79.62	85	15,809.90	84-94 (79.47-88.95)
All-cause LRTI hospitalization	2005	173,733.88	438	15,776.54	96-98 (93.97-99.50)
All-cause hospitalization	6714	168,807.67	1,776	18,084.63	87-98 (84.85-93.23)

Nirsevimab effectiveness using Stratified Cox proportional Hazard rate models. LRTI: Lower respiratory tract infections.

RSV Hospital admission reduction: 80% (2019) 90% (2022) 95% (2023)

THE LANCET Infectious Diseases

Articles

Effectiveness and impact of nirsevimab in Chile during the first season of a national immunisation strategy against RSV (NIRSE-CL): a retrospective observational study

Authors: [Names]

The Lancet Infect Dis 2025; Torres JP, Sauré D, Ryan M, Basco JJ et al. in press.

Figura 67

¿Qué es lo que sigue? Chile está repitiendo su estrategia en 2025, comenzó la vacunación el 1 de marzo de 2025, tanto contra la influenza como la inmunización contra el virus sincial (Figura 68).

Chile fue el primer país del hemisferio sur que inició esta estrategia. Fuimos los primeros con una estrategia nacional universal, se lograron coberturas óptimas, las mejores del mundo, donde aquí los aplausos van, por supuesto, para padres y madres, pero también para nuestra Subsecretaría de Salud Pública, para el Plan Nacional de Inmunizaciones, para los APS, para nuestros consultorios. Y Chile ha sido la punta de lanza para Sudamericana; en 2025 se estarían sumando Paraguay y Colombia a esta estrategia (Figura 69).

Estrategia prevención VRS 2025

- ¿Cómo sigue Chile? Repetir estrategia universal con Ac monoclonales 2025, ampliando levemente grupos



Chile inicia la campaña de "Vacunación e inmunización 2025", se anticipa al aumento de virus respiratorios

Anuncio-MINSAL Chile, 1 marzo 2025

Figura 68

Comentarios VRS

- Chile 1er país del hemisferio sur que inició esta estrategia de prevención contra el VRS (26 marzo 2024) – primeros en estrategia nacional y universal
- Se lograron coberturas óptimas (las mejores del mundo) - ¡Aplausos para todos!
- Gran disminución de hospitalizaciones y casos graves por VRS, mortalidad y consultas – hubo, efectivamente, un antes y un después
- ¿Seguridad? Estrategia muy segura
- Chile, punta de lanza para Sudamérica – en 2025 se suman Paraguay y Colombia

Figura 69

Comentarios finales.

Desde la Ingeniería podemos hacer trabajo profundamente transdisciplinario de mucho impacto. En ese sentido las iniciativas que yo les mostré entregaron herramientas concretas para decisiones de salud pública, para el monitoreo de esas decisiones y para la evaluación. Lo realizado en estos cinco años, además, es una muestra bien interesante de colaboración entre la academia, el sector público y el sector privado, esta triple hélice a la que tanto nos referimos. Y generamos desarrollos innovadores que tienen reconocimiento internacional, por ejemplo, el Premio Franz-Edelman en el año 2022 (Figura 70).

Y como comentario final, quiero decir que los ingenieros tenemos muchos espacios, más allá de los tradicionales, para contribuir a nuestro país. A mí me gustan estas tres imágenes (Figura 71), porque hablan precisamente de este espacio en el que los ingenieros colaboramos con otros sectores y podemos tener un impacto gigantesco con buena ingeniería.



Figura 70



Figura 71

Acá a la izquierda pueden ver el cierre de la campaña de invierno 2024, que, de manera muy especial y única, se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, en Ingeniería, de la Universidad de Chile, lo que demuestra a lo que yo me refiero.

Cinco minutos tarde, Presidente, con eso termino mi conferencia (Figura 72).

Muchas gracias.

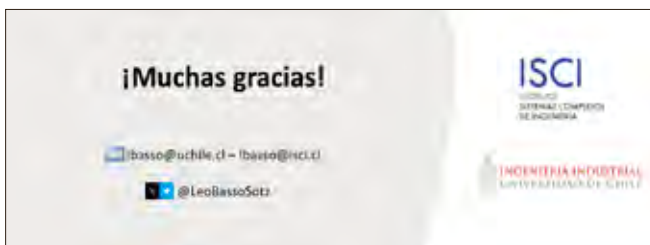


Figura 72

El Sr. Basso, al final de su presentación, respondió preguntas y comentarios de los asistentes.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Muchas gracias, Leonardo, por la conferencia. Impresionante lo que han hecho tú y tu equipo.

Leonardo se refirió al Premio Edelman. No sé si todos están al tanto de lo que ocurrió. En el año 2022, Chile ganó un premio internacional por el desarrollo de las herramientas analíticas contra la pandemia.

Ese premio internacional es el Premio Edelman. Esta es una instancia que premia a la mejor intervención de ingeniería aplicada en el mundo. Este fue un trabajo conjunto realizado por el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, que preside Leonardo, en una colaboración estrecha con el Ministerio de Ciencias, el Ministerio de Salud y Entel.

Esa fue la primera parte de la presentación que hizo Leonardo. Ahora, gracias a la experiencia y a los conocimientos que se generaron en esta primera etapa, se formó un grupo humano y se generó también la confianza y una relación muy estrecha entre el Instituto de Sistemas Complejos y el Ministerio de Salud, que dio pie a que existiera esta confianza, que es algo inédito. Una confianza entre el Gobierno, específicamente el Ministerio de Salud y una facultad de ingeniería.

Entonces, repitiendo lo que nos planteó nuestro invitado Leonardo, la ingeniería tiene muchas posibilidades de participar en otros ámbitos, en ámbitos que son muy diferentes al de la ingeniería tradicional. Este es un ejemplo claro de esto y esta es una de las razones por las cuales nos interesaba que ustedes conocieran esta experiencia.

Vamos a dar paso a algunas preguntas.

Sr. Camilo Bass del Campo.

—Con relación a las cero positividades del COVID-19, ¿cómo diferenciaron las personas con inmunidad natural dentro de los vacunados?

Sr. Leonardo Basso.

—A ver, cuando nosotros comenzamos a hacer el estudio de seropositividad IgG, ese estudio comenzó como uno de seroprevalencia. Lo que buscábamos era tratar de saber cuántas personas de las que circulaban por la ciudad mostraban la presencia del anticuerpo y, por lo tanto, habían estado enfermas.

Lo que detectamos en ese momento fue una seropositividad de 15%, que nos indicaba dos cosas. Primero, que la cantidad de personas que daban positivo era cuatro veces mayor a la cantidad de personas que habían mostrado síntomas. Es decir, por cada persona sintomática, hubo tres personas más que estuvieron enfermas y que no habían mostrado síntomas. Nos demostraba también que la inmunidad de rebaño no estaba ni remotamente cercana.

Cuando comenzamos a recibir a personas vacunadas, la pregunta obvia era ¿esta persona con anticuerpos positivos contra el COVID, es porque está vacunada o porque estuvo enferma? Y lo que hicimos ahí fue estudiar la seropositividad a causa de la vacuna, porque seguíamos recibiendo a personas que tomaban el test, pero que no estaban vacunadas y, por lo tanto, teníamos un mecanismo, teníamos una señal de control respecto de cuántas personas podían estar dando positivo simplemente porque se enfermaron, versus, cuántas personas daban positivo en el test porque estaban vacunadas. Y empezamos a ver que la vacuna generaba una seropositividad, estadísticamente diferente de la de las personas no vacunadas a lo largo del tiempo.

Mostramos, por ejemplo, que la vacuna Sinovac alcanzaba su mayor seropositividad a la segunda semana de la segunda dosis. Y, por lo tanto, para contestar ¿cómo encontrábamos o diferenciábamos a las personas vacunadas pero que ya habían estado enfermas y por eso tenían seropositividad? Porque las seguíamos recibiendo a lo largo de este casi año entero de estudio.

Sr. Juan Carlos Barros.

—En función de la experiencia que ya tuvieron con el COVID, la experiencia que tú nos acabas de plantear de este programa de vacunación. ¿Cuál es tu visión de lo que sigue hacia adelante? ¿Cuáles son los planes que tienen en el instituto, en

la relación con el MINSAL? ¿Qué piensan hacer con todas estas capacidades que han ido construyendo en el tiempo?

Sr. Leonardo Basso.

—Es una súper buena pregunta. Nosotros vamos encontrando áreas de desarrollo. Algunas las planificamos, pero van apareciendo otras a medida que vamos interactuando y eso también es súper importante. El desarrollo de nuevas áreas va ocurriendo mientras más interacción hay. No es que salgan necesariamente sólo del pensamiento abstracto de uno u otro lado.

¿En qué cosas estamos? Campaña de invierno, por cierto, es algo en lo que vamos a seguir trabajando. Hemos hablado muchísimo de los niños y el sincicial. Hemos hablado mucho de influenza, pero, por ejemplo, el virus sincicial golpea también muy fuertemente a los adultos, particularmente a las personas mayores. Y ahí hay un espacio para estudiar otras intervenciones posibles de prevención del virus respiratorio sincicial en personas mayores.

Hay una serie de otros virus no respiratorios que nos afectan mucho y sobre los cuales se puede intervenir. El rotavirus, por ejemplo, que afecta a los niños muy pequeños.

Pero se nos abren también, otros espacios de trabajo particularmente relacionados con el cáncer, de nuevo que tienen que ver con salud pública. Nosotros como ISCI firmamos hace muy poco un convenio de colaboración que viene a formalizar un trabajo que estamos iniciando con el Instituto del Tórax para evaluar el tamizaje temprano en población de riesgo por cáncer de pulmón. Entonces, tenemos diferentes áreas orientadas a la salud pública en la que podemos trabajar.

Y, por cierto, no quiero dejar de decir que las áreas que quizás son más clásicas de los ingenieros, como ayudar a optimizar el uso de la infraestructura, el agendamiento, las colas por tiempos de espera. Esos trabajos, por cierto, se siguen haciendo. Así que el trabajo es amplio, presidente. A veces aparecen más cosas de las que podemos hacer.

Muchas gracias.

Fin de la Conferencia.

MEDICIONES DEL BIENESTAR ORGANIZACIONAL

Por Ricardo Nanjari Román*



¿Con quién debo temer el medir mi fuerza?

Ludwig van Beethoven

Uno de los grandes desafíos de las organizaciones es lograr conciliar el éxito económico con el bienestar de sus colaboradores. En este contexto, se ha ido transitando desde un modelo que pone énfasis en la productividad, con estilos de comunicación muy jerarquizados hacia otro dónde el foco está en las personas, con una comunicación más horizontal. Las empresas ya no solo buscan la productividad de sus trabajadores, sino que también buscan tener una buena relación con ellos, dando lugar a culturas organizacionales que permiten conciliar los intereses de las personas con el de las organizaciones. No basta con atraer y retener al talento, también hay que inspirarlo y mantenerlo. Por ello, el bienestar organizacional ha cobrado gran relevancia. No obstante, las organizaciones necesitan medir el impacto de sus acciones y, entonces, la medición de los resultados de las acciones relativas al bienestar se hace también necesaria. En este proceso, es crucial tener una cultura de mejora continua, con mediciones, indicadores y modelos que en forma sistemática permitan evaluar y alinear al bienestar con los planes y las estrategias organizacionales.

¹ Este escrito corresponde al capítulo 5 del libro inédito: “Bienestar y felicidad en organizaciones saludables: de la planificación a la ejecución” del ingeniero civil industrial Ricardo Nanjari Román.

El Significado de Medir.

Medir significa comparar una cantidad con otra, y también puede significar comprobar si las acciones que se realizan permiten influir en los objetivos que se quieren conseguir. Medir es una oportunidad para mejorar. Tal como lo dijo el matemático y físico William Thomson Kelvin, “lo que no se mide, no se puede mejorar”.

Como ejemplo: Una organización con un índice de rotación del 5%, medido como porcentaje de personas que abandonan la organización, permite establecer comparaciones con otras empresas similares o con indicadores históricos de la misma empresa, para estudiar y corregir las causas que lo están provocando.

Las mediciones permiten obtener retroalimentación acerca de los objetivos, implementar cambios que permitan acercarse a éstos y analizar desempeños para obtener mejores resultados.

Por ejemplo: En la medición de clima laboral, la frase “recibo un buen trato” obtuvo un 40% de aprobación, comparado con el 85% que obtuvieron las mejores empresas de la muestra. Este indicador entrega información para que la organización pueda realizar acciones para mejorar la percepción de mal trato existente.

En la evolución que han tenido las organizaciones, un aspecto relevante ha sido la introducción de los sistemas de gestión de calidad, que han permitido mejorar las estrategias para entregar mejores productos y servicios. Estos sistemas han evolucionado desde la inspección de calidad, pasando por el control estadístico de procesos, para avanzar al involucramiento de toda la organización y llegar a una gestión estratégica integral, con la aparición de los modelos de excelencia. En esta evolución las mediciones han sido un elemento central del desarrollo. Se puede medir la satisfacción del cliente y de los colaboradores, se puede medir la eficiencia de los procesos y los resultados, no solo financieros y económicos, sino también aquellos que impactan en las personas, los clientes y en la sociedad. Se puede medir el desarrollo de las personas que construyen valor, se puede medir la productividad que genera valor, se puede medir la sostenibilidad que crea valor y también los riesgos y amenazas que pueden destruir valor.

Como ejemplo: Una política de calidad de una gerencia de Personas asume el compromiso de entregar servicios de calidad que aseguren el cumplimiento de los requisitos, legislación y reglamentación vigente y que permitan aumentar la satisfacción de los trabajadores. Para que esta política tenga sentido, se deberá traducir en servicios concretos con indicadores de cumplimiento para los compromisos señalados.

Generar una cultura de medición permite hacer seguimiento a los planes de acción, comparar resultados con los planes, generar cambios y mejoras, y promover la autogestión. Desarrollar competencias de medición permite agregar valor a una empresa.

Los objetivos de las mediciones son ayudar a los planes para que obtengan resultados comprobables, identificar oportunidades de mejora, corregir desviaciones, tomar decisiones y ordenar prioridades.

Tipos de Mediciones.

Las mediciones se pueden calificar según su tipo. Puede haber mediciones subjetivas u objetivas. A las mediciones subjetivas también se les llama calificaciones, y se obtienen, por ejemplo, a través de encuestas. Una encuesta de clima laboral mide percepciones, permitiendo conocer lo que piensan los trabajadores acerca de algunos temas de interés común para ellos y de la organización en la que trabajan.

Un ejemplo: El cuestionario de emociones Fordyce Happiness Measures (Fordyce, 1977) entre sus varias preguntas, una de ellas dice: ¿cuán feliz suele sentirse una persona? Las respuestas van puntuadas de 0 a 10, según se sienta sumamente infeliz (0) a sumamente feliz (10), de acuerdo con la apreciación subjetiva de quien responde.

Las mediciones objetivas dependen del objeto a medir. Estas pueden ser directas, como por ejemplo medir la luminosidad, temperatura o ruido de un recinto, o pueden ser indirectas, cuando refieren a otra medición estandarizada.

Como ejemplo: Para evaluar si una nueva medida de prevención de riesgos afecta la cantidad de accidentes del trabajo, se aplica la medida de prevención y se compara la cantidad de accidentes ocurridos antes y después de la adopción de la medida. Es decir, indirectamente se obtiene un valor de la medida de prevención.

Otro tipo de clasificación son las mediciones reproducibles y no reproducibles. Se llaman reproducibles aquellas mediciones que se pueden realizar varias veces por diferentes investigadores y obtener siempre los mismos resultados. Estas generalmente se refieren a mediciones sobre objetos o a situaciones estándares. En cambio, las no reproducibles son aquellas mediciones que cada vez arrojan resultados diferentes, por lo que se acepta el valor más representativo, o promedio.

Un ejemplo: Para medir cuánto demora un proceso de contratación tipo en una cierta organización, habrá que recurrir a la medición de varios procesos y calcular el promedio de aquellos que tengan condiciones similares.

También se puede reconocer un tipo de mediciones, según el cumplimiento de requisitos, como las Normas ISO (un estándar con reconocimiento internacional creado con el objetivo de ayudar a las empresas a establecer unos niveles de homogeneidad en relación con la gestión, prestación de servicios y desarrollo de productos en la industria). Estas buscan medir el cumplimiento por parte de las organizaciones de ciertos requisitos (llamados “deberes”) y ciertas recomendaciones (llamados “debería”) que han sido definidos previamente de acuerdo con un estándar.

Por ejemplo: La Norma ISO 26000 establece que una organización debe tener prácticas justas de contratación, lo cual puede ser verificable por un auditor de la norma y la organización debe mostrar registros que acrediten su cumplimiento.

Las mediciones científicas son aquellas que han intentado objetivar aspectos que tienen componentes subjetivas, como es el bienestar y la felicidad. Para estas mediciones se han desarrollado metodologías rigurosas, utilizando experimentos, observaciones y encuestas aplicadas a través del tiempo.

La validez de una medición dependerá de la confiabilidad de los datos, de su precisión, oportunidad, pertinencia y de los procedimientos requeridos para su análisis.

Escalante (2019) señala que los instrumentos de medición del bienestar organizacional deben incluir variables individuales y también relacionales. Además, deben tener una buena consistencia interna y sensibilidad a los cambios en

la organización. Así distingue tres categorías de mediciones de bienestar organizacional:

- Las medidas de evaluación: Mide cómo las personas evalúan su vida en las organizaciones. Sirve para correlacionar aspectos organizacionales con eventos importantes para las personas. (Por ejemplo, medir “Satisfacción con el trabajo”, en escala de 0 a 10)
- Las medidas de experiencia: Se asocian con la interpretación que las personas hacen de lo que significa el bienestar organizacional. (Por ejemplo, preguntar: ¿Cuán feliz te sentiste ayer?, en una escala de 0 a 10)
- Las medidas eudemónicas (o de felicidad): Se miden a partir de una lista objetiva con significados definidos externamente. (Por ejemplo, preguntar: ¿Valen la pena las cosas que haces en la organización?)

Las mediciones desempeñan un papel crucial en el mejoramiento continuo al permitir que las organizaciones identifiquen oportunidades de optimización y realicen cambios progresivos. Este enfoque, fundamentado en el ciclo de mejoramiento continuo, difundido por Edwards Deming en la década de 1950, se ha convertido en una herramienta valiosa que se aplica en diversos ámbitos, incluidos aquellos enfocados en el bienestar organizacional, tal como lo veremos más adelante. Con la integración de tecnología avanzada, las mediciones se hacen más sofisticadas, precisas y en tiempo real, facilitando un análisis más detallado y eficiente de los procesos. Esto permite a las organizaciones no solo implementar mejoras más informadas, sino también adaptarse de manera ágil a las necesidades cambiantes y fomentar un entorno de trabajo más saludable y sostenible.

Los Indicadores.

Los indicadores son datos que dan cuenta de las características o intensidad de un hecho, para analizar su evolución. Éstos son fundamentales en los procesos de medición y permiten observar en forma fácil y explícita lo que se quiere mostrar.

Como ejemplo: Un indicador de capacitación puede ser el porcentaje de horas de capacitación sobre las horas trabajadas mensualmente, y se puede utilizar para comparar con un estándar de la industria o con su evolución histórica dentro de la organización.

El propósito de los indicadores es contar con información relevante para la planificación, la toma de decisiones y el mejoramiento continuo, para cuantificar cambios y hacer seguimientos. Un indicador permite establecer comparaciones entre procesos similares, crear estándares y se puede utilizar para priorizar la asignación de recursos o para determinar la continuidad de un programa.

Los indicadores pueden ser cualitativos (por ejemplo, estar de acuerdo con una opinión) o cuantitativos (por ejemplo, un indicador como el señalado en Figura 1, en la cual se muestra la evolución del porcentaje de ausentismo en el tiempo), también pueden ser de impacto (por ejemplo, el índice de desempleo), de resultados (por ejemplo, el número de personal contratado como porcentaje del total), de producto (por ejemplo, el número de reclamos en un período de tiempo), de procesos (por ejemplo, el tiempo de espera promedio para obtener un servicio) o de gestión (por ejemplo, el porcentaje de participación en evaluación de desempeño).

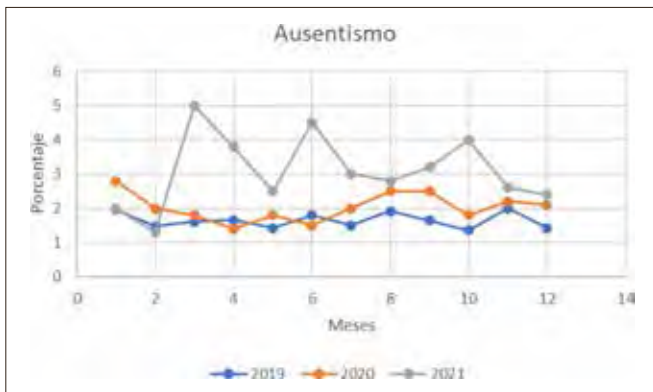


Figura 1. Indicador de ausentismo medido durante tres años en una empresa

En este contexto, existen dos herramientas utilizadas para medir el desempeño y gestionar objetivos en una organización, los indicadores KPI (Key Performance Indicators) y los OKR (Objectives and Key Results). Los KPI son indicadores específicos y estratégicos que se utilizan para evaluar el éxito de una actividad en relación con un objetivo clave, midiendo el progreso y ayudando a identificar áreas de mejora. Por otro lado, los OKR combinan objetivos claros y medibles con resultados clave que permiten evaluar el avance hacia esos objetivos. Mientras los KPI se centran en el seguimiento del rendimiento, los OKR se enfocan en alinear equipos y esfuerzos hacia metas ambiciosas.

Si se va a diseñar un programa de bienestar, será necesario planificar su instauración, ponerlo en marcha, y cuando esté funcionando, será importante verificar que se estén obteniendo los resultados esperados a través de mediciones e indicadores adecuados. También será conveniente hacer seguimientos en el tiempo, que permitan realizar modificaciones y mejoras. En cada etapa se pueden utilizar mediciones e indicadores que apoyen el proceso. La siguiente metodología, permite visualizar cómo se puede llevar a cabo este ciclo.

El Ciclo de Mejoramiento Continuo.

El ciclo PHVA (PDCA en inglés) o también conocido como ciclo Deming, llamado así en Japón como homenaje a Edward Deming, uno de los principales difusores del concepto de calidad total, es una metodología sencilla que se utiliza para el análisis, seguimiento y mejora continua de los procesos y sistemas en las organizaciones y consta de cuatro etapas: Planificar, Hacer, Verificar y Actuar (PHVA), como se muestra en Figura 2. Su aplicación en forma cíclica asegura el progreso continuo (James, 2006).



Figura 2. Ciclo PHVA o Deming

Esta metodología es muy útil para implementar procesos en una organización y puede servir en la implementación de programas de bienestar, en los cuales se pueden establecer mediciones e indicadores que permitan evaluar cada etapa y mejorar su desempeño.

- **Planificar.** La etapa de planificación consiste en estudiar la situación actual, identificar los problemas, revisar las teorías sobre las causas y analizar las formas posibles a través de las que se pueden resolver, declarando los objetivos para poder obtener ciertos resultados. En esta etapa se describen los procesos existentes o por desarrollar, se detallan los objetivos y expectativas, se definen los indicadores, se recopilan datos históricos, se desarrollan soluciones factibles y los planes de acción.

Ejemplo: para lograr el propósito de mejorar el clima laboral, en esta etapa se definen los aspectos que se desea observar, medir y mejorar, se detallan las etapas que contendrá el estudio, el universo de aplicación y el instrumento de medición y sus indicadores de éxito.

- **Hacer.** En la etapa de realización, se implementa el plan y se ejecutan los procesos definidos previamente y se realizan las mediciones.

Ejemplo: para el proceso de evaluación de clima laboral, en esta etapa corresponde sensibilizar a los trabajadores, aplicar el instrumento de medición con las características definidas en el plan, recopilar los datos y registrar los resultados.

- **Verificar.** En la etapa de verificación, se realiza el seguimiento y se analizan las mediciones para comparar los resultados con los objetivos en base a indicadores definidos. Se registra el aprendizaje y se determinan las medidas que permitirán seguir mejorando los procesos.

Ejemplo: en la evaluación del clima laboral, esta etapa corresponde a la observación de los resultados del proceso y de las mediciones, la revisión de la información obtenida y de sus indicadores para compararla con la información histórica, de tal modo de revisar si los procesos implementados dieron los resultados esperados.

- **Actuar.** En esta etapa, se toman decisiones sobre la diferencia entre los resultados y los objetivos y se prepara para aplicar los cambios que permitan eliminar las desviaciones, o se realizan acciones que permitan mejorar continuamente los resultados.

Ejemplo: Una mala evaluación en algún criterio de clima laboral puede significar que se deban planificar algunas intervenciones por medio de talleres o capacitaciones, o tal vez, tomar algunas decisiones de mejoras en infraestructura o modificaciones ergonómicas, entre otras.

Posteriormente, este ciclo lleva otra vez a la etapa de Planear para repetir el proceso con la incorporación de las oportunidades de mejoramiento detectadas.

El ciclo Deming se enfoca tanto hacia el mejoramiento continuo a corto plazo como hacia el aprendizaje organizacional de largo plazo. En el ámbito del bienestar organizacional, este ciclo permite incorporar el enfoque de mejoramiento continuo de los sistemas de gestión de calidad en el alineamiento de los programas y acciones de bienestar con las estrategias organizacionales. La importancia de este método, más que su orientación a la solución de problemas es su utilización en forma sistemática para un mejoramiento continuo. Edward Deming decía que, como parte de los principios de calidad, las empresas debían adoptar una filosofía de cooperación, donde todas las partes se vieran beneficiadas y que esta fuera compartida por empleados, clientes y proveedores.

Un aspecto importante para tener en consideración al escoger una medición es que lo que se mide tenga una incidencia en lo que se hace, puesto que, si las mediciones son defectuosas, entonces las decisiones o consecuencias pueden ser inadecuadas. Un ejemplo de esto lo hace notar el informe Stiglitz-Sen-Fitoussi (2008) señalando que la elección entre aumentar el PIB y proteger el medio ambiente puede ser una falsa elección, pues si la degradación del medio ambiente se incluye correctamente en las mediciones del desarrollo económico, ésta debería ser un factor para considerar en el resultado.

La Metodología SMART.

Una planificación adecuada debe contemplar el mayor número de aspectos que impacten en los resultados esperados, para que las mediciones y sus interpretaciones, a través de indicadores, no conduzcan a decisiones inapropiadas. Los indicadores bien definidos son una referencia que permite evaluar los resultados.

En la construcción de indicadores dentro del ciclo Deming, se puede utilizar la metodología SMART, creada para determinar metas y objetivos. La sigla, fue tomada del inglés y significa:

- **S: Specific.** Indicadores que sean adecuados a lo que se desea medir, claros y que estén alineados con los objetivos que se persiguen.

- **M: Measurable.** Indicadores que sean obtenidos desde mediciones confiables.
- **A: Achievable.** indicadores que se puedan lograr y gestionar.
- **R: Relevant.** Indicadores que sean significativos para lo que se quiere conseguir.
- **T: Timely.** Indicadores que sean oportunos en la entrega de información.

Ibáñez (2021) propone cinco pasos para la creación de objetivos SMART en el diseño de una estrategia de felicidad, crear los objetivos siguiendo las indicaciones de la sigla, tener claro el público objetivo, traducir el plan en acciones concretas, asignar las responsabilidades y establecer cronogramas. Todo lo anterior acompañado de un plan de comunicaciones de tal modo de comprometer a toda la organización.

Un ejemplo de esta metodología se puede apreciar en el cálculo de la tasa de días perdidos por accidentes laborales o enfermedades profesionales. Este es un indicador que permite conocer cuántos días se ausentan los trabajadores a causa de los accidentes y enfermedades laborales. Permite detectar focos de acción para disminuir el ausentismo por esta causa. Su fórmula es:

$$\text{Tasa días perdidos} = (\Sigma \text{ días perdidos en licencias médicas por accidentes laborales o enfermedades profesionales en el periodo}) / (\Sigma \text{ días laborales} \cdot \Sigma \text{ trabajadores}) \cdot 100$$

El indicador es específico, se mide objetivamente, es gestionable, relevante y entrega información del período. Su gestión permite mejorar la presencia y el bienestar de la organización.

Midiendo el Bienestar y la Felicidad.

A partir de lo visto, las preguntas que surgen son, ¿cómo medir la felicidad y el bienestar?, ¿cómo mostrar a la dirección que las acciones que se están desarrollando y los programas de bienestar que se implementan, pueden lograr los resultados esperados?, ¿cómo mejorar las acciones? Encontrar mediciones e indicadores que permitan vincular el propósito organizacional con el propósito de las personas es un desafío para los gerentes de personas y de bienestar o felicidad, quienes deben convencer a los

gerentes generales de los beneficios que puede tener en una empresa implementar acciones asociadas al bienestar de las personas.

Mediciones de Bienestar en el Mundo.

El informe “LinkedIn Global Talent Trends” (2022), señala que “las empresas de todo el mundo están descubriendo que su bienestar está estrechamente relacionado con el de sus empleados, tanto en el plano mental, físico y emocional como en el económico”.

Un factor clave para el bienestar es la flexibilidad laboral y en particular el teletrabajo que ha pasado a ser parte de una nueva normalidad. Así, según este informe, hay un 147% más anuncios que mencionan la palabra bienestar desde 2019 y un 73% más de publicaciones de empresas que hablan sobre bienestar en comparación con 2019. Por su parte, un alto porcentaje de la generación Z y Millennials busca trabajos dentro de culturas centradas en la salud mental y el bienestar. En la actualidad, las empresas priorizan el tiempo libre y adoptan nuevas estrategias para que los colaboradores puedan desconectarse y recargar sus energías. Entre las ideas propuestas en el informe para mejorar el bienestar, se destacan:

- Ofrecer más tiempo a los trabajadores, disminuyendo reuniones y dejando tiempo libre para asuntos personales. Este beneficio se debe estructurar de tal modo que el menor tiempo trabajado sea compensado con mayor productividad.
- Cerrar la oficina durante algunos días, para que todo el personal se pueda desconectar. Los cierres pueden producir algunos ahorros que deben compensar las ausencias.
- Contemplar la idea de una semana laboral de cuatro días. Esta medida puede implicar ahorros o eficiencias en los procesos.

El llamado del informe es a escuchar más a los colaboradores y a generar cambios que propicien el bienestar, acciones que además tienen repercusiones en los resultados de las organizaciones.

La vida sana, comprende la salud física, mental y psicológica que son aspectos que las empresas están considerando en sus propuestas de valor hacia sus trabajadores. Se vuelve, entonces, muy importante el poder medir el impacto de

estas propuestas en el desempeño organizacional y en su sustentabilidad.

Entre las mediciones científicas que se realizan a nivel mundial, se puede destacar el “Reporte Mundial de Felicidad” elaborado por la Organización de Naciones Unidas (ONU). El informe se basa en cuestionarios donde se pregunta acerca de la felicidad personal y se cruza con datos del Producto Interno Bruto de los países.

En mediciones a nivel de países, se puede señalar el caso de Bután que incorporó como objetivo el mejorar la Felicidad Interna Bruta (FIB) relegando así la medición del Producto Interno Bruto (PIB). En este caso, los pilares para desarrollar un indicador o medida de felicidad fueron el desarrollo socio económico sostenible y equitativo, la promoción de la cultura, la conservación del medio ambiente y tener un buen gobierno. El indicador de Bután especifica que existen personas felices y otras personas que aún no han alcanzado la felicidad.

En otra iniciativa, la Comisión sobre la Medición del Desarrollo Económico y del Progreso Social, que nació en 2008 por encargo del presidente de la República Francesa, desarrolló la idea de que existen medidas diferentes al PIB que pueden ser más apropiadas para evaluar el desarrollo y el progreso social de un país. Este documento, conocido como el informe Stiglitz-Sen-Fitoussi (2008), ha permitido evaluar el desarrollo económico y progreso social a partir de tres enfoques: bienestar material, calidad de vida y sostenibilidad. Para las mediciones de bienestar y calidad de vida se han considerado las dimensiones de: condiciones de vida material (ingreso, consumo y riqueza), la salud, la educación, actividades personales y de trabajo, participación en la vida política y la gobernanza, lazos y relaciones sociales, el medio ambiente, y la seguridad, tanto económica como física. En este caso, los indicadores objetivos de las distintas dimensiones del bienestar han sido complementados con mediciones subjetivas de calidad de vida, realizadas a través de encuestas en las que se pregunta a las personas sobre la valoración que hacen de sus vidas, sus experiencias y prioridades.

La OCDE ha desarrollado una iniciativa similar, llamada “Iniciativa para una vida mejor” que consta de dos elementos: un informe con indicadores internacionales comparables acerca de bienestar, llamado “¿Cómo va la vida?” y el “Índice para una Vida Mejor”, una herramienta

en línea que promueve por medio de un sitio WEB a que la población mida el bienestar según lo que considere más importante, permitiendo a todas las personas que puedan participar en el debate sobre el progreso de la sociedad.

Otra iniciativa es la de Numbeo, una de las bases de datos colaborativa más grande del mundo, con información acerca de las condiciones de vida de muchos países. En ella se puede encontrar, un indicador de calidad de vida por país considerando el poder adquisitivo, la seguridad, la sanidad, el costo de vida, la relación precio ingreso para propiedades, el tiempo de desplazamiento en tráfico, la contaminación y el clima (fuente: <https://es.numbeo.com/calidad-de-vida/>).

Mediciones de Bienestar en Chile.

Anualmente la Fundación Chile Unido realiza estudios de buenas prácticas laborales en las organizaciones. En la versión 2021 del estudio “Buenas prácticas para la salud mental”, convocó a 176 organizaciones privadas y públicas, de diversos tamaños, obteniendo las siguientes conclusiones:

- La Salud Mental de las personas fue una prioridad dentro de las organizaciones y lo seguirá siendo en el futuro.
- Para obtener impactos positivos una estrategia de Salud Mental debe combinar, un presupuesto y la priorización de este ítem en el área de RR.HH.
- El logro de la satisfacción de los colaboradores con las ayudas entregadas para cuidar su Salud Mental se asocia de manera positiva con un buen clima laboral y adecuados niveles de compromiso con la organización.
- Las preocupaciones de los colaboradores y de los equipos de Recursos Humanos se han modificado con el tiempo, pero la Salud Mental sigue siendo la más importante.
- Las organizaciones se han movilizadas para desplegar una amplia y diversificada gama de Buenas Prácticas Laborales para contribuir a la Salud Mental y Bienestar de sus colaboradores.

Las organizaciones, además de usar la información disponible de estas mediciones y estudios realizados, ya sea a nivel mundial, por país o grupos afines, usualmente deben realizar sus propias mediciones aplicando los instrumentos disponibles para poder vincularlos con sus realidades particulares.

Para poder vincular los resultados en el bienestar de los trabajadores con los objetivos de la organización, es conveniente conocer algunos modelos que tienen como propósito gestionar la calidad, la responsabilidad social y la excelencia de las organizaciones, de tal modo de buscar formas de alinear los intereses organizacionales y personales.

El Retorno Sobre la Inversión en Bienestar.

La necesidad de contar con mediciones en materias de bienestar, que permitan conocer el retorno sobre la inversión, ha ido creciendo gradualmente con los años. En el pasado, se pensaba que estas áreas prestaban una serie de servicios que por ser intangibles no se podían cuantificar. Sin embargo, por esa razón muchas veces los proyectos asociados a bienestar eran postergados, al no poder demostrarse ante la dirección que estos podían ser rentables para la organización.

Por esto, la instauración de una metodología para calcular el retorno sobre la inversión (ROI) se hace importante y necesario. Las empresas se rigen en términos de rentabilidad y beneficios, por lo que medir el retorno sobre la inversión ROI ayuda a justificar las estrategias asociadas a la gestión de personas. Para que un proceso de estas características se pueda implementar en una organización, debe ser simple, fácil de implementar y debe utilizar métodos y técnicas que sean creíbles, con prácticas acordes a la cultura organizacional. En la actualidad las áreas de gestión de personas tienen la capacidad para poder medir, analizar y justificar sus estrategias y acciones mediante la utilización de datos que vinculen éstas con las estrategias corporativas. Se ha demostrado que invertir en las personas tiene ROI, por lo que invertir en el bienestar de las personas también incide en este indicador.

Retorno Sobre la Inversión y la Emoción.

Manu Romero (2021) señala que, además del ROI, las personas pueden generar un ROE, o sea una rentabilidad de la emoción, emulando al cambio que hizo Bután desde medir el PIB a medir el FIB, es decir de producto a felicidad. El autor señala que empresas con empleados felices tienen mejores resultados, por lo que invertir en el bienestar

mejora el ROE y el ROI. De este modo, se puede generar un círculo virtuoso de empleados felices, que producen clientes felices y empresas rentables, las cuales a su vez pueden invertir en el bienestar de sus trabajadores, para mejorar continuamente este círculo.

Algunos de los resultados, que muestran los estudios recopilados por Romero (2021), señalan que: los empleados felices en su puesto de trabajo son un 12% más productivos (Estudio Happiness and Productivity, Universidad de Warwick), que las personas felices son un 86% más creativas (Universidad de Berkeley), que empleados felices tienen menores índices de rotación y que el costo de la rotación es de 6 a 9 meses el salario de un empleado (Society for Human Resource Management).

Las medidas de ROI se pueden realizar sobre rotación de personal, ausentismo, productos defectuosos, fallas en procesos, no conformidades, problemas de seguridad, accidentes de trabajo, ventas, satisfacción de clientes, productividad, compromiso y muchos otros factores que puedan incidir en los resultados organizacionales.

El ROI (%) se puede definir como el total de beneficios netos que produce un programa de bienestar dividido por los costos necesarios para realizar ese programa.

Ejemplo: si una empresa realiza un programa para reducir la rotación de personal y se observan beneficios de MM\$20 debido a la disminución de renuncias en el período después de tomada la medida, y los costos para implementarla fueron de MM\$5, entonces el ROI (%) es de $((20-5) / 5) \times 100 = 300\%$. Es decir, por cada peso invertido hay un retorno de 3 pesos como beneficio neto, después de cubiertos los costos.

La dificultad de este método radica en encontrar los beneficios que sean cuantificables, creíbles y de impacto reconocido por la organización. Sin embargo, una vez que la organización adopta la disciplina en forma sistemática, se pueden obtener los beneficios de su utilización.

Entre los beneficios del ROI, se puede mencionar su contribución a la selección de los programas y a la priorización de los más rentables. Del mismo modo, sirve para visibilizar los programas ante la dirección.

Cómo Calcular el ROI.

Para calcular el ROI de un programa de bienestar se pueden seguir los siguientes pasos:

1. **Recolectar datos.** El primer paso es describir el problema o la situación. La recolección de datos será lo más importante a lo largo del proceso, y para ello, es necesario tener claro el propósito, el tiempo de evaluación del programa que se considera adecuado y los instrumentos de medición. Se pueden realizar mediciones mediante encuestas a diferentes grupos, por observaciones de los resultados obtenidos de las medidas de clima laboral, por focus group, por revisión de evaluaciones de desempeño, etc. El programa puede ser evaluado antes de ser aplicado para medir las expectativas de sus beneficios, o en forma posterior para analizar su continuidad.
2. **Aislar los efectos del programa.** En esta etapa es esencial aislar los factores que se cree puedan tener más efecto en los resultados, para buscar medidas sobre ellos. Por ejemplo, establecer grupos de control, usar modelos de predicción, usar información de expertos, opiniones de clientes, etc.
3. **Convertir los datos en valor monetario.** Es necesario analizar la información. Para calcular el ROI de un programa se puede buscar en los costos de calidad (por ausencia de ella), en la información histórica de ausentismo, de accidentes, tiempo perdido por demoras, juicios laborales, u otros. Además, se pueden usar estudios externos o información de estudios validados, etc. Detrás de un costo, una debilidad o una pérdida, se puede ocultar un beneficio o una oportunidad.
4. **Identificar los beneficios intangibles.** Muchos beneficios de un programa de bienestar serán intangibles, como por ejemplo la satisfacción, el compromiso, el servicio al cliente, la reducción de conflictos. Estos se pueden medir en forma indirecta mediante otros beneficios cuantificables. En estos casos hay que buscar la mejor forma de establecer un vínculo con los resultados económicos sin caer en estrategias que hagan perder credibilidad.
5. **Tabular los costos del programa.** Los costos provienen del diseño e implementación del programa, tales como los estudios que se deban realizar, asesorías, iniciativas por desarrollar, etc. Por ejemplo, un programa podría contemplar el aumento de salarios para evitar inequidad

de género, cuya esperanza de beneficios está en disminuir la rotación por género y disminuir costos de reemplazo y pérdida de capital humano.

6. **Calcular el ROI.** El cálculo del ROI es una buena herramienta para medir el impacto que tienen los programas de bienestar y se puede implementar siguiendo los pasos descritos. Este indicador permitirá tener mejor información para tomar decisiones, para escoger las mejores opciones, para valorar ventajas y desventajas de las soluciones y, finalmente conciliar el éxito económico con el bienestar de sus colaboradores.

Jenn Lim (2022) incorpora el concepto de doble ROI, para referirse a las mediciones de “lo que importa a todos, no solo a unos pocos” p.50. La autora sostiene que las empresas pueden desempeñar un papel importante en el cambio social, midiendo más allá de las métricas financieras tradicionales, priorizando a las personas de forma holística para crear organizaciones más sostenibles y rentables.

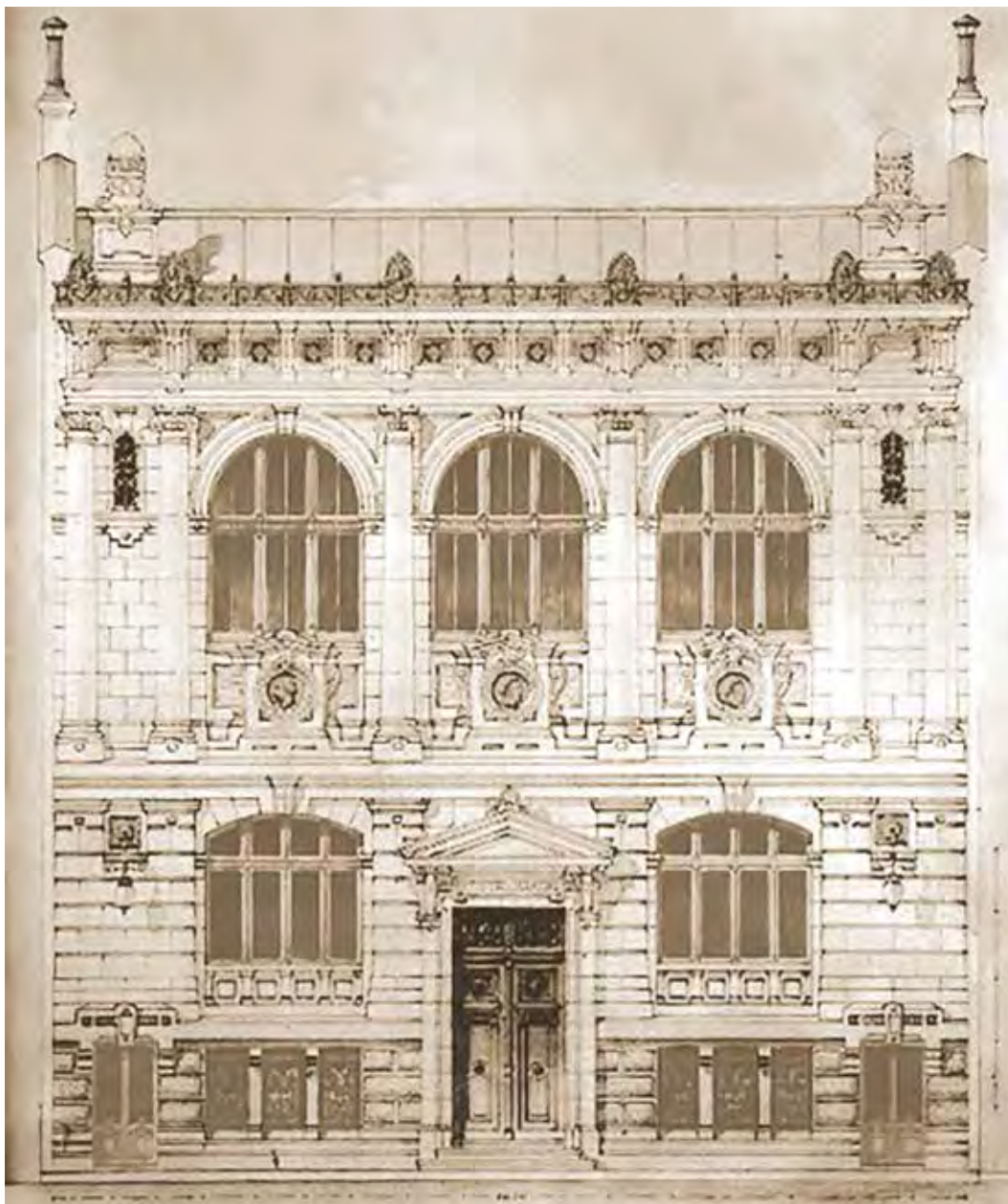
Resumen.

Cuando las empresas crean o analizan sus planes estratégicos, recurren a información de sus ventas, las cuotas de mercado, los cambios tecnológicos y sus impactos, la eficiencia de los procesos y los resultados financieros. Cuando se aborda el tema del bienestar de los trabajadores, los datos cambian y se transforman en conceptos e ideas, ya sea acerca de la felicidad, la calidad de vida, satisfacción o motivación. En este contexto, adoptar un lenguaje que incluya mediciones, indicadores, modelos de gestión, cuadros de mando y mediciones ROI para bienestar, puede ayudar a establecer un vínculo entre estos dos mundos, el de los resultados organizacionales y el de las personas. La incidencia del bienestar y la felicidad en los resultados organizacionales observada desde la medición y la comparación puede ayudar a que los integrantes de la empresa entiendan y valoren sus aportes a los planes estratégicos. Sin embargo, las mediciones también deberían considerar aspectos relevantes para las personas, no sólo para el negocio. De este modo, se puede generar un círculo virtuoso, donde el bienestar de las personas incide en los resultados organizacionales, y estos a su vez, inciden en el bienestar de las personas.

Bibliografía.

- Escalante, E. (2019). *La medición del bienestar organizacional*. Editado por Big Bienestar.
- Fordyce, M. W. (1977). "Development of a program to increase happiness." *Journal of Counseling Psychology*.
- Fundación Chile Unido: "2° Estudio Buenas Prácticas Laborales para la Salud Mental en tiempos de COVID-19". Departamento de Estudios Fundación Chile Unido (2021).
- Fundación Chile Unido: "Mejores Organizaciones para Integrar Vida Personal y Trabajo" (2023).
- James, P. (2006). *Gestión de Calidad Total*. Reimpresión. Prentice Hill.
- Ibáñez, P (2021). *Ecosistema de bienestar y felicidad corporativa*. Ediciones de la U.
- "Informe de la Comisión sobre la Medición del Desarrollo Económico y del progreso social" (2008). (Stiglitz-Sen-Fitoussi)
- "Informe de LinkedIn Global Talent Trends" (2022). <https://business.linkedin.com/es-es/talent-solutions/global-talent-trends>
- Lim, J. (2022). *Beyond Happiness*. Profit editorial.
- Romero, M. (2021). *Happy Employee Experience*. Ediciones Urano.

ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS



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

En esta ocasión, se presenta un extracto de la entrevista realizada al Ingeniero Sr. Claudio Muñoz Zúñiga.

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

CLAUDIO MUÑOZ ZÚÑIGA

Un ingeniero con una extraordinaria trayectoria empresarial.

Claudio nació en la ciudad de Rancagua, su madre fue profesora y su padre empleado de una empresa automotriz. Estudió en la Escuela de Hombres N°1 de Rancagua y luego en el Instituto O'Higgins, colegio de la congregación Marista. Desde temprana edad le gustaban las matemáticas, las ciencias naturales, la física y la química, y participó en la Academia Científica de su Colegio. Algo que lo marcó en esos años fue una práctica que había en su colegio, en que una o dos veces al año, a los alumnos del curso los subían a un bus y los llevaban a visitar a una empresa, lo que lo ayudó a desarrollar su interés por la ingeniería y la actividad empresarial. Le fue bien en la prueba de admisión a la universidad, y eligió ingresar a ingeniería en la Universidad de Chile.

En la universidad le gustaba todo lo que fuera numérico y matemático, y también lo concreto y ojalá aplicado. Cuando descubrió que la ingeniería podía tener aplicación en cosas prácticas, en procesos de producción, en desarrollo de negocios, solución de problemas, en ayudar a las personas y cambiar realidades, decidió seguir la especialidad de ingeniería civil industrial. Su primer contacto con la ingeniería fue a través de las prácticas profesionales, que su universidad tenía la buena costumbre de exigir durante los veranos.

Se inició trabajando como estudiante en práctica en la Compañía de Teléfonos de Chile, donde desde 1986 desarrolló su carrera profesional por más de 30 años, y así tuvo la oportunidad de participar activamente en la transformación que tuvo la industria de las telecomunicaciones en Chile. Inicialmente fue una empresa estatal, que luego fue privada y posteriormente de capitales extranjeros, la que tuvo un plan de crecimiento muy relevante y debió enfrentar la necesidad de transformarse y mejorar su competitividad en un mercado global. La ingeniería siempre le ha acompañado, entregándole herramientas apropiadas, para lograr los objetivos trazados. Como ejemplo recuerda cuando debieron enfrentar el desafío de aumentar las líneas telefónicas en Chile, un país que en los años 90 tenía 4 teléfonos por cada 100 habitantes, y lograr en pocos años tener más teléfonos que habitantes. Opina que si algo ha aprendido en su vida profesional es que los logros no son individuales, siempre son de equipos. Cree que, si hay algún aporte suyo, es entender que lo clave es armar equipos de trabajo y estar



al servicio de las personas. Un buen jefe que tuvo le dijo como enseñanza: “El jefe no manda, el jefe motiva y el jefe no es jefe porque lo nombran, lo es porque sus subalternos reconocen en él liderazgo, y eso hay que ganárselo”.

Como anécdota nos cuenta cuando les tocó automatizar la central de Punta Arenas que permitió dejar las centrales manuales, y pasar a centrales automáticas, de gran nivel de servicio. Una vez hecha la automatización, informaron a sus clientes de todas las maravillas de la nueva tecnología, hasta que uno de ellos muy educadamente le escribió: “Le quiero contar que Ud. no entiende lo que es modernidad. Yo vivo fuera de Punta Arenas, llamo por teléfono a la operadora y le pregunto si llegó a puerto tal barco. La operadora se pone de pie, mira por la ventana y me responde si llegó o no el barco. Con su modernidad, este servicio ya no existe”. Otra anécdota es cuando le tocó participar en el equipo que tuvo que financiar el plan de expansión de Telefónica en Chile, a través de la colocación de ADRs (acciones de la empresa chilena transadas en la bolsa de Nueva York). Luego de colocar las acciones, iban semestralmente a visitar a los principales inversionistas y como era usual, llevaban sendas presentaciones para informar la situación de la empresa.

En una ocasión, llegaron a reunirse con inversionistas y cuando entraron a la sala de reunión, una persona se pone de pie, comienza a aplaudir y les dice: “No quiero que me cuenten nada, yo quiero felicitar a su empresa y el gran país que tiene. Yo no sabía nada de su país y compré acciones de Telefónica Chile a USD 15 dólar, ayer cerraron a USD 153, estoy muy contento”.

Nos señala que no sintió que estaba muy preparado cuando siendo muy joven, con 35 años de edad, fue nombrado gerente general de Telefónica CTC Chile. Para él fue muy motivante la responsabilidad que el cargo implicaba, y en alguna medida se sintió representando a muchos profesionales chilenos, pues era una empresa multinacional que le daba una oportunidad a un profesional de nuestro país. Otro desafío que tuvo en su desarrollo profesional fue trasladarse a vivir al extranjero, a Estados Unidos y España. Nos confiesa que al principio fue muy difícil, pero que a la larga le terminó encantando esta experiencia y hoy considera que España es su segunda casa.

Además de la ingeniería, opina que hay otros mundos también fascinantes por descubrir, como la historia, las ciencias sociales, la comprensión del funcionamiento de nuestro cuerpo humano y en particular del cerebro, o el conocimiento de nuestra evolución como *homo sapiens* y el desarrollo de la especie humana. Ser curioso ha sido parte de su vida, y es de esas personas que siempre tiene muchos libros por leer y disfrutar.

Fue parte de la Comisión Nacional de Productividad, donde pudo aprender y aportar desde la mirada de la ingeniería, buscando resolver algo básico y fundamental para los países: cómo hacer más con las mismas capacidades y recursos, y lograr que la productividad en nuestro país vuelva a crecer. También fue parte de la Comisión Presidencial para la modernización del Estado, un espacio de mejora, donde se trabaja para lograr un Estado eficiente, ágil y al servicio de las personas. En el mundo gremial ha participado en SOFOFA y en ICARE. También ha participado en diversas empresas de otros sectores como agua potable y saneamiento, y ha sido director en empresas que están en las áreas de la salud, la agricultura, la educación y el comercio.

Cree que una buena posibilidad de agradecer el haber tenido una buena educación y experiencia profesional, es hacerlo a través de la docencia. Ha colaborado con la Universidad de Chile a través del Departamento de Industrias y en los

últimos años, a través de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Desarrollo. Nos asegura que al dedicar tiempo a la academia uno siente que su experiencia y sus capacidades se ponen al servicio del talento joven de nuestro país.

Le gusta mantener relación con otros ingenieros y saber del devenir de sus vidas. Mensualmente se junta con un grupo conformado por sus compañeros en la universidad, para mantenerse conectados y compartir sus vivencias. Recuerda, cuando junto a un grupo de grandes amigos, donde estaba su querido amigo Alfonso Sweet, que falleció el año pasado, escribieron un libro que titularon: “¿Y si nos ponemos de acuerdo?”. Fue una publicación donde se establece un diálogo entre personas que piensan distinto y analizan los problemas del país y de su desarrollo futuro.

Algo que le llena de orgullo y satisfacción es la oportunidad que ha tenido de colaborar con la Fundación Protectora de la Infancia. Desde su Consejo Directivo ha podido conocer una realidad social que desgraciadamente aún está presente en Chile, donde muchos niños y jóvenes en nuestro país necesitan ayuda, pues están en situaciones de abandono y desesperanza. En esta fundación se busca acogerlos y ayudarlos, trabajando con cada uno de ellos y sus familias. Considera que no hay nada más reconfortante en la vida, que sentir que has ayudado a un niño o joven a salir de una situación social compleja.

Claudio señala que es malo para hablar de él mismo y menos de sus talentos, pues se considera una persona normal. Tuvo la fortuna de crecer en un entorno que le enseñó a valorar el esfuerzo y el mérito. Le preguntamos cómo se definiría en pocas palabras y nos dice: una persona de provincia, inquieta y motivada. Dice ser creyente y que Dios nos pone en esta vida para jugar un rol, para desarrollarnos y ayudar a desarrollar a otros. Cree en la humildad y es un agradecido por las oportunidades y logros que ha tenido en la vida. En su caso, ser ingeniero, hacer empresa, desarrollar proyectos y equipos ha sido y es su forma de aportar a la sociedad. Un muy buen amigo le decía que el problema no es equivocarse, el problema es no aprender del error. Le gustaría ser recordado con una persona feliz, que hizo muchas cosas en su vida y que disfrutó profundamente todo lo que hizo. Como una persona simple y cariñosa, que fue educado en una linda familia, con padres y hermanos maravillosos, que pudo estudiar ingeniería y formar una hermosa familia, junto a Magdalena, sus hijos y nietos, y da gracias a Dios

por todo ello. El año 2024 Claudio recibió del Instituto de Ingenieros de Chile el “Premio Julio Donoso Donoso”, por su gran contribución a la mejora de las relaciones humanas en la actividad productiva.

En relación a la ingeniería en la actualidad opina que se está adaptando a los cambios y los nuevos desafíos. Que nos muestra un futuro posible y con optimismo, pues seremos capaces de resolver desafíos hasta ahora complejos y de difícil solución. Por ejemplo, menciona el desafío del cambio climático, algo nuevo para la humanidad y que está generando impactos reales en muchos países y que no es una moda ambientalista, es la necesidad de repensar nuestras estrategias y nuestros negocios. Además, sostiene que la tecnología, y en particular la tecnología digital, han generado enormes posibilidades para ser disruptivos y explorar posibilidades insospechadas, y que en cada día uno se sorprende con un paradigma que se derriba y una

nueva forma de hacer las cosas. Dice que se debiera fortalecer nuestra habilidad de desaprender algunas cosas, o al menos cuestionarnos si lo que siempre se ha hecho de una determinada manera seguirá igual en el futuro.

A las nuevas generaciones les diría que sean totalmente conscientes de la nueva época que les tocará vivir, de muchas oportunidades y desafíos, que derribará paradigmas, con gran cantidad de información y conocimiento, crecimiento exponencial y disrupción. En este escenario, absolutamente nuevo para la humanidad, su consejo sería que no se pongan límites, no crean en las restricciones, piensen en grande, sorprendan, lleguen lejos. Para lograr todo esto, les recomendaría que aprendan a colaborar, a desarrollar la inteligencia colectiva, que no crean en el individualismo y sean buenos armando equipos. Que desarrollen la humildad y el respeto, y den gracias a Dios todos los días de su vida.



EN MEMORIA DE SR. GERMÁN MILLÁN PÉREZ



El pasado 27 de junio de 2025, con profundo pesar recibimos la triste noticia del fallecimiento de nuestro querido socio, director consultivo y expresidente don Germán Millán Pérez.

Don Germán Millán ingresó al Instituto en mayo de 1961 como estudiante de cuarto año de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile hasta el año 1973, en que, por trabajo, se fue al extranjero. Luego de reincorporarse como socio Activo, integró el directorio desde 1995 en varios períodos, y fue presidente de la Institución en los años 2006-2007. Era miembro del Consejo Consultivo.

A continuación, reproducimos el discurso que hiciera don Juan Carlos Barros, presidente del Instituto, en los funerales del Sr. Millán.

“Me corresponde en esta triste ocasión, como presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, decir unas breves palabras en recuerdo de nuestro socio, expresidente y amigo **Germán Millán Pérez**.

La vinculación de Germán con el Instituto comenzó en el año 1963, cuando era egresado de ingeniería, antes de entrar a trabajar a Endesa, en el año 1964.

El año 1973, ya casado con Sonia Valdés, y sus dos hijos, aceptó un trabajo en España, en la Central Nuclear de Ascó-Tarragona, región de Cataluña. Permaneció en España hasta el año 1978, fecha en la que vuelve a Chile y se incorpora a Endesa, como Jefe de la Oficina de Ingeniería del proyecto Antuco. Luego de este proyecto vinieron otros como Colbún-Machicura, Canutillar y Pehuenche. En el 1989, se incorpora a Ingendesa como Gerente de Ingeniería.

Tiempo después, Germán se incorpora al MOP, primero como Jefe de Inspección de la construcción de Proyecto Costanera Norte para terminar ejerciendo, entre los años 2003 y 2005, el cargo de Director General de Obras Públicas. Posteriormente, trabajó como profesional independiente, en asesorías relacionadas con obras civiles y de resolución de controversias.

En paralelo a su labor profesional, realizó diferentes actividades en el Instituto como socio, miembro del Directorio y de la Junta Ejecutiva, e integrante y presidente de diferentes Comisiones de Trabajo en las que aportó con su experiencia.

Germán fue una persona preocupada y ocupada no solo del ejercicio de su profesión, sino que además de su entorno. Declaraba que el ejercicio de la profesión de ingeniero requería muchas veces la participación de distintos profesionales: ingenieros, arquitectos, constructores, técnicos, dibujantes, prevencionistas de riesgo, especialistas en temas medioambientales, y de personal no calificado.

Sostenía que, para que los proyectos fuesen exitosos, debía haber una jefatura que realmente liderara el proyecto, que los profesionales participantes supieran trabajar en equipo, que se respetaran entre sí y, además, supieran escucharse mutuamente.

Contaba que a menudo visitaba las obras y era muy agradable y provechoso conversar con técnicos, capataces y obreros, conocer de ellos sus impresiones respecto del proyecto que estaban construyendo y las condiciones humanas y de seguridad que había en el trabajo y de qué manera se podían mejorar.

Más allá de sus logros profesionales, Germán era, en el sentido más estricto, un *caballero*, un caballero de una raza rara y en vías de extinción. Era un hombre de principios, honesto e íntegro, una gran persona y hombre de familia.

Como autoridad, cuando ejerció cargos de Gobierno, era ponderado y sensato en sus decisiones. Como profesor, era dedicado, justo y genuinamente preocupado por la comprensión de sus estudiantes.

Nuestra Institución, en el año 2022, lo distinguió con el premio Julio Donoso Donoso que destaca al ingeniero que contribuya al mejoramiento de las relaciones humanas o a la convivencia en organizaciones dedicadas a los procesos de producción de bienes o servicios. Sin duda, un merecido reconocimiento.

Los atributos personales que he señalado y que desplegó en toda su magnitud Germán en el Instituto explican el gran aprecio que sentíamos por él, tanto sus colegas como el personal administrativo de nuestra corporación.

Es muy difícil encontrar unidas las cualidades personales y profesionales que he mencionado y que convivieron en armonía en la vida de Germán.

Que descanse en paz”.

ISSN 0716 - 2340



**ANALES
DEL INSTITUTO
DE INGENIEROS DE CHILE**

Vol. 137, N° 2 - AGOSTO 2025

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

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

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

Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 137, N° 2, agosto de 2025

Contenido

DESARROLLO DE UN MODELO NUMÉRICO PARA EVALUAR EL IMPACTO DEL DAÑO EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN CABLE.

Pág. 39

Gaspar Carrasco y Juan Felipe Beltrán

CARACTERIZACIÓN DEL MANTO NIVAL EN UNA CUENCA DE MONTAÑA CON BOSQUE NATIVO EN LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE.

Pág. 59

Anelim Bernal-Mujica y Sebastián A. Krogh

ANTIBIÓTICOS EN CHILE: INGRESO AL CICLO DEL AGUA Y LOS POTENCIALES EFECTOS EN EL MEDIOAMBIENTE.

Pág. 71

Josefina Burgos, Ana María Leiva, María Cristina Martínez y Gladys Vidal

Editora

Ximena Vargas Mesa, Directora del Instituto de Ingenieros de Chile

Comité Editorial

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

Ana Lucía Prieto S., Académica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile

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

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

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

DESARROLLO DE UN MODELO NUMÉRICO PARA EVALUAR EL IMPACTO DEL DAÑO EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN CABLE

DEVELOPMENT OF A NUMERICAL MODEL TO EVALUATE THE IMPACT OF DAMAGE ON THE DYNAMIC PROPERTIES OF A CABLE

Gaspar Carrasco¹, Juan Felipe Beltrán²

Resumen

El objetivo es desarrollar un modelo numérico que prediga el daño en un cable estudiando la variación de las propiedades dinámicas de este. Para tal efecto, el cable se modela como una viga no lineal, considerando el potencial deslizamiento relativo de los alambres que forman el cable. En una primera etapa, se comparan varios modelos de vigas no lineales con el fin de seleccionar al más adecuado, considerando las propiedades dinámicas del cable virgen, comparadas con datos experimentales y modelos 3D de elementos finitos reportados en la literatura. Luego, el modelo seleccionado es utilizado para estudiar la variación de las propiedades dinámicas de un cable cuando este presenta daño superficial asimétrico y simétrico. En este caso se considera la no linealidad de la rigidez flexural del cable de acuerdo con las curvaturas de los modos de vibración. Finalmente, el modelo numérico propuesto, es validado y calibrado mediante comparaciones con datos experimentales y numéricos reportados en la literatura. Con este trabajo se espera obtener un modelo numérico que permita estimar el daño y su distribución en un cable en servicio considerando mediciones de sus propiedades dinámicas.

Palabras Clave: Amortiguamiento, Análisis Numérico, Cables, Daño, Identificación de daño.

Abstract

The objective is to develop a numerical model that predicts damage in a cable by studying the variation in its dynamic properties. To this end, the cable is modeled as a nonlinear beam, considering the potential relative slip of the wires that comprise the cable. In the first stage, several nonlinear beam models are compared to selecting the most appropriate one, considering the dynamic properties of the virgin cable, compared with experimental data and 3D finite element models reported in the literature. The selected model is then used to study the variation in the dynamic properties of a cable when it presents asymmetric and symmetric surface damage. In this case, the nonlinearity of the cable's flexural stiffness is considered according to the curvatures of the vibration modes. Finally, the proposed numerical model is validated and calibrated through comparisons with experimental and numerical data reported in the literature. With this work it is expected to obtain a numerical model that allows estimating damage and its distribution in a cable in service, considering measurements of its dynamic properties.

Keywords: Damage, Damage Identifications, Damping, Numerical Analysis, Strand.

¹ Memorista de grado, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Blanco Encalada #2002 Off. 440, Santiago, Chile. Email: gaspar.carrasco@ug.uchile.cl

² Profesor asociado, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Blanco Encalada #2002 Off. 440, Santiago, Chile. Email: jbeltran@ing.uchile.cl

1. Introducción

El comportamiento de un cable y sus propiedades dinámicas están dictados por sus características físicas, como su geometría, materialidad, longitud y las cargas aplicadas ([1], [2], [3], [4] y [5]). Por lo tanto, son predecibles y una variación en ellas puede indicar un posible daño sufrido por el cable en servicio. En este contexto, la capacidad de predecir los cambios en estas propiedades dinámicas debido a daños se vuelve crucial, especialmente si se consideran las posibles consecuencias negativas del corte repentino de un cable tensado o de la caída de un conductor eléctrico.

Dado que los cables o conductores eléctricos suelen ser monitoreados en condiciones de servicio, es fundamental estimar su estado estructural para poder aplicar normativas y criterios de reemplazo de cables dañados, como el señalado en la normativa ISO 4309 [6], así como definir y ajustar los protocolos de inspección.

Por otro lado, para efectos de este trabajo, se consideran daños superficiales, asumiendo que el núcleo del cable permanece operativo. Esto se debe a que el ángulo de hélice en el alambre central es cero, lo que implica que, en ausencia de daño, la tensión en el núcleo es siempre menor que la de las hebras externas, reduciendo así la posibilidad de ruptura y manteniendo este comportamiento incluso en presencia de daños. Adicionalmente, las hebras externas son más susceptibles al ambiente, facilitando su ruptura [7].

1.1 Objetivos

Se intenta desarrollar un modelo numérico que permita evaluar el estado de daño en un cable o conductor eléctrico considerando un modelo de viga no lineal.

Para esto, se busca que el modelo prediga el comportamiento de las propiedades dinámicas del cable, tanto para su estado íntegro (sin daño) como con daño. Se consideran distintas configuraciones del daño en el cable, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con mediciones experimentales, ya sea en laboratorio o en terreno. A partir de esta comparación, se pretende determinar el estado de daño del cable o conductor.

Para lograr lo anterior, primero se tiene en consideración la no linealidad de la rigidez a flexión del cable ante la curvatura del cable debido al deslizamiento entre los alambres de este, para los distintos modos de vibración [8], [9].

En segundo lugar, se extiende el modelo considerando daño asimétrico y simétrico superficial ([5], [7], [10], [11], [12], [13] y [14]). Se busca tener en cuenta los efectos de la presencia del daño sobre el cable, determinando el impacto en los parámetros modales de este: Frecuencia, Curvatura y Damping.

Para comparar los cambios de estos parámetros, se utilizan distintas métricas encontradas en la literatura [15], [16], [17] y [18].

2. Formulación del Problema

Se ha demostrado que un elemento no lineal tipo viga, bajo el modelo de viga rígida, con diferentes grados de complejidad es apropiado para estimar la respuesta de los cables bajo diferentes condiciones de carga, como vibraciones transversales, cargas de flexión y sistemas de vehículos operados remotamente [1], [19].

2.1 Respuesta dinámica sin daños: una revisión

En el caso de la respuesta dinámica de los cables Sousa et al [19] derivan y verifican la utilización de un modelo de viga rígida teniendo en cuenta la teoría de Timoshenko, y considerando distintas condiciones de borde [1]. Con la cual se tienen las ecuaciones diferenciales (1) y (2).

$$(EI_{zz})_{sec} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \frac{mI}{A} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$(EI_{yy})_{sec} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{mI}{A} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (2)$$

Donde $(EI_{zz})_{sec}$ y $(EI_{yy})_{sec}$ son la rigidez a la flexión secante en torno de los ejes zz e yy respectivamente; v y w son las deflexiones laterales en las direcciones y - y y z - z respectivamente; y T en la carga axial en el cable.

2.2 Respuesta estática con daños: una revisión

En el caso de la respuesta estática al daño de los alambres considerando la distribución simétrica y asimétrica del daño superficial, Beltrán y De Vico ([12]) propusieron y validaron un algoritmo numérico que se basa en una formulación continua 1-D considerando la teoría clásica de vigas de Bernoulli. Este algoritmo ha sido validado con éxito (es decir, curvas de capacidad, distribuciones de tensiones y configuraciones deformadas) mediante comparaciones con modelos de elementos finitos 3-D y datos experimentales de cuerdas de poliéster ([12]) y cables metálicos (acero y aluminio) [14]. Además, esta formulación se ha integrado en un marco general basado en la teoría de la mecánica del daño continuo para interpretar los criterios de descarte de cuerdas y cordones ([20], [21]). Esta formulación continua 1-D se basa en las siguientes ecuaciones diferenciales cuyos parámetros se refieren a las Fig. 1 y Fig. 2:

$$(EI_{zz})_{sec} \frac{d^4 v}{dx^4} - q_y(x) \left(1 + \frac{du(x)}{dx} \right) - H(x) \frac{d^2 v}{dx^2} = 0 \quad (3)$$

$$(EI_{yy})_{sec} \frac{d^4 w}{dx^4} - q_z(x) \left(1 + \frac{du(x)}{dx} \right) - H(x) \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \quad (4)$$

Donde u es el desplazamiento axial a lo largo del eje longitudinal x ; $H(x)$ es la carga axial del cable; y q_y y q_z son las cargas transversales distribuidas desequilibradas debido a la distribución asimétrica del daño superficial en las direcciones y - y y z - z , respectivamente.

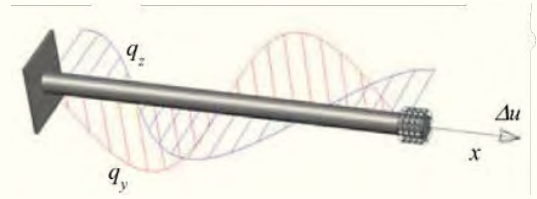


Fig. 1: Formulación continua 1-D para una hebra con daños en la superficie

Las ecuaciones de flexión biaxial desacopladas, como se describió anteriormente, se derivan de los siguientes hechos: (i) El plano z_1y_1 (ejes principales de la sección transversal) depende de la naturaleza helicoidal del alambre en el torón. Sin embargo, por el bien de la simplicidad en la formulación, el torón dañado se analiza con una sección transversal constante haciendo que los planos zy y z_1y_1 coincidan (Fig. 2); y (ii) La fuerza radial desequilibrada resultante q (Fig. 1) se proyecta en las direcciones y y z resultando en las fuerzas transversales q_y y q_z respectivamente.

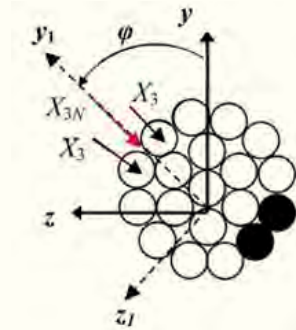


Fig. 2: Esquema de sección de cable dañado asimétricamente

2.3 Respuesta dinámica con daños

Extendiendo el modelo estático de cables dañados, presentado en la sección 2.2, y asumiendo pequeñas deformaciones (i.e., $du/dx \ll 1$ en Ec's (3) y (4)), se obtiene que la respuesta dinámica de un cable bajo cargas transversales y axiales en xy y xz , en base a la teoría de viga unidimensional 1-D de Timoshenko, y considerando el DCL de la Fig. 3, queda dada por las Ecs. diferenciales:

$$v^{iv}(x,t) - \left(\frac{m}{GA} + \frac{m}{EA}\right) \frac{\partial^2 \ddot{v}(x,t)}{\partial x^2} + \frac{m^2}{EGA^2} \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial t^4} - \frac{T}{EI_{zz}} v''(x,t) + \frac{m}{EI_{zz}} \ddot{v}(x,t) + \frac{q_y''(x)}{GA} - \frac{q_y(x)}{EI_{zz}} = 0 \quad (5)$$

$$w^{iv}(x,t) - \left(\frac{m}{GA} + \frac{m}{EA}\right) \frac{\partial^2 \ddot{w}(x,t)}{\partial x^2} + \frac{m^2}{EGA^2} \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial t^4} - \frac{T}{EI_{yy}} w''(x,t) + \frac{m}{EI_{yy}} \ddot{w}(x,t) + \frac{q_z''(x)}{GA} - \frac{q_z(x)}{EI_{yy}} = 0 \quad (6)$$

Donde $()''$ y $()^{iv}$ son la representación de la segunda y cuarta derivadas con respecto a la coordenada x y $\ddot{()}$ es la segunda derivada con respecto al tiempo. Utilizando el método de separación de variables de la forma propuesta por Gritsenko et al [22], se tiene que las soluciones generales para las ecuaciones anteriores tienen la siguiente forma:

$$v(x,t) = \left(\sum_{i=1}^n g_i(t) f_i(x) \right) + P(x) \quad (7)$$

$$w(x,t) = \left(\sum_{i=1}^n r_i(t) s_i(x) \right) + Q(x) \quad (8)$$

Siendo $g_i(t)$ y $r_i(t)$ funciones dependientes del tiempo; $f_i(x)$ y $s_i(x)$ funciones espaciales; n es el número de modos de vibración a considerar; y $P(x)$ y $Q(x)$ son funciones espaciales relacionadas con las soluciones particulares de las Ecs. diferenciales no homogéneas (Ecs. (5) y (6)) que son independientes a los modos de vibrar de los cables dañados. Por lo tanto, en este enfoque, las ecuaciones de vibración características para el i -ésimo modo, para los planos xy y xz , respectivamente, se dan por

$$v_i(x,t) = g_i(t) f_i(x) + P(x) \quad (9)$$

$$w_i(x,t) = r_i(t) s_i(x) + Q(x) \quad (10)$$

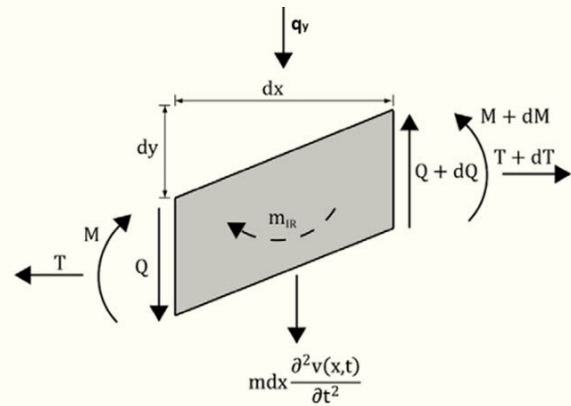


Fig. 3: Elemento Infinitesimal dinámico considerando las cargas por daño, basado en el dibujo de la fig. 1 en el trabajo de Sousa [19].

Es importante mencionar que las formulaciones anteriores se derivan para el estudio de la respuesta dinámica de cables con daños superficiales distribuidos asimétricamente. Pero, esta formulación general se reduce a la teoría existente para determinar las características de vibración de cables sin daños y con daños superficiales simétricos, modelados como vigas 1-D ([19], [23], [24], entre otros), con las simplificaciones adecuadas. En específico, en este último caso, los términos q_y y q_z se anulan en las Ecs. (5) y (6), convirtiéndose en ecuaciones diferenciales homogéneas cuyas soluciones (Ecs. (7) y (8)) no toman en cuenta los términos $P(x)$ y $Q(x)$.

Además, es sabido ampliamente que la rigidez a la flexión de un cable sigue una función de cambio no lineal que depende de la interacción entre los alambres del cable (según si hay o no deslizamiento entre ellos) ([9], [10]).

2.4 Casos de Estudio

En general, las funciones espaciales $f_i(x)$ y $s_i(x)$ de las Ecs. (7) y (8) tienen las siguientes formas generales:

Las

$$C_1 \cosh(\delta_i x) + C_2 \sinh(\delta_i x) + C_3 \cos(\beta_i x) + C_4 \sin(\beta_i x) \quad (11)$$

Donde los valores C_1 a C_3 , se obtienen por las condiciones de borde y C_4 mediante ortogonalidad según el capítulo 2.4 de la tesis de magister de Yoon Mo Kim [2] adaptado a la teoría de

Timoshenko (Ec. (16)), mientras que los términos β_i y δ_i dependen de las propiedades del cable y la carga axial (Ecs. (12) a (15)).

$$B_i = \frac{m\omega_i^2}{GA} + \frac{m\omega_i^2}{EA} - \frac{T}{(EI_{kk})_{sec}} \quad (12)$$

$$R_i = \frac{m^2\omega_i^4}{EGA^2} - \frac{m\omega_i^2}{(EI_{kk})_{sec}} \quad (13)$$

$$\delta_i = \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 + 4R}}{2}} \quad (14)$$

$$\beta_i = \sqrt{\frac{B + \sqrt{B^2 + 4R}}{2}} \quad (15)$$

Donde m es la masa lineal del cable; ω_i es la frecuencia del modo i ; T es la carga axial; EA es la rigidez axial, GA rigidez al corte y $(EI_{kk})_{sec}$ es la rigidez a la flexión secante en torno al eje kk , según el caso. Y considerando la distribución del daño en la sección del cable para las rigideces [7].

En la Ec. (16) se define el término C_4 donde I es la inercia y J_i es el término espacial de la respuesta que depende del modo, normalizada por C_4 , ya que, los valores C_1 a C_3 son en función de C_4 , como se puede ver en la sección 2.5.

$$C_{4i} = \left[\frac{1}{\int_0^L mJ_i^2(x)dx - \frac{mI}{A} \int_0^L (J_i'(x))^2 dx} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Por su parte, las funciones dependientes del tiempo $g_i(t)$ y $r_i(t)$ tienen la forma indicada en la Ec.17.

$$An_i \sin(\omega_i t) + Bn_i \cos(\omega_i t) \quad (17)$$

Donde An_i y Bn_i dependen de las condiciones iniciales, que adaptando lo expuesto como Mo por Timoshenko [2], se obtiene:

$$q_i(0) = \frac{\int_0^L f_i(x) \cdot f_0(x)dx}{\int_0^L f_i^2(x)dx} \quad (18)$$

$$\dot{q}_i(0) = \frac{\int_0^L f_i(x) \cdot V_0(x)dx}{\int_0^L f_i^2(x)dx} \quad (19)$$

$$q_i(t) = \underbrace{\frac{\dot{q}_i(0)}{\omega_i}}_{A_n} \sin(\omega_i t) + \underbrace{q_i(0)}_{B_n} \cos(\omega_i t) \quad (20)$$

Estas ecuaciones sirven para ambas direcciones, dado que $q_i(t)$ representa las funciones dependientes del tiempo, $f_0(x)$ es la distribución de deflexión inicial y $V_0(x)$ es la distribución de velocidad inicial en el cable.

Por último, las funciones espaciales $P(x)$ y $Q(x)$ tienen la siguiente forma:

$$P(x) = A_1 + A_2x + A_3e^{\lambda L} + A_4e^{-\lambda L} \cos(\Omega x) \quad (21)$$

$$Q(x) = A_1 + A_2x + A_3e^{\lambda L} + A_4e^{-\lambda L} \sin(\Omega x) \quad (22)$$

Con los valores A_1 a A_4 dependiendo de las condiciones de borde, λ y A_5 que son

$$\lambda = \sqrt{T/EI} \quad ; \quad A_5 = \frac{K}{GA\Omega^2} \left[\frac{\Omega^2 EI + GA}{\Omega^2 EI + T} \right] \quad (23)$$

Donde $\Omega = 2\pi/p$ y $K = -\kappa_i \cdot T_i / \cos(\theta_i)$, siendo κ_i , T_i y θ_i la curvatura, la carga de tensión y el ángulo de la hélice del componente del cable de la hélice de la capa i , respectivamente, y p es la distancia de paso de los componentes del cable.

2.5 Soluciones de los Casos de Estudio

En esta sección se muestran las soluciones específicas para las funciones espaciales de las ecuaciones (7) y (8), en función de las condiciones de borde del problema, tal y como se aplican en [1].

Solución Pinned-pinned

Al aplicar las condiciones de borde para el caso simplemente apoyado, las funciones espaciales f_i y s_i , quedan como:

$$f_i, s_i = C_4(\sin(\beta_i x) - \sin(\beta_i L)) \quad (24)$$

Los parámetros de la función $P(x)$ se expresan como:

$$A_1 = -A_5 - \alpha_3 \quad (25)$$

$$A_2 = \frac{\alpha_3 + A_5}{L}(1 - \cos(\Omega L)) \quad (26)$$

$$A_3 = \alpha_3 \left(\frac{\cos(\Omega L) - e^{-\lambda L}}{2 \sinh(\lambda L)} \right) \quad (27)$$

$$A_4 = \alpha_3 \left(\frac{e^{\lambda L} - \cos(\Omega L)}{2 \sinh(\lambda L)} \right)$$

Para la función $Q(x)$ se obtiene:

$$A_1 = 0 ; A_2 = -\frac{A_5 + \alpha_3}{L} \sin(\Omega L) \quad (28)$$

$$A_3 = \frac{\alpha_3}{2 \sinh(\lambda L)} \sin(\Omega L) ; A_4 = -A_3 \quad (29)$$

Con

$$\alpha_3 = \left(A_5 \Omega^2 - \frac{K}{GA} \right) / \lambda^2 \quad (30)$$

Mientras que la función de frecuencias resulta:

$$(\delta^2 + \beta^2) \sin(L\beta) = 0 \quad (31)$$

Solución Pinned-fixed

Al aplicar las condiciones de borde para el caso apoyado empotrado, se tiene que las funciones espaciales f_i y s_i , se expresan como:

$$f_i, s_i = C_4 \left(\sin(\beta_i x) - \frac{\sin(\beta_i L)}{\sinh(\delta_i L)} \sinh(\delta_i x) \right) \quad (32)$$

Los parámetros de la función $P(x)$ quedan como:

$$A_1 = -A_5 - \alpha_3 \quad (33)$$

$$A_2 = \lambda(A_4 e^{-\lambda L} - A_3 e^{\lambda L} + \alpha_4 \sin(\Omega L))$$

$$A_3 = \left[\lambda L \alpha_4 \sin(\Omega L) + A_5 (\cos(\Omega L) - 1) + \alpha_3 (e^{-\lambda L} (\lambda L + 1) - 1) \right] / 2 (\lambda L \cosh(\lambda L) - \sinh(\Omega L)) \quad (34)$$

$$A_4 = \left[\alpha_3 (e^{\lambda L} (\lambda L - 1) + 1) - \lambda L \alpha_3 \sin(\Omega L) - A_5 (\cos(\Omega L) - 1) \right] / 2 (\lambda L \cosh(\lambda L) - \sinh(\Omega L)) \quad (35)$$

Donde α_3 se define en Ec. (30) y α_4 es

$$\alpha_4 = \left(A_5 \Omega - \frac{K}{GA \Omega} \right) / \lambda \quad (36)$$

Para la función $Q(x)$ se obtiene:

$$A_1 = 0 \quad (37)$$

$$A_2 = \frac{\alpha_4 \sinh(\lambda L) \cos(\Omega L) - A_5 \cosh(\lambda L) \sin(\Omega L)}{\lambda L \cosh(\lambda L) - \sinh(\lambda L)}$$

$$A_3 = \frac{\lambda L \alpha_4 \cos(\Omega L) - A_5 \sin(\Omega L)}{2 \sinh(\lambda L) - 2 \lambda L \cosh(\lambda L)} \quad (38)$$

$$A_4 = -A_3$$

Mientras que la función de frecuencias resulta:

$$\alpha_1 \tanh(\delta L) - \tan(\beta L) = 0 \quad (39)$$

Con:

$$\alpha_1 = \frac{\delta}{\beta} \left[\frac{GA \beta^2 - m \omega^2}{GA \delta^2 + m \omega^2} \right] \quad (40)$$

Solución Fixed-fixed

Por último, en el caso de doblemente empotrado se tiene que, las funciones espaciales f_i y s_i , resultan:

$$f_i, s_i = C_4 (\alpha_1 \sinh(x \delta_i) + \alpha_2 \cosh(x \delta_i) - \alpha_2 \cos(x \beta_i) + \sin(x \beta_i)) \quad (41)$$

Con

$$\alpha_1 = \frac{\delta_i}{\beta_i} \left[\frac{m \omega^2 - GA \beta_i^2}{m \omega^2 + GA \delta_i^2} \right] \quad (42)$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1 \sinh(\delta_i L) + \sin(\beta_i L)}{\cos(\beta_i L) - \cosh(\delta_i L)} \quad (43)$$

Los parámetros de la función $P(x)$ se expresan como:

$$A_1 = -A_3 - A_4 - A_5 ; A_2 = \lambda(A_4 - A_3) \quad (44)$$

$$A_3 = \left[\alpha_4 \sin(\Omega L) (e^{-\lambda L} + \lambda L - 1) - A_5 (e^{-\lambda L} - 1) (\cos(\Omega L) - 1) \right] / 2 (\lambda L \sinh(\lambda L) - 2 \cosh(\lambda L) + 2) \quad (45)$$

$$A_4 = [\alpha_4 \sin(\Omega L) (e^{\lambda L} - \lambda L - 1) + A_5 (e^{\lambda L} - 1) (\cos(\Omega L) - 1)] / [2(2 \cosh(\lambda L) - \lambda L \sinh(\lambda L) - 2)] \quad (46)$$

Los parámetros de la función $Q(x)$ se describen como:

$$A_1 = -A_3 - A_4 ; A_2 = \lambda(A_4 - A_3 - \alpha_4) \quad (47)$$

$$A_3 = [\alpha_4 (e^{-\lambda L} + \lambda L - 1) (\cos(\Omega L) - 1) - (\lambda L \alpha_4 - A_5 \sin(\Omega L)) (e^{-\lambda L} - 1)] / [2(2 \cosh(\lambda L) - \lambda L \sinh(\lambda L) - 2)] \quad (48)$$

$$A_4 = [\alpha_4 (e^{\lambda L} - \lambda L - 1) (\cos(\Omega L) - 1) + (\lambda L \alpha_4 - A_5 \sin(\Omega L)) (e^{\lambda L} - 1)] / [2(2 \cosh(\lambda L) - \lambda L \sinh(\lambda L) - 2)] \quad (49)$$

Con α_3 y α_4 según (30) y (36).

Mientras que la función de frecuencias resulta:

$$(\alpha_1 \cosh(L\delta) + \alpha_2 \sinh(L\delta)) \left[\frac{m\omega^2}{GA\delta} + \delta \right] + (\cos(L\beta) + \alpha_2 \sin(L\beta)) \left[\beta - \frac{m\omega^2}{GA\beta} \right] = 0 \quad (50)$$

2.6 Efecto del deslizamiento de los alambres en la rigidez a la flexión del cable

La rigidez a flexión de un cable (EI) es un factor que depende de la materialidad del cable, la geometría y la interacción entre los alambres del cable, a causa del roce.

Caso 1: Cable sin daños

Para los cables intactos, el deslizamiento de los alambres de los cables reduce la rigidez a la flexión, debido a que el movimiento relativo entre las hebras permite un mayor desplazamiento del cable. En consecuencia, la deformación del cable puede provocar el deslizamiento de los alambres al sobrepasar un límite, el cual depende de la fuerza axial en las hebras [10]:

$$F_{T,k} = \frac{E_k A_k \cos^2(\beta_k)}{\sum_k^n E_k A_k \cos^2(\beta_k)} T \quad (51)$$

Donde E_k , A_k y β_k son el módulo elástico secante, el área de la sección transversal y el ángulo de la hélice de la hebra k no cortada, T es la carga axial a la que se encuentra sometida el cable, n es el

número total de hebras y para la hebra del núcleo se considera que su ángulo de hélice (β_{core}) es cero. Además, se tiene que F_T y T , se relacionan de la siguiente forma:

$$T = \sum_k^n T_k = \sum_k^n F_{T,k} \cos(\beta_k) \quad (52)$$

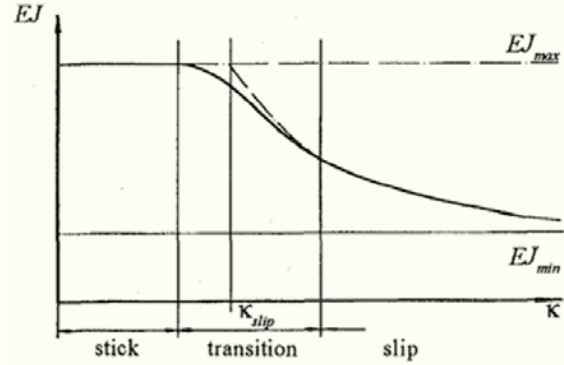


Fig. 4: Rigidez a la flexión como función de la curvatura [8].

La variación de la rigidez se puede correlacionar con el nivel de curvatura a la que se ve sometido el cable, como se puede ver en la Fig. 4, la rigidez en función a la curvatura se puede expresar en 3 zonas, estático, transición y deslizamiento, pudiéndose establecer un punto medio, aproximando el problema de forma bilineal para la relación momento curvatura (Fig. 5), por lo cual, mediante la obtención de este punto medio, la curvatura crítica, y el momento flector residual, se puede establecer la rigidez a la flexión ([8], [9], [10]).

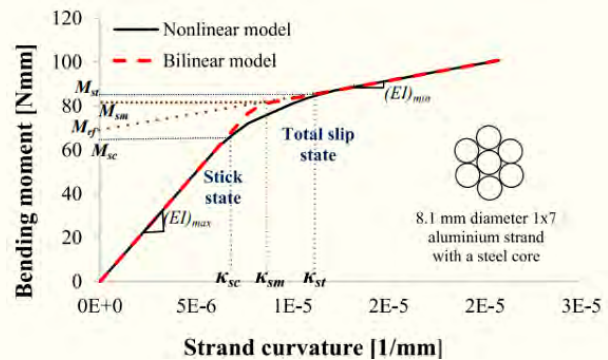


Fig. 5: Relación momento curvatura, ejemplo [9].

Caso 2: Daño simétrico

Los cables con daños simétricos presentan una disminución de su rigidez y área de sección efectiva, a causa de los alambres cortados, pero sin afectar su masa lineal, ni la ubicación del centroide. Los parámetros que influyen en la susceptibilidad de la rigidez a la flexión respecto a la curvatura se alteran debido a que el número de alambres operativos disminuye, modificando los valores de las rigideces con o sin deslizamiento.

Además, se debe considerar que el daño puede generar una redistribución de las cargas en los elementos del cable, en situaciones en que la carga aplicada es indiferente al estado del cable (p. ej. Una grúa), provocando que el aporte al roce de cada alambre operativo incremente, o que el daño provoque una liberación de tensión al dañarse, como sería el caso de un cable sometido a una deformación dada (p. ej. Un puente), donde la carga puede estimarse a partir de la rigidez axial y la deformación [7].

Caso 3: Daño asimétrico

En el caso de los cables con daños asimétricos, se tiene también, un desplazamiento del centroide, junto con una descompensación de las fuerzas entre las hebras del cable, induciendo un desplazamiento independiente del modo, que induce una curvatura adicional a la vibración, la cual, altera el nivel de deslizamiento de las hebras, y por ende el cambio en la rigidez del cable ([12] y [14]).

3. Potencial de disipación (Damping)

El amortiguamiento se ha estudiado por diversos autores a lo largo del tiempo, y desde distintas perspectivas, por ejemplo, Lisitano et al [25] estudio la pérdida de energía en una viga en vibración a partir de las propiedades mismas del material y su geometría. Otros autores propusieron formulas empíricas que permiten estimar el amortiguamiento de un cable ([26], [27], [28]). Las que a su vez se han utilizado para comparar formulaciones propuestas a partir de la curva de la histéresis con el fin de estimar la pérdida de energía de un elemento debido a su deformación de flexión ([27] [28] [29] [30]). De este modo, se propone

calcular el potencial de disipación del cable, a partir del área encerrada por la curva de la histéresis propuesta por Papailiou [10] (Fig. 6), y de lo propuesto por Foti et al ([27], [29] y [30]).

Con esto se calcula el área de la histéresis a partir del diagrama de la Fig. 6, teniendo la siguiente forma:

$$A_c = 0,8 \cdot 2\chi_m(\chi_{max} - \chi_m)|EI_{min} - EI_{max}| \quad (53)$$

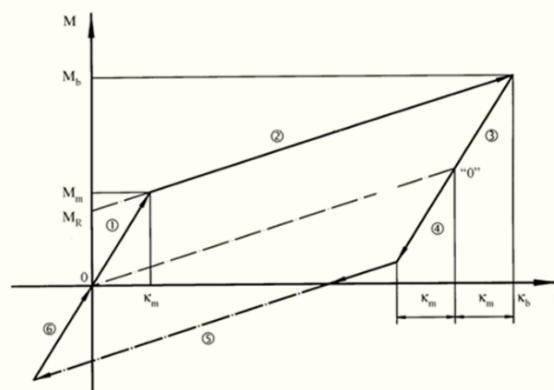


Fig. 6: Histéresis en un diagrama Momento-Curvatura [10].

Donde el factor 0,8 se debe a que en la realidad la curva de la histéresis no es exactamente un cuadrilátero. Conociendo el área, se puede calcular la energía disipada por ciclo (E_d) y el potencial de disipación, ambos por unidad de longitud (P_d).

$$P_{d,k} = E_{d,k} \cdot f_k = \frac{1}{L} \int_0^L A_c(\chi_{max}) dx \cdot f_k \quad (54)$$

Donde, χ_m es la curvatura crítica, χ_{max} es la curvatura a lo largo del cable maximizada en el tiempo, EI_{max} y EI_{min} son las rigideces a la flexión máxima y mínima del cable, respectivamente, y f_k es la frecuencia en Hz del modo k.

4. Evaluación del daño en cables

Los valores de curvatura que puede experimentar un cable con una distribución asimétrica de daño superficial podrían superar los valores críticos en los cuales la suposición de rotación del cuerpo rígido de la sección transversal en flexión (estado de adherencia entre alambres) se vuelve inválida.

4.1 Algoritmo de detección de daños

Paso 1: Análisis del caso virgen

- Calcular ω_i (frecuencia del modo i) y ϕ_i (forma modal).
 - Proceso iterativo para calcular EI como $\omega_i = \omega_i(EI)$, $\phi_i = \phi_i(EI)$ y $EI = EI(\phi_i)$.
- Calcular Potencial de disipación ($P_{d,k}$) según la sección 3.
- Calcular γ_i y γ_{ij} de acuerdo con Kim [31], donde el cable se ha discretizado en j elementos e i se refiere a la forma modal.

Paso 2: Análisis del caso dañado

- Calcular ω_i^* (frecuencia del modo i) y ϕ_i^* (forma modal) para el caso dañado. El valor de la forma modal dañada ϕ_i^* es una entidad equivalente obtenida del campo de desplazamiento del cable dañado ([22]).
 - Proceso iterativo para calcular EI^* como $\omega_i^* = \omega_i^*(EI^*)$, $\phi_i^* = \phi_i^*(EI^*)$ y $EI^* = EI^*(\phi_i^*)$.
- Calcular Potencial de disipación ($P_{d,k}$) según la sección 3.
- Calcular γ_{ij}^* y $g_i = g_i(\omega_i, \omega_i^*)$ de acuerdo con Kim [31].

Paso 3: Calculo de métricas de detección de daño ([15] y [16]).

- Calcular la diferencia de frecuencias como $m_{f_i} = (\omega_i^* - \omega_i)/\omega_i$.
 - Evaluar para ambas direcciones y el promedio cuadrático de las dos, $m_{f_i} = \sqrt{(m_{f_{zz,i}}^2 + m_{f_{yy,i}}^2)}/2$.
 - Considerando que una diferencia $\geq 5\%$ establece la posibilidad de la existencia de daño [16].
- Calcular el criterio de garantía modal (MAC).

$$MAC_i = \left[\frac{|\sum_{j=1}^n \phi_j \phi_j^*|^2}{\sum_j^n (\phi_j)^2 \sum_j^n (\phi_j^*)^2} \right]_i$$

- Donde j es la posición, n son los grados de libertad, para el modo i.

- Calcular el criterio de garantía modal de coordenadas (COMAC).

$$COMAC_j = \frac{[\sum_i^m \phi_{ij} \phi_{ij}^*]^2}{\sum_i^m [\phi_{ij}]^2 \sum_i^m [\phi_{ij}^*]^2}$$

- Calcular diferencia de curvatura

$$\Delta \phi_i'' = |\chi_i^* - \chi_i^u|$$

$$\sum_i^n \Delta \phi_i'' = \sum_i^n |\chi_i^* - \chi_i^u|$$

- Donde χ_i^* y χ_i son los vectores curvatura para el cable con y sin daño, para el modo i.
- Se analiza la diferencia por modo y la sumatoria de modos, y se toma en cuenta el promedio cuadrático de ambas direcciones.

Paso 4: Cálculo de los índices de daños, método basado en energía

- Índice de localización de daños β_j .

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{\sum_i \gamma_{ij}}{\sum_i (\gamma_i g_i + \gamma_{ij})}$$

- Donde el número de modos considerados en el cálculo del índice β_j está controlado por la condición de reducir la importancia del cambio en la rigidez a la flexión en el cálculo de las frecuencias, para asegurar que el estado dañado se considere una perturbación del caso base (enfoque de perturbación de un término).

$$\left| \frac{\omega_i - \omega_i^*}{\omega_i} \right| \leq \varepsilon_\omega$$

- Con ε_ω definido como un valor umbral para la variación de frecuencia debida al daño.

- Índice de severidad α_j .

$$\alpha_j = \frac{k_j^* - k_j}{k_j} = \frac{1}{\beta_j} - 1 = \frac{(\sum_i (\gamma_{ij} - \gamma_{ij}^*) + \sum_i \gamma_i g_i)}{\sum_i \gamma_{ij}^*}$$

$$\gamma_{ij} = \int_j [\phi_i''(x)]^2 dx \quad \& \quad \gamma_i = \int_0^L [\phi_i''(x)]^2 dx$$

$$g_i = \frac{1}{nd} \left(\frac{\delta \omega_i^2}{\omega_i^2} \right) \& \delta \omega_i^2 = \omega_i^{*2} - \omega_i^2$$

5. Calibración y validación del algoritmo propuesto

Para calibrar y validar el modelo propuesto en este documento, se realizan los cálculos sobre cables, cuerdas y conductores estudiados y reportados en la literatura.

5.1 Verificación de frecuencias

N. Riveros [32] estudió las vibraciones en una cuerda de poliéster sometida a distintos tipos de excitaciones (PullBack (PB), impacto (Imp) y por vibraciones ambientales (Micro)) las que fueron observadas mediante una serie de sensores ultrasónicos y cámaras. Al efectuar el modelo se obtuvo lo plasmado en la Fig. 7 que muestra que las formulaciones pueden predecir las frecuencias de los modos de vibración de una cuerda.

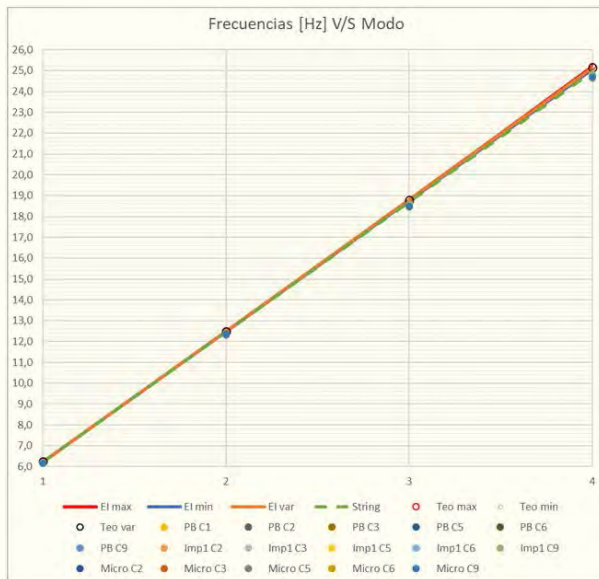


Fig. 7: Frecuencias (Hz), Modelo y paper de Riveros [32].

El modelo entrega que la rigidez a la flexión efectiva de la cuerda decae con el modo de vibrar, como se ve en la Fig. 8, mostrando que cuando un cable o cuerda se somete a flexiones que sobrepasan la curvatura crítica, la rigidez efectiva de un cable disminuye acercándose a su mínimo.

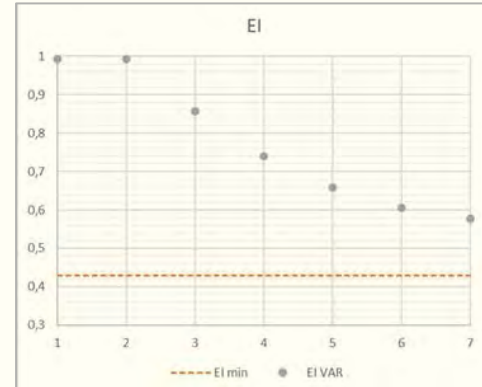


Fig. 8: Rigidez efectiva (EI_{eff} o EI_{var}) de la cuerda Riveros

Guérard en el capítulo 4 de su tesis [28] reporta un estudio sobre un cable AAAC de 7m de largo, simplemente apoyado, sometido a una carga de 30kN siendo un 25% del RTS el cual es de 183,6kN, según el documento, pero el 25% de 183.6kN es 45,9kN, debido a esta ambigüedad, se realizan los cálculos del modelo propuesto con una carga axial de 40,8kN que es un 22,22% del RTS reportado. El experimento realimenta al cable a vibrar sometido a una carga axial, hasta capturar las frecuencias con 3 alambres cortados, teniendo que el cable no es retensado después de cada falla. Este reporta las frecuencias de los primeros 4 modos, para las condiciones de sin daños y con daños de 1 a 3 hebras cortadas, en la Fig. 9 se muestran estos resultados experimentales junto a los entregados por el modelo.

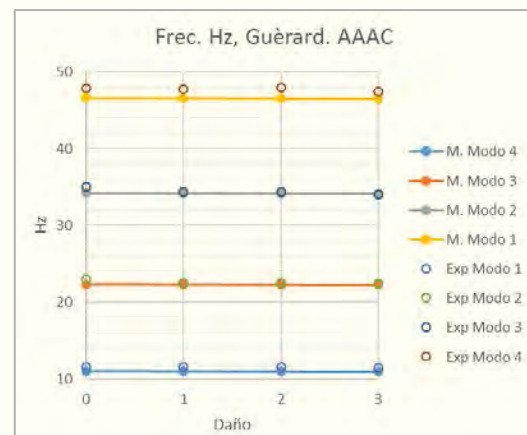


Fig. 9: Frecuencias modales según el número de fallos del conductor AAAC de Guérard.

El modelo entrega, también, los valores de la rigidez a la flexión entorno a los ejes zz e yy (Fig. 10), junto a los valores de la curvatura crítica (Fig. 11), mostrando que el daño en los cables disminuye los valores máximos y mínimos del EI y, en el caso del daño asimétrico³, se induce el deslizamiento en modos menores. Por su parte, se muestra que la curvatura crítica disminuye con el daño, en este caso sometido a una deformación constante.

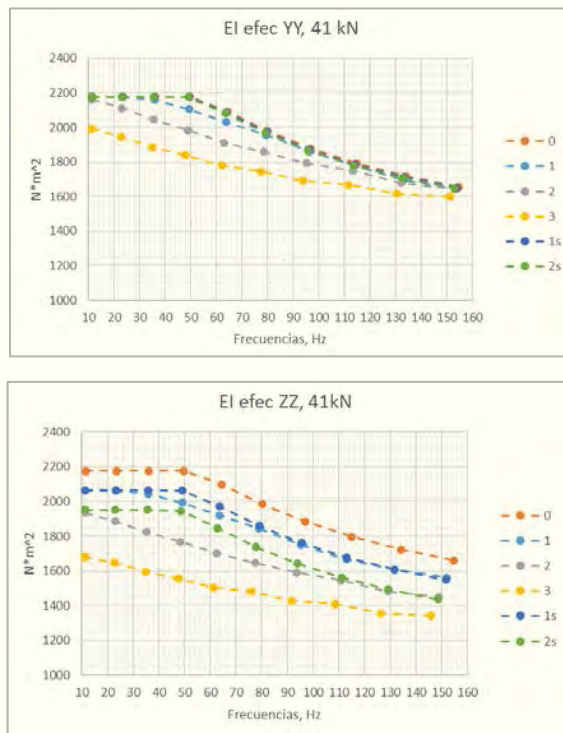


Fig. 10: EI según el número de fallos del conductor AAAC de Guérard.

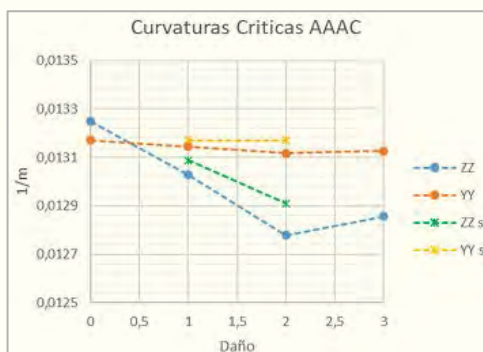


Fig. 11: Curvatura crítica según el número de fallos del conductor AAAC de Guérard.

³ En las Fig. 10 y Fig. 11, la “s” en la leyenda indica los casos de daño simétrico.

5.2 Análisis paramétrico

Para efectos de este trabajo, se efectúa un análisis paramétrico de cable AAAC descrito en el Cap. 4 de la tesis de Guérard [28], en el cual, se evalúa este cable bajo distintas cargas axiales, longitudes y condiciones de borde, con velocidad inicial de 10 y 20 km/h.

En la literatura, se tiene que, en las pruebas manuales, el control del operador introduce variabilidad y la velocidad a menudo se mide utilizando sensores o mediante análisis de video de alta velocidad. Siendo esta de unos pocos metros por segundo, teniendo que, a mayor amplitud del impacto del martillo, mayor el rango de frecuencias medibles [33]. Además, el impacto del martillo influye en la amplitud de las ondas de vibración del elemento ([23], [34] y [35]).

A partir de los gráficos de las Fig. 12 a Fig. 17, se puede observar que, para las frecuencias: el efecto de la carga axial es preponderante sobre las condiciones de borde (c.b.); para cables cortos (<7m), las condiciones de borde tienen una influencia clara; contra mayor sea el largo las c.d.b. pierden influencia.

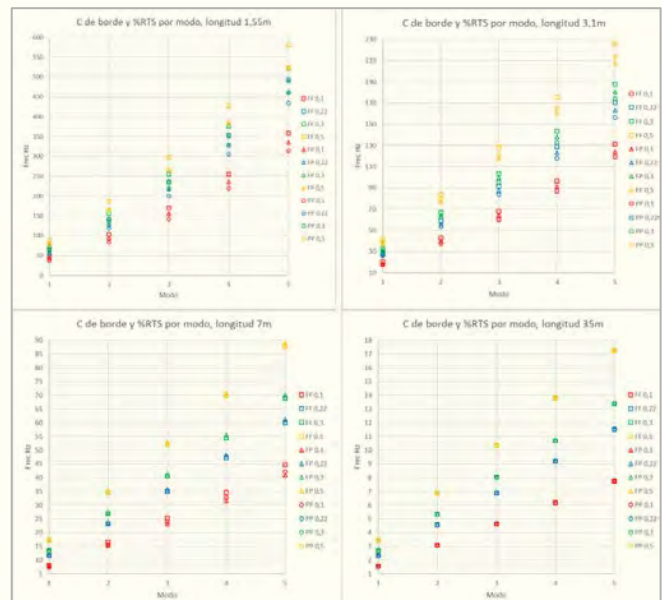


Fig. 12: Análisis paramétrico de freq. bajo perturbación inicial de 10 km/h. Prt.1.

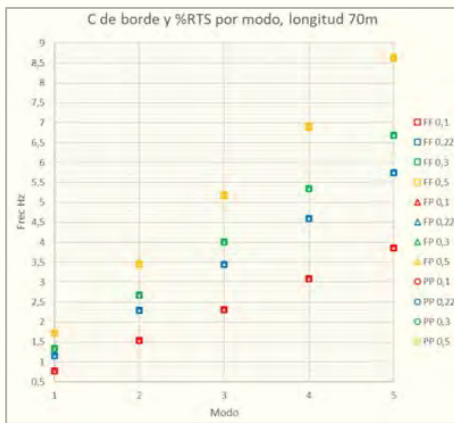


Fig. 13: Análisis paramétrico de frec. bajo perturbación inicial de 10 km/h. Prt.2

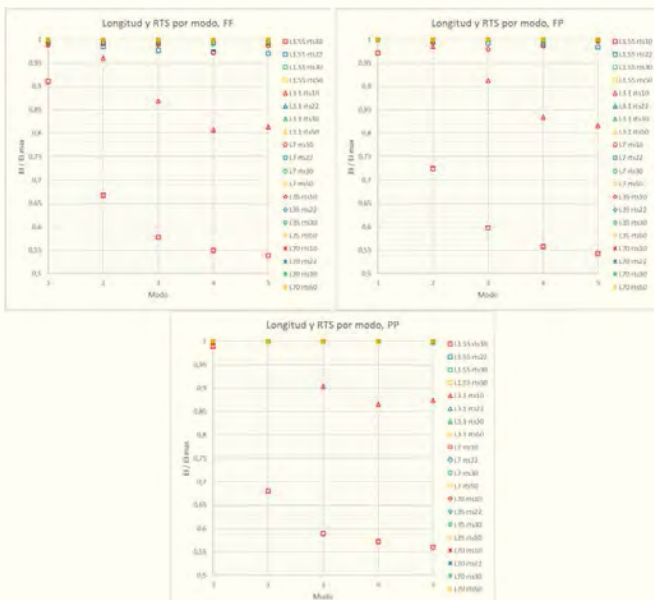


Fig. 14: Análisis paramétrico de EI. bajo perturbación inicial de 10 km/h.

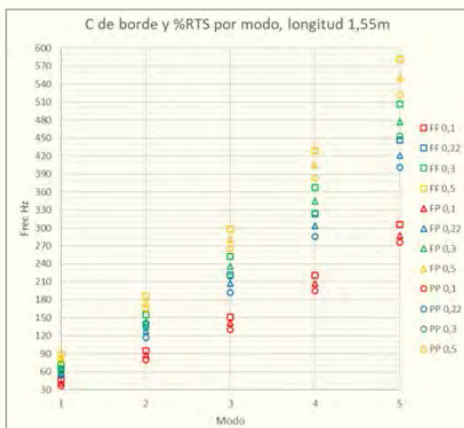


Fig. 15: Análisis paramétrico de frec. bajo perturbación inicial de 20 km/h. Prt.1

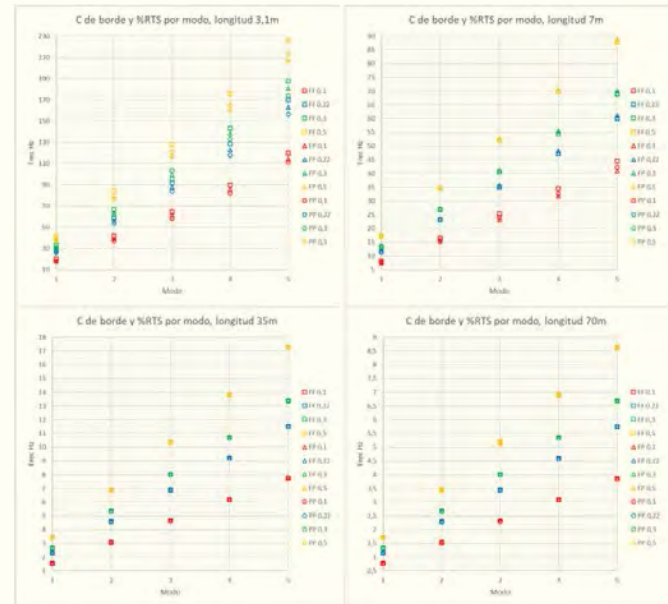


Fig. 16: Análisis paramétrico de frec. bajo perturbación inicial de 20 km/h. Prt.2.

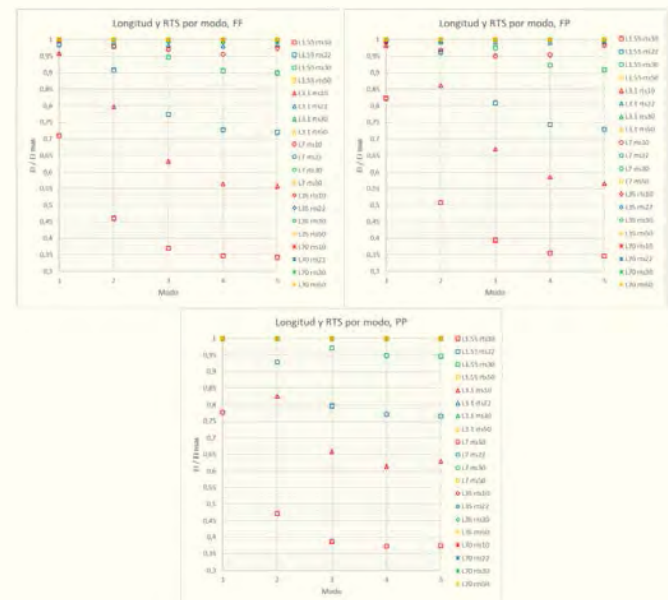


Fig. 17: Análisis paramétrico de EI. bajo perturbación inicial de 20 km/h.

Sobre la rigidez se observa: el efecto de la carga axial es preponderante frente a las c.b.; mientras más flexible sea la c.b. la rigidez es mayor, pero a mayor carga axial la diferencia entre las c.b. disminuye; a mayor longitud del cable, menor será el deslizamiento entre las hebras.

Al contrastar los casos por la condición inicial (c.i.) se tiene que, al incrementar la perturbación de la c.i.

la rigidez a la flexión de algunos modos disminuye, decreciendo la frecuencia de estos.

5.3 Potencial de disipación

Al evaluar el potencial de disipación con el método propuesto, y comparándolo con el método descrito por Foti [30], para el cable Nelson descrito por en ese documento, se tiene que el método propuesto en la sección 3, en la Fig. 18, línea amarilla, es capaz de predecir adecuadamente el potencial de disipación, las líneas verde y café representan el método propuesto en [27] y [29], mientras que las azules en [30].

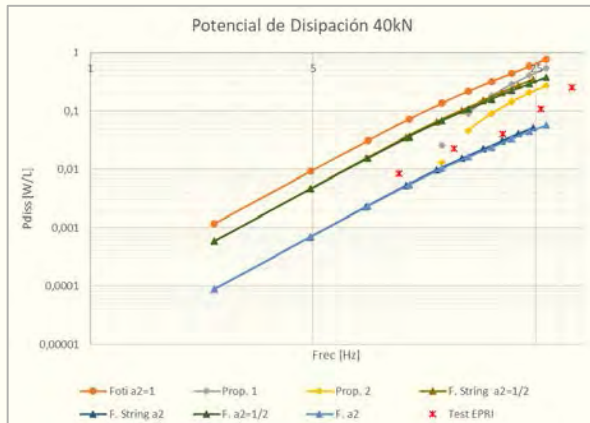


Fig. 18: Potenciales de Disipación Según distintos métodos, Cable Nelson de 24m de largo, a 20% RST.

5.4 Evaluación de métricas

Comparación de frecuencias

Para evaluar estas métricas aplicamos el modelo al cable descrito por Xia et al [36], con 9.9m de largo a 60kN, obteniendo frecuencias que se comparan con las mediciones reportadas, en la Fig. 19. Se puede apreciar que tanto este cable como el AAAC de Guérard (Fig. 9), presentan variaciones bajas en sus frecuencias debido al daño. Lo que se reafirma en las Fig. 20 y Fig. 21, donde se comparan las frecuencias con y sin daños. Se aprecia que en el cable 6+1, en que la carga axial no varía c/r al daño, la frecuencia tiene poco cambio a causa del daño, mientras que el cable AAAC tiene cambios mayores, recordando que en este caso la tensión si cambia al producirse daños.

Pero, para ambos casos, no se cumple el criterio del 5% [16], por lo que esta métrica no es capaz de detectar daño en este caso.

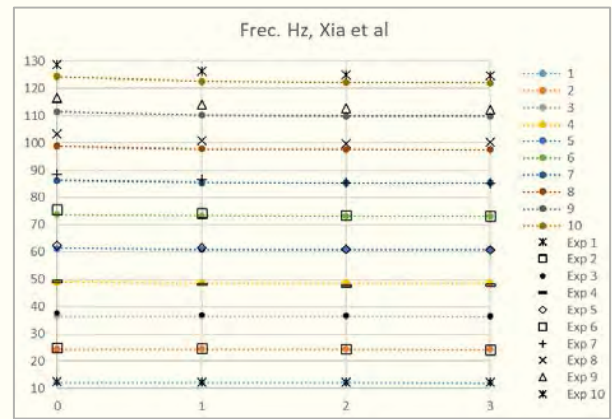


Fig. 19: Frecuencias cable 6+1 de acero de 9.9m a 60kN.

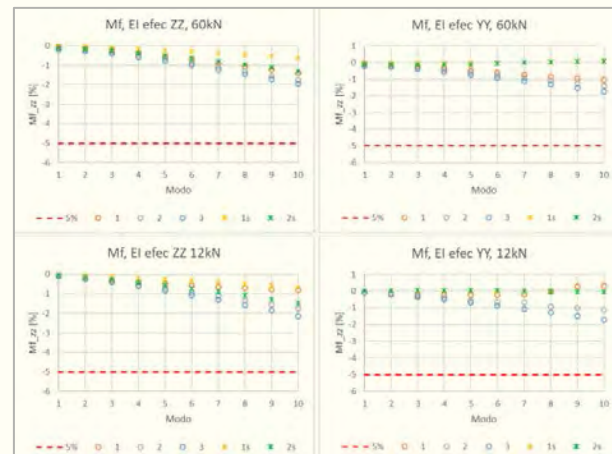


Fig. 20: Comparación de frecuencias. cable 6+1 de 9.9m.

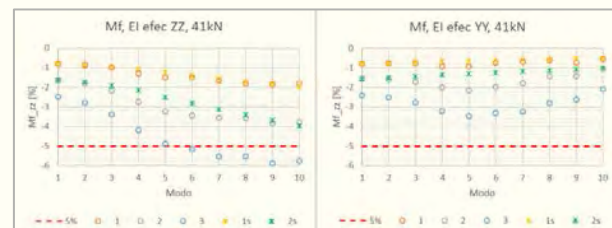


Fig. 21: Comparación de frecuencias. cable AAAC.

Métrica MAC

Como se ve en los gráficos Fig. 22 y Fig. 23, esta métrica es capaz de detectar la presencia de daño asimétrico, teniendo mayor sensibilidad contra mayor sea la carga axial, o el modo evaluado. Esta métrica se muestra insensible al daño simétrico para este modelo.

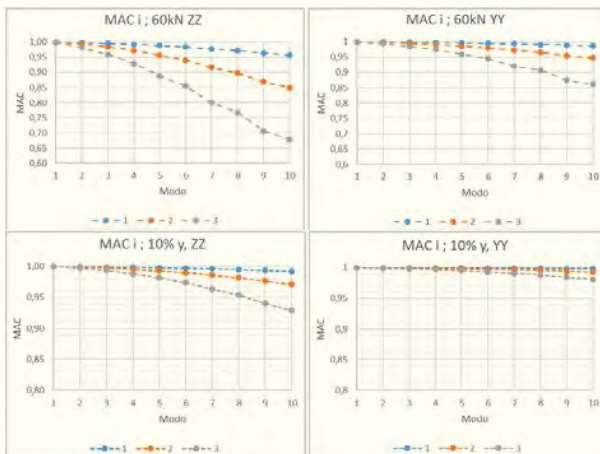


Fig. 22: MAC cable 6+1 de 9.9m, a 60kN y 12kN (10% fluencia).

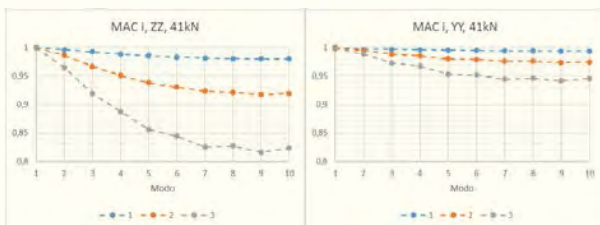


Fig. 23: MAC cable AAAC de Guérard.

Métrica COMAC

Esta métrica se muestra capaz de detectar y localizar el daño asimétrico, pero insensible al simétrico a lo largo del cable; como esta métrica consta de la suma de varios modos, se calcula para un tiempo dado como se puede ver en Fig. 24 y Fig. 25; en la primera, se compara para un mismo tiempo con distinta carga, y en la segunda, se muestra graficado el COMAC para 1 a 3 hebras cortadas en un rango de 3seg, sin mayores diferencias en función al nivel de daño.

Con esto se tiene que esta métrica no es capaz de cuantificar el nivel de daño.

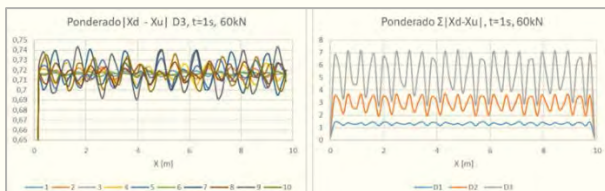


Fig. 24: COMAC cable 6+1 de 9.9m, a 60kN y 12kN a 1seg.

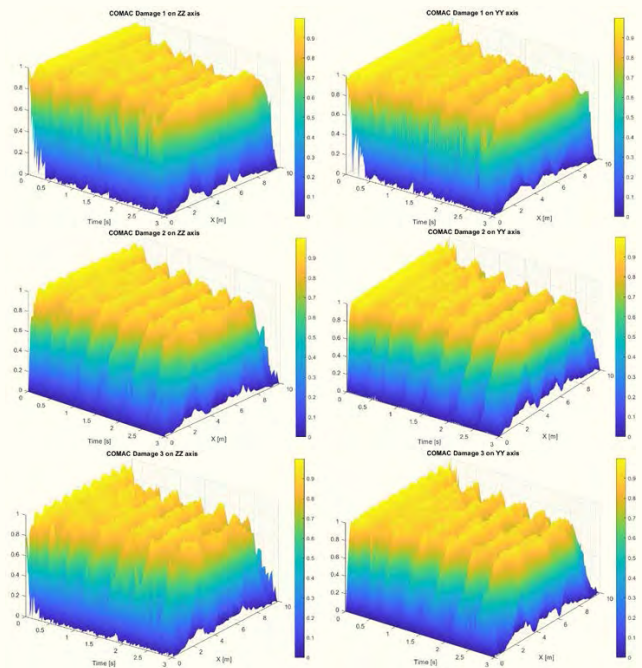


Fig. 25: COMAC cable 6+1 de 9.9m a 60kN.

Diferencia de curvaturas

Para esta métrica, se observa que (en Fig. 26 a Fig. 29) es capaz de identificar y localizar daño a lo largo del cable, mostrándose sensible al nivel de daño infringido al cable y, además, muestra que su sensibilidad aumenta a mayor carga axial aplicada. Esto tanto para los casos de daños asimétricos como los simétricos, siendo que en ambos se genera una pérdida de rigidez y un aumento en la flexibilidad. Lo que se vuelve más visible al contrastar las sumatorias de estas diferencias.

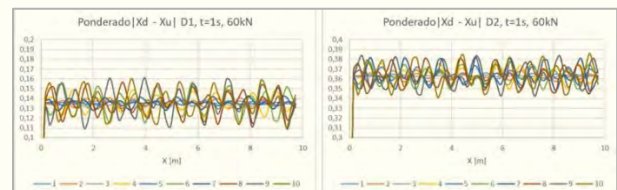


Fig. 26: Diferencia ponderada de Curvaturas, daño asimétrico, cable 6+1 de 9.9m a 60kN.

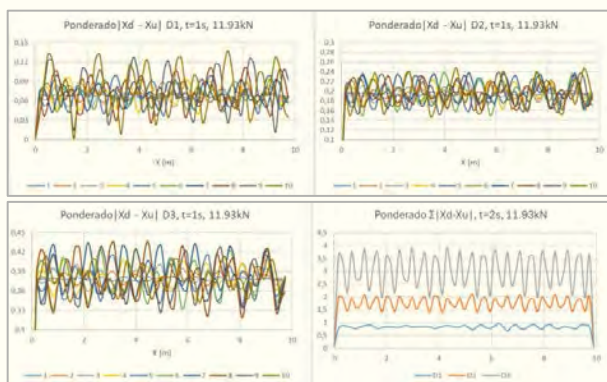


Fig. 26: Diferencia ponderada de Curvaturas, daño asimétrico, cable 6+1 de 9.9m a 12kN.

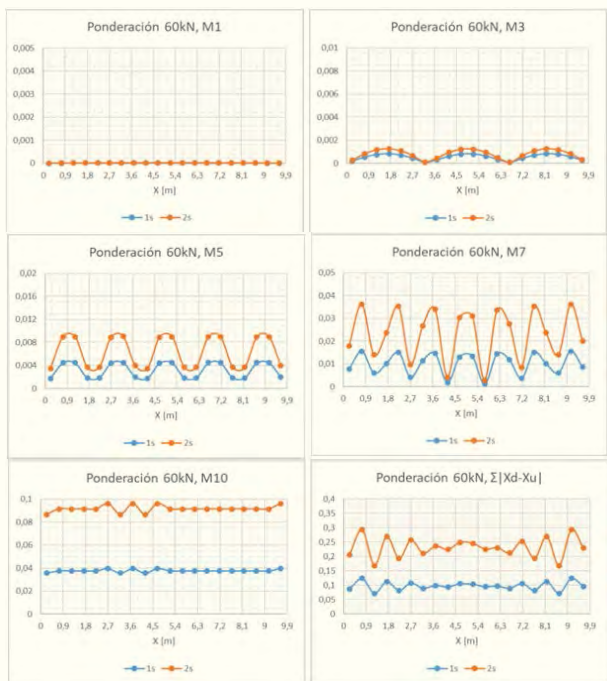


Fig. 27: Diferencia ponderada de Curvaturas, daño simétrico, cable 6+1 de 9.9m a 60kN, modos 1, 3, 5, 7 y 10.

Método basado en energía

Para este método la definición de la forma modal equivalente (Ecs. (9) y (10)) utilizada, tiene que su término No-Homogéneo aporta demasiada energía, haciendo que el índice β_j explote, implicando que α_j estime una destrucción total del cable.

Por lo cual, se define una nueva forma modal equivalente, tal que, el término particular sea una perturbación de la forma modal sin daños, siendo:

$$\hat{v}(x) = \phi_i(x) + (P(x)/A_i) \cdot \eta \quad (55)$$

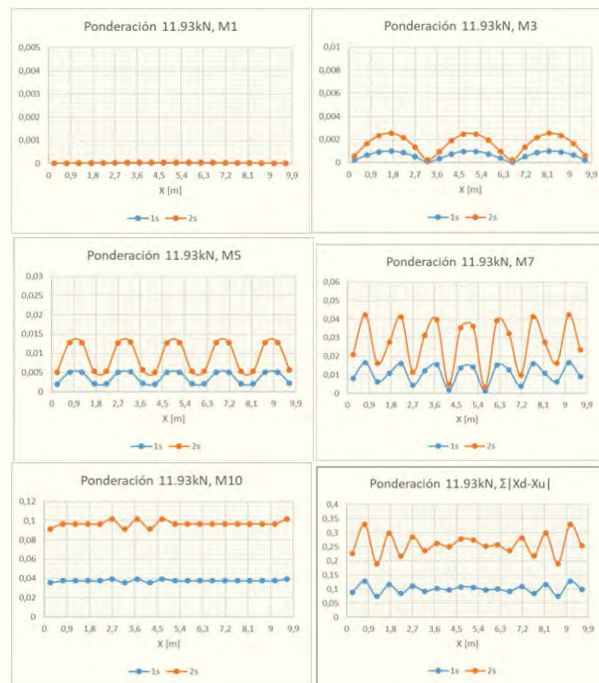


Fig. 28: Diferencia ponderada de Curvaturas, daño simétrico, cable 6+1 de 9.9m a 12kN, modos 1, 3, 5, 7 y 10.

Donde A_i es la amplitud del modo i y η un valor que se calibra, en este caso, a partir de este cable, pero sometido a deformación controlada, buscando resultados acordes con la pérdida de área (Fig. 30 y Tabla 1). Dando como resultado $\eta = 0,005$.

Con esto se calcula para el caso en cuestión, a carga controlada (Fig. 31 y Tabla 1) obteniendo valores inferiores a la pérdida de área, pero con los cuales se pueden armar curvas predictivas con las que es posible estimar la severidad del daño.

Tabla 1: Índice α_j promedio del cable 6+1 de 9.9m a 60kN

Daño	α_j Promedio a deformación controlada			α_j Promedio a carga controlada		
	zz	yy	P. Área	zz	yy	P. Área
1	-0,169	-0,160	0,14	-0,024	-0,014	0,14
2	-0,320	-0,313	0,28	-0,036	-0,028	0,28
3	-0,468	-0,464	0,42	-0,059	-0,054	0,42
1s	-0,156	-0,138	0,14	-0,009	0	0,14
2s	-0,312	-0,276	0,28	-0,019	0	0,28

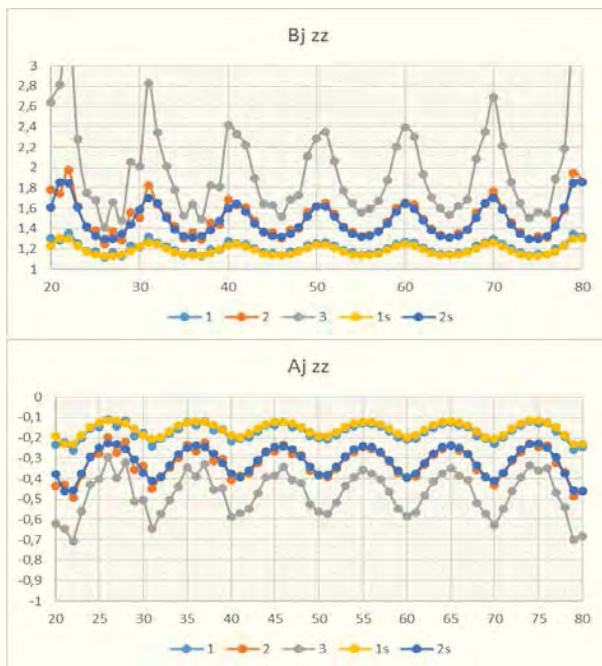


Fig. 29: Índices α_j y β_j del cable 6+1 de 9.9m a 60kN, con deformación controlada.

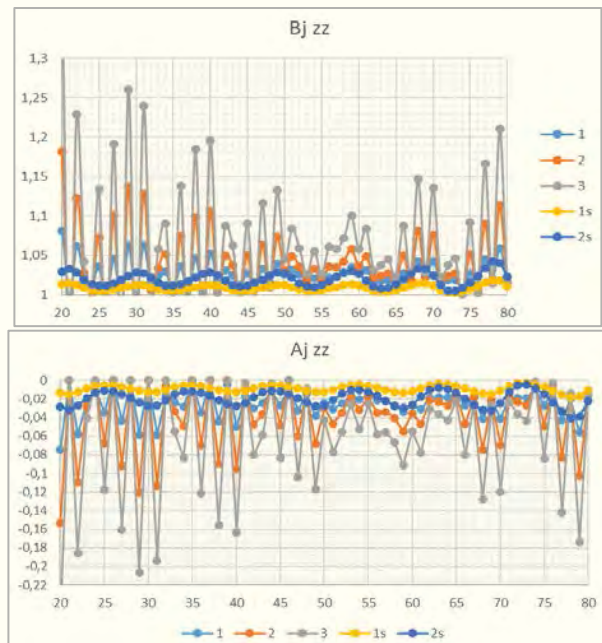


Fig. 30: Índices α_j y β_j del cable 6+1 de 9.9m a 60kN, con carga controlada.

Por su parte, al evaluar esta métrica para el cable AAAC de Guérard, a deformación constante, se obtiene una sobre estimación de la severidad del daño, respecto a la pérdida de área, esto se debe a que la rigidez a la flexión tiene un aporte significativo a la energía modal de los modos considerados, permitiendo que la diferencia de

rigidez, por el deslizamiento (Fig. 32), entre el caso sano y dañado se confunda con daño por parte de los índices. En consecuencia, se reduce el número de modos considerados, buscando resultados más precisos (Tabla 2), obteniendo de esta forma una relación 1 a 1 entre el índice de severidad y el daño.

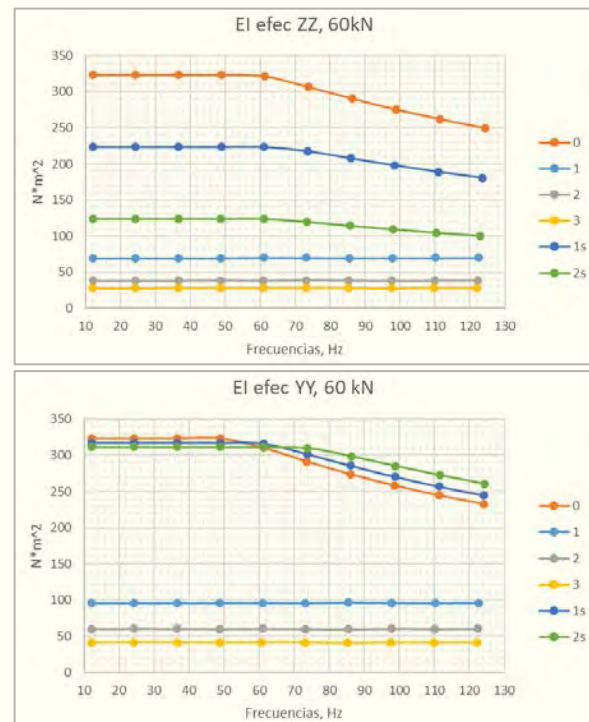


Fig. 31: EI según el número de fallos del cable 6+1 de 9.9m a 60kN.

Tabla 2: Índice α_j promedio del cable AAAC de Guérard.

α_j promedio a deformación controlada				
Daño	Modos considerados			Pérdida de Área
	10	4	3	
1	-0,034	-0,022	-0,016	0,016
2	-0,067	-0,044	-0,032	0,032
3	-0,100	-0,066	-0,048	0,049
1s	-0,033	-0,022	-0,016	0,016
2s	-0,067	-0,044	-0,032	0,032

Potencial de disipación

Al calcular el potencial de disipación para el cable 6+1 de 9.9m a 60kN, se obtiene que el daño simétrico genera una caída en el potencial en torno al eje débil (zz), mientras que el daño asimétrico lo aumenta en torno a ambos ejes. Pero, se tiene que el incremento de este daño en el eje fuerte (yy) no significa necesariamente un aumento del potencial (Fig. 33), además, el modelo muestra que no puede

dar un potencial para lo modos bajos del caso sano ni con daño simétrico, lo que se contradice con lo expresado por Xia et al en su documento [36].

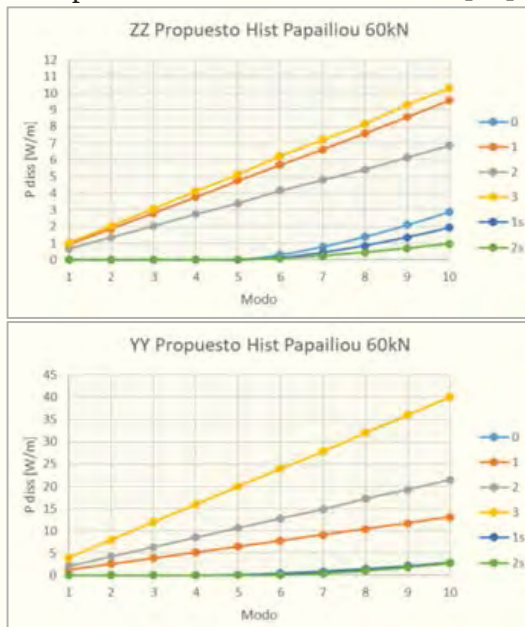


Fig. 32: P_d del cable 6+1 de 9.9m a 60kN, con y sin fallos.

6. Conclusiones

En resumen, el modelo captura la variación de los parámetros dinámicos a causa del daño, teniendo en cuenta la distribución de este, y considerando una rigidez a la flexión variable por modo, y otra para las soluciones particulares; demostrando así, tener la capacidad de poder detectar el daño, en sus niveles respectivos: identificación, localización y cuantificación.

El uso del modelo en conjunto con las métricas de detección de daño concluye que:

- En base a las frecuencias se capturan variaciones bajas en ambos tipos de distribución, en especial en cables en que la carga axial es indiferente al nivel de daño.
- La métrica MAC es capaz de identificar el daño asimétrico, con mayor sensibilidad contra mayor sea el modo, o el nivel de daño.
- El COMAC se muestra más sensible en la identificación que las frecuencias, y logra localizar el daño a lo largo del cable, esto para los cables asimétricos.

En consecuencia, para este modelo se pueden utilizar las métricas MAC y COMAC como un indicador de si el daño es simétrico o asimétrico, sirviéndose de si otras métricas detectan el daño mientras que estas no.

La variación de curvaturas muestra ser capaz de identificar y localizar daño, en especial para los casos asimétricos, teniendo mayor sensibilidad cuando la carga axial es mayor; además, se puede ver cierta sensibilidad al nivel de daño, por lo cual, se puede intuir que esta variación se puede usar para determinar si un cable se encuentra más dañado que otro.

Por su parte la variación del potencial de disipación es capaz de predecir el aumento en el amortiguamiento para el caso asimétrico. Sin embargo, el modelo demuestra una incapacidad de detectar disipación para los modos en que no detecta deslizamiento, lo que ocurre principalmente en los modos bajos de los cables sanos y con daños simétricos, impidiendo de esta forma poder establecer una diferencia porcentual que permita detectar y cuantificar daños, en especial en modos bajos; esto se ve respaldado por los resultados del potencial del cable Nelson presentado en la Fig. 18, donde se predice con relativa exactitud el potencial de disipación después del modo 4 en un cable sano. Por ello, esta métrica es capaz de detectar daño si se logran medir suficientes modos, en el caso asimétrico. Mientras, para los simétricos esto no sucede, debido a que no muestran el aumento en la disipación esperado, y a que la diferencia del potencial en torno a cada eje no es muy diferente.

Por último, el método basado en energía logra identificar, localizar y cuantificar daño. Esto último lo hace estableciendo una relación entre el valor del índice de severidad, α_j , con un nivel de daño. Sin embargo, para el caso en que la deformación es inducida, se pueden obtener resultados directos a la pérdida de área, al considerar un número adecuado de modos.

Finalmente, considerando la forma modal equivalente de la Ec. (55), debido al significativo aporte de energía por parte del término No-Homogéneo, se debe tener en cuenta que esta forma modal equivalente, cuando la solución particular es

cero (caso sano y daño simétrico), es igual a la definida en la Ecs. (9) y (10).

Referencias

- [1] R. A. Sousa, F. P. Figueiredo, P. Cambier, A. Oliveira, and R. M. De Souza, "Analitical Study of the Influence of Bending and Shear Stiffness and Rotational Inertia in the Dynamic Behavior of Beams, Part I: Theory." [Online]. Available: <http://www.ufpa.br>
- [2] Y. Mo, "Modal Analysis of Continuous Structural System with Tapered Cantilevered Members," Master Thesis, Texas A&M University, 2011.
- [3] A. Öchsner, *Classical Beam Theories of Structural Mechanics*. Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-76035-9.
- [4] L.-Y. Luo, Y.-L. Du, T.-H. Yi, C.-X. Qu, S.-H. Zhang, and T.-S. Geng, "Piecewise-Fitted Formula for Cable Force Identification Considering Bending Stiffness, Sag, and Inclination," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 28, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.1061/jbenf2.beeng-6143.
- [5] X. Huang, X. Lu, L. Zhao, and G. Feng, "Modal parameter calculation and vibration characteristic analysis of transmission line conductor," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 17, no. 11, pp. 2483–2496, Jun. 2023, doi: 10.1049/gtd2.12830.
- [6] *ISO 4309: Cranes - Wire ropes - Care and maintenance, inspection and discard*, vol. 4309. Switzerland: The International Organization for Standardization, 2010.
- [7] S. E. Aguirre, "Estudio de resonadores periódicos para reducir la vibración en cables," FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2021.
- [8] K. O. Papailiou, "On the Bending Stiffness of Transmission Line Conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1576–1588, Oct. 1997.
- [9] J. F. Beltrán and S. Pino, "A numerical approach to bound the asymmetrically surface-damaged metallic strands response accounting for bending stiffness nonlinearity: Damage and structural integrity evaluation purposes," *Structures*, vol. 55, pp. 606–625, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.06.038.
- [10] K. O. Papailiou, "Bending of helically twisted cables under variable bending stiffness due to internal friction, tensile force and cable curvature," 1995.
- [11] S. Guérard, P. Van Dyke, and J. L. Lilien, "Evaluation of Power Line Cable Fatigue Parameters Based on Measurements on a Laboratory Cable Test Span." [Online]. Available: www.Ireq.ca
- [12] J. F. Beltrán and E. De Vico, "Assessment of static rope behavior with asymmetric damage distribution," *Eng Struct*, vol. 86, pp. 84–98, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.12.026.
- [13] J. F. Beltrán, N. Ramírez, and E. Williamson, "Simplified analysis of the influence of strain localization and asymmetric damage distribution on static damaged polyester rope behavior," *Ocean Engineering*, vol. 145, pp. 237–249, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.006.
- [14] J. F. Beltrán, E. Nuñez, F. Nuñez, I. Silva, T. Bravo, and R. Moffat, "Static response of asymmetrically damaged metallic strands: Experimental and numerical approach," *Constr Build Mater*, vol. 192, pp. 538–554, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.092.
- [15] J. J. Moughty and J. R. Casas, "A state of the art review of modal-based damage detection in bridges: Development,

- challenges, and solutions,” May 13, 2017, *MDPI AG*. doi: 10.3390/app7050510.
- [16] R. Salgado, P. J. S. Cruz, L. F. Ramos, and P. B. Lourenço, “Comparison between damage detection methods applied to beam structures,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost*, Taylor and Francis/ Balkema, Jul. 2006, pp. 241–242. doi: 10.1201/b18175-86.
- [17] G. Sha, M. Radzieński, M. Cao, and W. Ostachowicz, “A novel method for single and multiple damage detection in beams using relative natural frequency changes,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 132, pp. 335–352, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.06.027.
- [18] Z. A. Jassim, N. N. Ali, F. Mustapha, and N. A. Abdul Jalil, “A review on the vibration analysis for a damage occurrence of a cantilever beam,” *Eng Fail Anal*, vol. 31, pp. 442–461, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.02.016.
- [19] R. A. Sousa, R. M. Souza, F. P. Figueiredo, and I. F. M. Menezes, “The influence of bending and shear stiffness and rotational inertia in vibrations of cables: An analytical approach,” Mar. 2010. doi: 10.1016/j.engstruct.2010.11.026.
- [20] J. F. Beltrán and E. Inostroza, “Simplified analysis of damage evolution in surface-damaged metallic strands: Uncoupled approach,” *Eng Fail Anal*, vol. 131, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105916.
- [21] J. F. Beltrán and J. M. Camus, “On the ductile damage progression in surface-damaged metallic strands: Towards a damage tolerance analysis,” *Structures*, vol. 57, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.105112.
- [22] D. Gritsenko, J. Xu, and R. Paoli, “Transverse vibrations of cantilever beams: Analytical solutions with general steady-state forcing,” *Applications in Engineering Science*, vol. 3, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.apples.2020.100017.
- [23] J. Guo, G. Jiang, Z. Wu, A. He, and J. Cai, “Numerical Investigation on the Dynamic Responses and Failure Criterion of RC Beam Under Impact,” *Front Mater*, vol. 9, Mar. 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.851301.
- [24] H. D. Do and K. S. Park, “Vibration-based tension estimation of short helically multi-stranded wires under low axial tension,” *Eng Struct*, vol. 275, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115207.
- [25] D. Lisitano, J. Slavič, E. Bonisoli, and M. Boltežar, “Strain proportional damping in Bernoulli-Euler beam theory,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 145, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106907.
- [26] C. Hardy, A. Leblond, S. Goudreau, and L. Cloutier, “Application of Contact Mechanics to Cable Self-Damping.”
- [27] F. Foti and L. Martinelli, “A unified analytical model for the self-damping of stranded cables under aeolian vibrations,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 176, pp. 225–238, May 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.03.028.
- [28] S. Guérard, “Power Line Conductors, a Contribution to the Analysis of their Dynamic Behaviour,” Faculty of Applied Sciences, U. of Liege, Liège, 2011.
- [29] F. Foti and L. Martinelli, “An enhanced unified model for the self-damping of stranded cables under aeolian vibrations,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 182, pp. 72–86,

- Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.09.005.
- [30] F. Foti, L. Martinelli, and F. Perotti, "A new approach to the definition of self-damping for stranded cables," *Meccanica*, vol. 51, no. 11, pp. 2827–2845, Nov. 2016, doi: 10.1007/s11012-016-0444-9.
- [31] J.-T. Kim, Y.-S. Ryu, H.-M. Cho, and N. Stubbs, "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method," 2003. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/engstruct
- [32] N. Riveros, R. L. Boroschek, and J. F. Beltrán, "Estimating Modal Properties of Nonlinear Cables Using Targetless Visual Tracking."
- [33] M. Kobusch, L. Klaus, and L. M. Mendoza, "Investigation of Impact Hammer Calibrations," 2017.
- [34] Y. M. Mao, X. L. Guo, and Y. Zhao, "Experimental study of hammer impact identification on a steel cantilever beam," *Exp Tech*, vol. 34, no. 3, pp. 82–85, May 2010, doi: 10.1111/j.1747-1567.2009.00530.x.
- [35] C. Walber, M. Stefanski, and S. Seidlitz, *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, vol. 7. 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75988-9>.
- [36] Z. Xia, Y. Lin, Q. Wang, and Q. Fan, "Damage detection method for cables based on the change rate of wavelet packet total energy and a neural network," *J Civ Struct Health Monit*, vol. 11, no. 3, pp. 593–608, Jul. 2021, doi: 10.1007/s13349-021-00471-2.
-

CARACTERIZACIÓN DEL MANTO NIVAL EN UNA CUENCA DE MONTAÑA CON BOSQUE NATIVO EN LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE.

Anelim Bernal-Mujica¹, Sebastián A. Krogh²

RESUMEN

Este estudio analiza la influencia del bosque en la acumulación y derretimiento de nieve en la cuenca del Estero Renegado (río Itata, Región del Ñuble), caracterizada por un régimen nivo-pluvial, un gradiente orográfico de 1.000 m y 47% de cobertura boscosa. Se realizaron rutas de nieve (profundidad y densidad) en cuatro puntos durante las temporadas de invierno 2022, 2023 y 2024: dos en claros de bosque y dos bajo el dosel forestal, uno con orientación norte y el otro con orientación sur. Mediante el modelo Cold Regions Hydrological Model (CRHM), validado con datos observados, se estimó la evolución del manto nival durante el periodo 1990-2023. Los resultados muestran una reducción de hasta 30% en la acumulación bajo dosel, con menor impacto en la ladera con orientación norte. Años más cálidos y secos reducen el impacto del bosque en la acumulación. Estos resultados nos permiten entender y cuantificar la importancia del bosque en la dinámica del manto nival, lo cual es esencial para estimar la vulnerabilidad de las cuencas cordilleranas, y su efecto en la gestión y planificación hídrica.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of forest cover on snow accumulation and melt in the Estero Renegado watershed (Itata River, Ñuble Region), characterized by a nival-pluvial regime, a 1,000 m orographic gradient, and 47% forest cover. Snow surveys (depth and density) were conducted at four locations during the winter seasons of 2022, 2023 and 2024: two in open areas and two under the forest canopy, one with a north-facing and the other with a south-facing orientation. Using the Cold Regions Hydrological Model (CRHM), validated with observed data, the evolution of the snowpack was estimated for the period 1990-2023. The results indicate a reduction of up to 30% in snow accumulation under the canopy, with a less pronounced impact on north-facing slopes. Warmer and drier years diminish the forest's influence on accumulation. These findings contribute to understanding and quantifying the role of forests in snowpack dynamics, which is essential for assessing the vulnerability of mountain watersheds and its implications for water resource management and planning.

Palabras claves: Manto nival, Mediciones, Modelación nival, Disponibilidad hídrica

¹ Doctorado en Recursos Hídricos y Energía para la Agricultura, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.
E-mail: abernal@udec.cl

² Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción

INTRODUCCIÓN

El derretimiento de nieve es una fuente clave de recursos hídricos en la Cordillera de los Andes, asegurando el abastecimiento de agua para millones de personas, la industria y los ecosistemas durante la primavera y el verano. La acumulación y el derretimiento de la nieve están influenciados por factores topográficos, meteorológicos y la cobertura forestal, desempeñando esta última un papel determinante en la distribución espacial del manto nival (Fayad et al., 2009; Varhola et al., 2010; Huerta et al., 2019; Ellis et al., 2013). El dosel forestal influye en la dinámica nival a través procesos como la intercepción de nieve y su sublimación, y la reducción de la radiación solar incidente. Si bien estos procesos han sido ampliamente estudiados en bosques de coníferas del hemisferio norte (Hedstrom y Pomeroy, 1998; López-Moreno y Latron, 2008; López-Moreno y Stähli, 2008; Lundquist et al., 2013; Musselman et al., 2008; Varhola et al., 2010), la respuesta del manto nival en bosques caducifolios y climas mediterráneos en el hemisferio sur sigue siendo poco comprendida, a pesar de jugar un rol determinante en cuencas de cabecera de la zona centro-sur de Chile.

El dosel forestal influye en la acumulación y ablación de la nieve al modificar el balance de energía en la superficie del manto nival. La intercepción de nieve por el dosel reduce la cantidad de nieve que alcanza el suelo y, dependiendo de la densidad del dosel, la topografía local y las condiciones meteorológicas, puede favorecer la sublimación y generar pérdidas significativas en comparación con áreas abiertas sin cobertura (Hedstrom y Pomeroy, 1998; Pomeroy et al., 2002; López-Moreno y Latron, 2008; Revuelto et al., 2015; Sanmiguel-Vallelado et al., 2020). Durante la fase de ablación, el dosel regula el derretimiento de la nieve al reducir la radiación solar incidente sobre el manto nival, lo que puede prolongar su duración. No obstante, la emisión de radiación de onda larga desde la vegetación puede generar un efecto contrario, acelerando el derretimiento en áreas sombreadas (Pomeroy et al., 2004; Sicart et al., 2004; Lundquist et al., 2013). La interacción entre estos procesos determina si la duración del manto nival en bosques es mayor o menor en comparación con áreas abiertas, dependiendo de la densidad del dosel y las condiciones climáticas locales, lo que dificulta la

generalización de estos efectos (Dickerson-Lange et al., 2017).

En la zona centro-sur de Chile, los bosques caducifolios y las condiciones climáticas mediterráneas presentan características distintas a las de las áreas estudiadas en el hemisferio norte. La fenología del bosque caducifolio, con la pérdida de hojas en otoño e invierno, modifica significativamente la intercepción y la atenuación de la radiación, lo que podría alterar los patrones de acumulación y ablación de la nieve en comparación con bosques perennes. Sin embargo, la mayor parte de los modelos hidrológicos que representan la interacción entre el bosque y la nieve han sido desarrollados y calibrados para condiciones boreales, donde el dosel de coníferas es persistente a largo del año. Esto genera incertidumbre sobre la capacidad de estos modelos para representar procesos como la intercepción variable del dosel (Cebulski y Pomeroy 2025), la modulación de la radiación y el impacto fenológico en la distribución del manto nival en regiones caducifolias, lo que resalta la necesidad de estudios específicos en estos entornos. Huerta et al. (2019) realizó la primera evaluación del impacto de la vegetación en el manto nival, en donde comparó distintos modelos con observaciones en terreno, demostrando el gran rol del bosque en la acumulación y derretimiento de nieve durante tres temporadas de deshielo.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la influencia del bosque caducifolio en los procesos de acumulación y derretimiento de nieve en una pequeña cuenca de cabecera del Río Itata, considerando variaciones en pendiente y orientación, durante un periodo de 33 años. Se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye la presencia de bosque en la acumulación y ablación de nieve bajo distintas condiciones meteorológicas y topográficas? Para abordar esta interrogante, se analiza un período comprendido entre 1990 y 2023, en el que se han registrado distintas condiciones meteorológicas. Se estudia la variabilidad de la acumulación y ablación de nieve bajo el dosel forestal y en áreas abiertas mediante el análisis de las principales variables que caracterizan el manto nival. Para ello se combinaron mediciones en terreno de profundidad y densidad de nieve con modelación hidrológica utilizando el Modelo Hidrológico de Regiones Frías (CRHM, Pomeroy et al., 2007, 2022),

que ha sido ampliamente utilizado para representar procesos físicos bosque-nieve en el mundo. Las simulaciones del equivalente de agua de nieve (EAN) se validaron con observaciones de campo, permitiendo evaluar la capacidad del CRHM para representar la variabilidad espaciotemporal del manto nival en bosques caducifolios.

DATOS Y METODOLOGÍA

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una cuenca de cabecera del río Itata, en la Región de Ñuble, Chile, centrado en la parte alta del Estero Renegado ($36^{\circ}54'S$, $71^{\circ}25'W$), en los alrededores del Volcán Nevados de Chillán. Los datos fueron obtenidos durante tres temporadas de invierno (2022, 2023 y 2024). El sitio experimental está ubicado a una altitud de 1700 m s.n.m., con pendientes que varían entre 10° y 30° . La superficie está predominantemente cubierta por un bosque caducifolio compuesto por especies del género *Nothofagus* (Pfanzelt et al., 2008), que alcanzan alturas de hasta 30 m.

El clima de la zona es mediterráneo, con un régimen nivo-pluvial. La precipitación media anual medida en la estación de la Dirección General de Agua de Las Trancas es de 2.460 mm, mientras que la temperatura media anual del aire es de $8,1^{\circ}C$. Durante el invierno, las bajas temperaturas favorecen una acumulación significativa de nieve, la cual se mantiene hasta el inicio de la primavera. La fusión del manto nival ocurre predominantemente entre octubre y finales de diciembre, aunque pueden producirse eventos de deshielo en cualquier momento durante el periodo de nieve, incluso en los meses más fríos.

La heterogeneidad en la distribución del bosque permitió comparar la dinámica de la nieve en áreas forestadas y en claros del bosque, evaluando la influencia del dosel y los troncos en los patrones de acumulación y derretimiento de la nieve. Se realizaron mediciones en terrenos con diferentes grados de cobertura forestal para analizar las variaciones espacio-temporales del manto nival en función de la interacción entre la estructura del bosque y las condiciones meteorológicas locales.

Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos utilizados en este estudio incluyen precipitación, temperatura del aire y humedad relativa, obtenidos de la estación meteorológica Las Trancas (Figura 1), operada por la Dirección General de Aguas (DGA), con registros disponibles entre 1990 y 2023. Para extender la serie temporal y disponer de datos meteorológicos horarios en el período histórico, se emplearon datos de reanálisis ERA5-Land (<https://cds.climate.copernicus.eu>), con una resolución espacial de 9 km ($0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$) y temporal horaria (Hersbach et al., 2020; Muñoz-Sabater et al., 2021). Estas variables sirvieron como insumo para el modelo Cold Regions Hydrological Model (CRHM; Pomeroy et al., 2007, 2021), donde la precipitación y temperatura corregidas se integraron directamente en la simulación del manto nival en distintos escenarios topográficos y de cobertura del suelo.

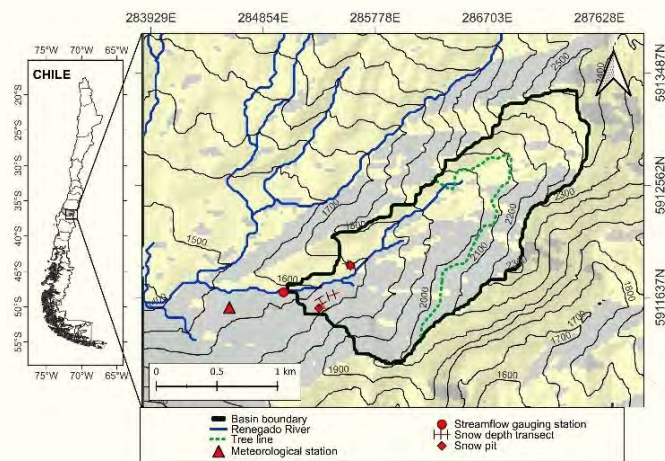


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio en la cabecera del Estero Renegado, mostrando la estación meteorológica, puntos de medición de profundidad y densidad de nieve, y gradientes altitudinales.

Monitoreo en terreno

Los datos sobre la densidad y profundidad de la nieve se recopilaban durante campañas de campo a lo largo de tres temporadas consecutivas (2022, 2023 y 2024), abarcando los periodos de acumulación y derretimiento entre mayo y noviembre. El intervalo de muestreo varió en función de las condiciones meteorológicas y de acceso al sector. Se establecieron cuatro puntos de monitoreo ubicados en claros de bosque y debajo del dosel forestal, considerando laderas con orientaciones norte y sur.

En 2022, las mediciones se centraron en la determinación de la densidad de la nieve mediante calicatas en claros de ambas laderas. Se evaluó en perfiles de 10 cm utilizando un cortador de densidad de 1 litro en forma de cuña. En 2024, con la incorporación de un tubo monterrosa, se amplió el muestreo de densidad de nieve para incluir tanto claros como áreas bajo el dosel forestal. La profundidad de la nieve se midió para todo el periodo de monitoreo utilizando una sonda de avalancha en transectos de 30 m con intervalos de 1,5 m. Estas mediciones permiten calcular el equivalente de agua de nieve (Dewalle & Rango, 2008)

Para capturar la variabilidad temporal, se instalaron estacas calibradas y cámaras time-lapse en sitios estratégicos representativos de claros y áreas bajo el dosel. Las cámaras se programaron para capturar imágenes cada 3 horas entre junio y noviembre, permitiendo el monitoreo diario de profundidad de nieve.

Para la caracterización del dosel, se estimó el índice de área foliar (IAF) a partir de fotografías digitales hemisféricas obtenidas con lentes de ojo de pez (Figura 2). Este método permite obtener mediciones sin requerir información previa sobre la distribución angular del follaje (Chianucci y Cutini, 2012). Estudios previos han validado el uso de imágenes hemisféricas para obtener mediciones precisas del IAF en entornos forestales (Brown et al., 2020; Arietta, 2021; Liu et al., 2021), lo que refuerza la fiabilidad de este enfoque.

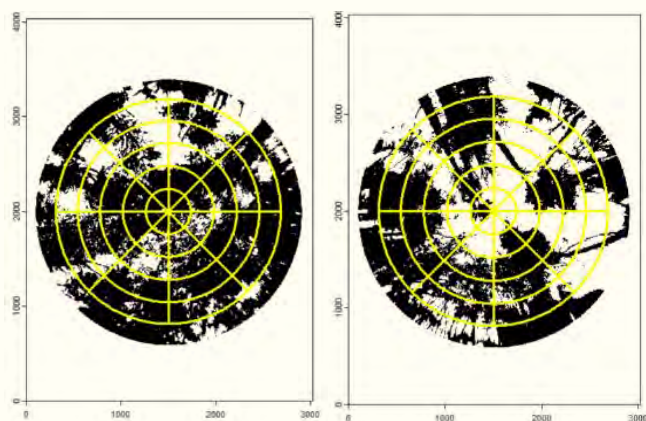


Figura 2. Imágenes hemisféricas para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) mediante el paquete HemispheR. Las zonas negras representan la cobertura del dosel, mientras que las blancas indican aberturas que permiten la transmisión de luz. (a) Ladera norte ($1,10 \text{ m}^2/\text{m}^2$), (b) Ladera sur ($0,68 \text{ m}^2/\text{m}^2$).

En cada ladera se capturaron imágenes verticales del dosel. Posteriormente, estas imágenes fueron procesadas utilizando el paquete 'HemispheR' (Chianucci y Macek, 2023) para obtener los valores de IAF en cada sitio. Los valores de IAF se promediaron por orientación, proporcionando una representación robusta de las condiciones del dosel en las diferentes zonas de medición.

Simulación del manto nival

El modelo Cold Regions Hydrological Model (CRHM) fue implementado en este estudio para simular los procesos de acumulación y ablación de nieve, evaluando los balances de masa y energía del manto nival. Este modelo hidrológico, basado en principios físicos y con una estructura modular, permite una representación flexible de los procesos clave en regiones montañosas, tales como la intercepción del dosel, la sublimación, la redistribución de nieve y el balance energético del manto nival (Pomeroy et al., 2007, 2022). CRHM ha sido aplicado en estudios previos para modelar cuencas de alta montaña y en regiones con condiciones climáticas similares a las del área de estudio (Krogh et al., 2015; Sanmiguel-Vallelado et al., 2022; Jara et al., 2021).

El modelo CRHM se aplicó en cada sitio de estudio, dividiendo el área en cuatro unidades de respuesta hidrológica (URH) en función de la cobertura del suelo: claros (O) y áreas bajo el dosel forestal (U) y la orientación de la ladera (norte y sur). La selección de los módulos de CRHM se basó en las características del área de estudio y en los datos meteorológicos disponibles (Figura 1). Los parámetros fueron ajustados específicamente para cada ladera, utilizando mediciones de campo o estimaciones basadas en otras áreas similares dominadas por la nieve, minimizando la calibración de parámetros asociados al modelo.

Las salidas de interés incluyen valores horarios del Equivalente de Agua de Nieve (EAN) para cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU) durante el período 1990–2023. Las series de EAN fueron generadas a partir del módulo SnobalCRHM (Marks et al., 1998). Posteriormente, las series horarias se transformaron en datos diarios, tomando el valor máximo diario para las series de EAN.

Análisis estadístico

Para evaluar la precisión del modelo, se calcularon tres métricas estadísticas ampliamente utilizadas en estudios hidrometeorológicos (Ellis et al., 2011): (i) el coeficiente de correlación (R^2), que mide la relación lineal entre los valores modelados y observados de EAN; (ii) el sesgo medio (MB), que cuantifica la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar la acumulación de nieve; y (iii) el error cuadrático medio (RMSE), que representa la magnitud promedio de los errores absolutos en la simulación del EAN.

A partir de la serie diaria de EAN del período histórico (1990-2023), se calcularon variables clave para caracterizar la evolución del manto nival. Estas variables permiten evaluar las diferencias en el EAN acumulado y su evolución temporal entre las áreas bajo dosel forestal (O) y en aberturas del bosque (U). La Tabla 1 resume los criterios utilizados para el análisis estadístico y las variables derivadas a partir de la serie de EAN.

Tabla 1. Criterios utilizados para el análisis estadístico y variables derivadas calculadas a partir de la serie EAN

Criterios para el análisis estadístico	Descripción
Día fin del manto	Última fecha con registro de nieve.
Duración de manto	Tiempo transcurrido entre las fechas de inicio y fin.
Peak EAN	Valor máximo de EAN alcanzado durante la temporada de nieve.
Tasa de fusión	Tasa a la que se reduce el EAN durante el período de derretimiento, expresada en mm día ⁻¹ .
Día 50% volumen de derretimiento	Día en el que se ha derretido el 50% del volumen total de EAN acumulado en la temporada.
Volumen de deshielo	Cantidad total de EAN perdida por derretimiento hasta la desaparición del manto nival.

RESULTADOS

Características de las temporadas de nieve

La Figura 3a muestra la evolución de la precipitación (barras azules) y temperatura del aire (línea roja) registrada en la estación Las Trancas. Se identificaron eventos de precipitación con intensidades horarias superiores a 10 mm/h, con mayor recurrencia entre junio y agosto. Asimismo, las temperaturas promedio fueron

inferiores a 0°C, alcanzando mínimos de -10°C en los meses invernales, condiciones que favorecieron la acumulación y persistencia del manto nival.

Los paneles Figura 3b y 3c muestran la evolución del Equivalente de Agua de Nieve (EAN) observado y la profundidad de nieve en las laderas norte (NF) y sur (SF), diferenciando entre áreas abiertas y bajo dosel. Entre las tres temporadas analizadas, 2024 presentó los valores máximos de acumulación, alcanzando 920 mm en áreas abiertas y 500 mm bajo el dosel en NF, mientras que en SF se registraron valores de 940 mm y 560 mm, respectivamente. En comparación, los valores máximos observados en 2022 y 2023 fueron en promedio un 15% inferiores. La diferencia relativa entre ambas condiciones de cobertura se mantuvo en un rango cercano al 30% en todas las temporadas, lo que sugiere una reducción de la acumulación de nieve en zonas bajo dosel, atribuida a la interceptación por la vegetación, seguida de su posterior sublimación. En contraste, en las zonas abiertas, donde la mayor parte de la nieve no es interceptada y alcanza directamente el suelo.

Las densidades medidas en campo oscilaron entre 200 y 600 kg/m³, con un promedio de 430 kg/m³ en NF y 410 kg/m³ en SF, reflejando la evolución natural estacional del manto nival y los procesos de densificación. En general, los valores más bajos se registraron en nevadas recientes, mientras que las densidades más altas se observaron hacia finales del invierno, asociadas a procesos de compactación y fusión-recongelamiento. Asimismo, la nieve bajo dosel presentó en general densidades mayores en comparación con las áreas abiertas, lo que sugiere una menor acumulación de nieve fresca y una mayor transformación del manto debido a la retención de calor bajo la cubierta forestal y enfriamiento nocturno.

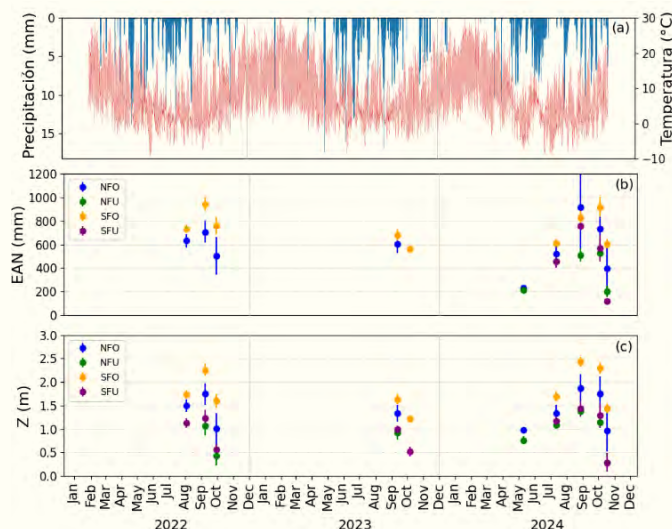


Figura 3. Evolución temporal de las condiciones meteorológicas y la acumulación de nieve en la cuenca de estudio durante las temporadas 2022-2024. **(a)** Registros horarios de precipitación (barras azules) y temperatura del aire (línea roja) en la estación Las Trancas. **(b)** Evolución del Equivalente de Agua de Nieve (EAN) en áreas abiertas y bajo dosel para ambas laderas. **(c)** Evolución de la profundidad del manto nival (Z) en áreas abiertas y bajo dosel. Los colores representan las distintas condiciones de cobertura: NFO (norte, claro), NFU (norte, bajo dosel), SFO (sur, claro) y SFU (sur, bajo dosel).

El análisis de la variabilidad interanual muestra que en 2024 la nieve permaneció en el suelo hasta inicios de noviembre, mientras que en 2022 y 2023 la fusión completa ocurrió a mediados de octubre. Esta mayor persistencia del manto nival en 2024 coincidió con temperaturas promedio invernales $1,5^{\circ}\text{C}$ más frías y una mayor frecuencia de eventos de precipitación en comparación con los años anteriores. Sin embargo, las temperaturas invernales más altas en 2023 redujeron la acumulación efectiva de nieve, ya que favorecieron episodios transitorios de fusión y compactación temprana del manto, disminuyendo así el SWE máximo alcanzado en comparación con 2022 y 2024.

Calibración - Validación modelo CRHM

El modelo CRHM fue calibrado y validado en un sitio de estudio a 1700 m s.n.m., considerando diferencias en la acumulación y ablación del manto nival en laderas de orientación norte y sur. Estas áreas presentan índices de área foliar (IAF) de $1,10 \text{ m}^2/\text{m}^2$ y $0,68 \text{ m}^2/\text{m}^2$, respectivamente, lo que indica una mayor densidad de dosel en la ladera con orientación norte. La validación del modelo se basó en datos recopilados durante tres

inviernos consecutivos (2022, 2023 y 2024). Los resultados muestran que el modelo logra reproducir razonablemente la variabilidad espacio-temporal del EAN y la profundidad del manto nival en las distintas condiciones de cobertura.

La Figura 4a muestra la comparación entre el EAN simulado y observado, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,54$ y un error cuadrático medio (RMSE) de 171 mm. Esto indica que el modelo captura aproximadamente el 54% de la variabilidad observada en la acumulación nival. Se observa que los puntos correspondientes a zonas bajo dosel (NFU y SFU) están mejor alineados con la línea 1:1, lo que sugiere que el modelo representa con mayor precisión la acumulación de nieve en estas condiciones. En contraste, los puntos en zonas abiertas (NFO y SFO) exhiben una mayor dispersión, especialmente en valores altos de EAN, lo que indica una posible sobrestimación de la acumulación en estas áreas. Además, la diferencia en los valores alcanzados entre áreas abiertas y bajo el dosel es consistente con la evolución temporal de la nieve observada en la Figura 3, donde el EAN bajo dosel es sistemáticamente menor.

La Figura 4b muestra la comparación entre la profundidad de nieve observada y simulada, donde el modelo presenta un mejor desempeño en comparación con el EAN, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,62$ y un RMSE de 0,48 m. Esto indica que la simulación representa mejor la variabilidad en la profundidad de nieve, con una menor dispersión en comparación con la estimación del EAN. Similar a lo observado en la simulación del EAN, el modelo representa con mayor precisión la profundidad de nieve en zonas bajo dosel (NFU y SFU), mientras que en áreas abiertas (NFO y SFO) se observa una mayor dispersión, lo que sugiere que el modelo tiende a sobrestimar la acumulación.

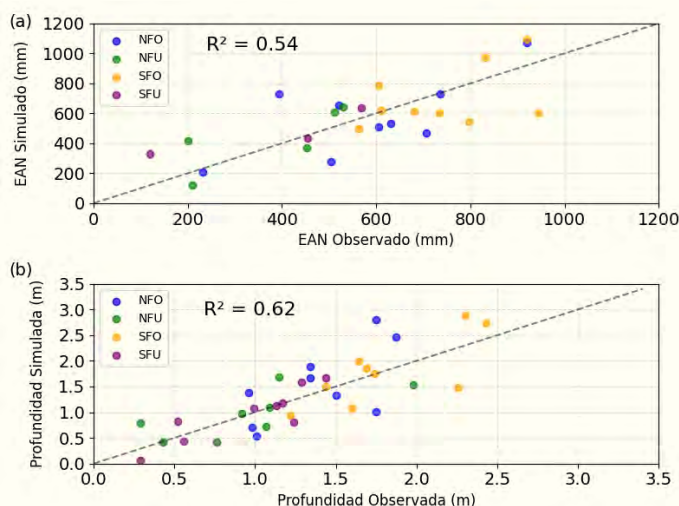


Figura 4. Comparación entre valores observados y simulados del manto nival mediante el modelo CRHM. (a) Relación entre el Equivalente de Agua de Nieve (EAN) observado y simulado. (b) Relación entre la profundidad de nieve observada y simulada. Los colores representan diferentes condiciones de cobertura del dosel: NFO (azul), NFU (verde), SFO (amarillo) y SFU (morado). La línea discontinua representa la línea 1:1, y el coeficiente de determinación (R^2) indica la precisión del ajuste del modelo.

En términos de orientación, los valores de R^2 muestran diferencias en la capacidad del modelo para representar la acumulación y profundidad de nieve en cada ladera. Para el EAN, la correlación fue similar entre la ladera con orientación norte ($R^2 = 0,54$) y la ladera con orientación sur ($R^2 = 0,52$), lo que indica que el modelo tiene un desempeño moderado en ambas orientaciones. En contraste, la profundidad de nieve fue mejor representada en la ladera con orientación sur ($R^2 = 0,73$), en comparación con la norte ($R^2 = 0,50$). Estos resultados indican que el desempeño del modelo varía según la orientación, mostrando un mejor ajuste para la acumulación en la ladera norte y una mejor representación de la profundidad en la ladera sur.

Características de las temporadas de nieve

En esta sección se analizan aspectos clave del manto nival en la zona de estudio, incluyendo la acumulación y el volumen de fusión, la duración del manto, la fecha de desaparición de la nieve, las tasas de fusión y el día en que el manto ha perdido el 50% de su volumen (ver Tabla 1). A partir del análisis interanual (1990-2023), se cuantifican las diferencias entre áreas abiertas y bajo dosel en laderas de orientación norte (NF) y sur (SF), considerando la influencia de la temperatura y la

precipitación en la acumulación y ablación de nieve. En promedio, la fracción de nieve respecto a la precipitación total anual en esta elevación fue del 40%, con alta variabilidad interanual.

La Figura 5 muestra la diferencia porcentual en el EAN máximo y el volumen de fusión entre zonas abiertas y bajo dosel para ambas laderas. Se observa una reducción en la acumulación de nieve en zonas bajo dosel del 28% en NF y 32% en SF, atribuida a la interceptación del dosel y su posterior sublimación. La sublimación total bajo el dosel representó una fracción significativa de la precipitación nival total, con valores de 30% en NF y 23% en SF, comparado con solo 7% en áreas abiertas. La diferencia en el volumen de fusión se sitúa en un rango del 35%, sin diferencias significativas entre NF y SF para una misma elevación.

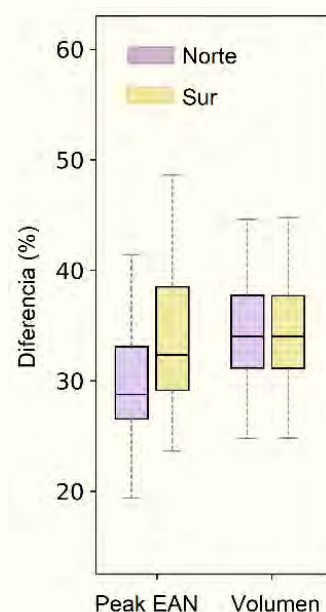


Figura 5. Diferencia porcentual en el Peak EAN y el volumen de fusión en 1700 msnm entre zonas abiertas y bajo dosel para las laderas norte (morado) y sur (amarillo).

La Figura 6 presenta un análisis detallado de la evolución del manto nival en función de la orientación y la cobertura forestal. El panel (a) muestra que la nieve en zonas abiertas persiste entre 5 y 7 días más que en áreas bajo el dosel, producto de la mayor acumulación de nieve. Además, la fecha de desaparición del manto en áreas boscosas exhibe mayor variabilidad, posiblemente debido a la atenuación de la radiación solar bajo el dosel.

En términos de duración de la cobertura nival (SCD, Figura 5b), las zonas abiertas presentan una mayor persistencia del manto, con valores promedio 200 días, mientras que en áreas bajo dosel se reduce a 190 días. La menor duración en la ladera norte sugiere un mayor efecto de la radiación solar en la fusión del manto.

El análisis de la tasa de fusión (panel c) muestra que la nieve se funde a una tasa de 10 mm/día en zonas abiertas, mientras que en áreas bajo dosel esta tasa es menor, 7 mm/día. Las tasas de fusión más altas en la ladera con orientación norte indican que las diferencias en exposición solar y temperatura juegan un rol clave en la tasa de reducción del manto nival. Finalmente, el panel (d) indica que el día en que se alcanza el 50% en su derretimiento se alcanza 4 días antes en zonas abiertas.

La Figura 7 presenta los resultados de una regresión múltiple lineal utilizada para evaluar la influencia de la precipitación y la temperatura en la diferencia del Equivalente de Agua de Nieve (EAN) máximo entre zonas bajo dosel y áreas abiertas. El modelo busca cuantificar cómo las condiciones climáticas modulan la acumulación diferencial de nieve en función de la cobertura forestal.

En la Figura 7 los puntos representan los datos observados, mientras que el plano coloreado ilustra el ajuste del modelo de regresión. Se observa que la diferencia en el EAN máximo entre áreas abiertas y bajo dosel aumenta con la precipitación y disminuye con el incremento de la temperatura. El ajuste del modelo muestra una relación estadísticamente significativa, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,86$, lo que indica que el 86% de la variabilidad en la diferencia de acumulación de nieve es explicada por estos dos factores.

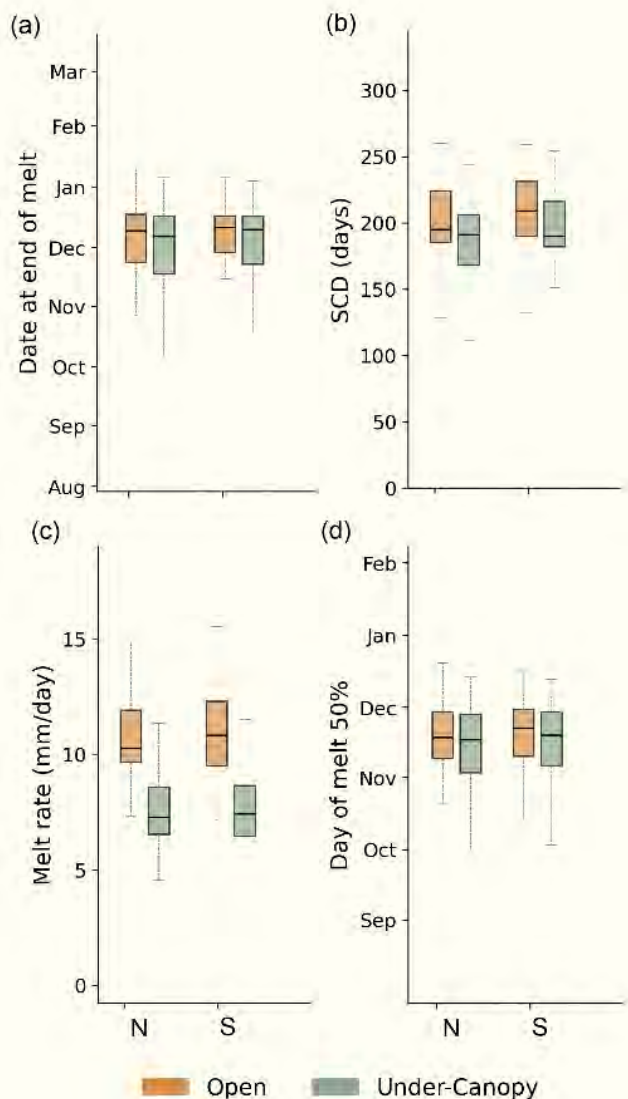


Figura 6. Comparación de la evolución del manto nival entre laderas con orientación norte (N) y sur (S) a 1700 msnm, diferenciando entre zonas abiertas (naranja) y bajo dosel (verde). (a) Fecha de desaparición de la nieve (b) Duración de la cobertura nival (SCD). (c) Tasa de fusión (d) Día en que se alcanza el 50% de la fusión

Los resultados cuantitativos de la regresión muestran que años más secos (β : 0,14 mm/mm) y más cálidos (β : -61,8 mm/°C) reducen el efecto del dosel en el EAN máximo. Es decir, por cada incremento de 100 mm en la precipitación anual, observamos un aumento de 14 mm en la diferencia del peak de EAN entre las zonas bajo el dosel y las áreas abiertas. Además, una disminución de 1,6°C en la temperatura está asociada con un aumento de 100 mm en la misma diferencia de SWE. Esto indica que tanto mayores precipitaciones como temperaturas más

bajas contribuyen a una mayor acumulación de nieve en áreas abiertas en comparación con las que están bajo el dosel.

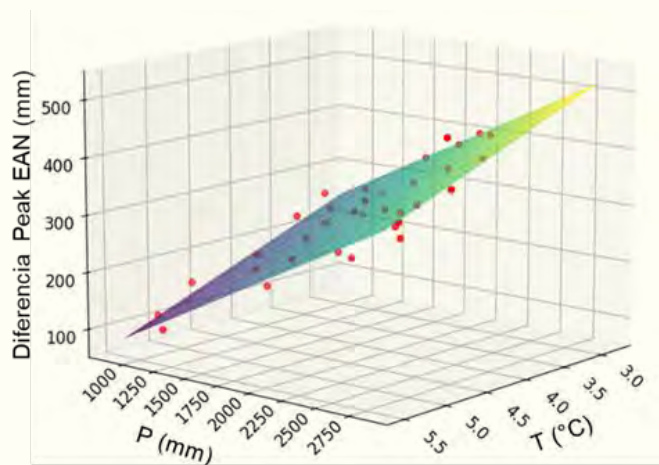


Figura 7. Relación entre la precipitación anual (P) y la temperatura media anual (T) con la diferencia en el Equivalente de Agua de Nieve (EAN) máximo entre áreas abiertas y bajo dosel.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio confirman la influencia significativa de la estructura del dosel forestal en la acumulación y ablación de la nieve en la zona centro-sur de Chile, y su relación con la orientación de las laderas y la variabilidad interanual característica de esta zona. Se observó que, en promedio, la acumulación de nieve bajo el dosel fue un 30% menor en comparación con áreas abiertas, con una mayor reducción en la ladera sur. Esto, se contrasta con el 23% encontrado por Huerta et al., para los años 2015-2017 durante la llamada “megasequía”. Esta diferencia se puede explicar, en parte, por la relación presentada en la Figura 7, en donde para años con menor precipitación, el impacto de la vegetación en la acumulación nival tiende a disminuir. La menor acumulación bajo el dosel vegetal se debe principalmente a la interceptación de nieve por la vegetación y su posterior sublimación, la cual representó en promedio el 27% de la nieve precipitada en estas áreas. Esto implica una menor disponibilidad de agua para el derretimiento primaveral, afectando los caudales de deshielo y, por ende, la disponibilidad hídrica de la cuenca.

La reducción en la acumulación de nieve bajo el dosel observada en este estudio es consistente con

investigaciones previas en bosques de coníferas en el hemisferio norte, donde la interceptación y sublimación de la nieve conducen a pérdidas significativas de EAN (Harpold & Molotch, 2015a; Musselman et al., 2012; Zheng et al., 2016). Sin embargo, la diferencia en la acumulación entre zonas abiertas y bajo dosel en este estudio fue entre 20 y 30 puntos porcentuales menor que la reportada en bosques perennifolios (Clark et al., 2011; Lundquist et al., 2013; Lv & Pomeroy, 2020; Safa et al., 2021). Esto sugiere que la fenología de los bosques caducifolios atenúa el impacto del dosel en la acumulación de nieve, ya que la pérdida de hojas en invierno reduce la cantidad de nieve interceptada, en contraste con los bosques de coníferas, donde el dosel permanece presente durante todo el año.

La persistencia del manto nival en zonas abiertas, observada en este estudio, coincide con investigaciones previas en regiones de montaña donde la dinámica nival está controlada principalmente por la radiación solar (Ellis et al., 2011; Musselman et al., 2015; Pomeroy et al., 2009). La mayor duración del manto en zonas abiertas sugiere que la atenuación de la radiación solar bajo el dosel, junto con la emisión de radiación de onda larga desde la vegetación, acelera la fusión en bosques caducifolios (Lundquist et al., 2013; Dickerson-Lange et al., 2017). Adicionalmente, se observó que las tasas de fusión en la ladera norte fueron un 30% mayores que en la ladera sur, lo que evidencia la influencia de la exposición solar y del balance energético en la dinámica del manto nival.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones relevantes para la planificación y futura gestión de los recursos hídricos en cuencas cordilleranas. Proyecciones climáticas indican un aumento de temperaturas, una mayor variabilidad climática y una reducción en la precipitación invernal (Orrego et al., 2016; Pinto, 2019; Prudhomme et al., 2014). Estos cambios afectarán la acumulación nival al elevar la línea de nieve y la proporción de precipitación que cae en forma sólida (Demaria et al., 2013). En escenarios de menor acumulación y temperaturas más cálidas, la diferencia en la acumulación de nieve entre zonas abiertas y bajo dosel tendería a reducirse. Esto se debe a que la menor cantidad de nieve caída disminuye la interceptación por el dosel y, en consecuencia, la sublimación. Como consecuencia, se podría esperar una disminución en el

volumen de escorrentía primaveral y un adelantamiento de la escorrentía del deshielo, lo que afectará directamente la disponibilidad de agua y la manera en que esta es gestionada.

A pesar de los avances en la caracterización del manto nival con presencia de bosques caducifolios, este estudio presenta limitaciones. La escasez de estaciones meteorológicas en la zona de estudio restringe la resolución espacial de los datos climáticos, introduciendo incertidumbre en la simulación del manto nival, especialmente en eventos extremos de precipitación y temperatura. El modelo CRHM asume un IAF constante, lo que impide representar la variabilidad estacional de la cobertura foliar en bosques caducifolios, lo cual es particularmente importante durante la primavera. Como la intercepción de nieve y la absorción de radiación varían con la fenología del bosque, un IAF fijo podría subestimar la acumulación de nieve y sobrestimar su fusión. La incorporación de un IAF dinámico en futuras modelaciones permitiría mejorar la representación del balance de energía del manto nival. Se requieren más observaciones y avances en la estructura de los modelos de intercepción de nieve para mejorar las estimaciones de acumulación y derretimiento en bosque caducifolios.

CONCLUSIONES

Cuantificar y comprender la variabilidad hidrológica en cuencas nivo-pluviales de la zona centro-sur de Chile es un desafío debido a la interacción entre la cobertura forestal, la topografía y las condiciones meteorológicas, que influyen directamente en la acumulación y fusión de la nieve. Este estudio proporciona información clave sobre estos procesos en regiones mediterráneas, particularmente en cuencas con escasa instrumentación.

Los resultados obtenidos son fundamentales para mejorar la representación de la dinámica nival en los modelos hidrológicos parametrizados para regiones mediterráneas con bosques caducifolios. En el centro-sur de Chile, donde el deshielo regula la disponibilidad hídrica estacional, comprender la variabilidad del manto nival permitirá una gestión más eficiente de los recursos hídricos, anticipando cambios en la oferta de agua y fortalecer la planificación hídrica en sectores sensibles

como el suministro de agua potable, la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica.

Para fortalecer la gestión de los recursos hídricos en la región, es esencial mejorar la representación de procesos en los modelos hidrológicos. La incorporación de mediciones más detalladas y la integración de un índice de área foliar dinámico permitirían una mejor caracterización de la acumulación y ablación nival, reduciendo la incertidumbre en la simulación del manto de nieve. Esto facilitaría predicciones más precisas sobre la respuesta hidrológica de las cuencas ante escenarios de cambio climático.

REFERENCIAS

- Cebulski, A. C., & Pomeroy, J. W. (2025). Theoretical Underpinnings of Snow Interception and Canopy Snow Ablation Parameterisations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 12(1), e70010.
- Chianucci, F., & Macek, M. (2023). hemispher: an R package for fisheye canopy image analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 336, 109470. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109470>.
- Chaponnière, A., Maisongrande, P., Duchemin, B., Hanich, L., Boulet, G., Escadafal, R., & Elouaddat, S. (2007). A combined high and low spatial resolution approach for mapping snow covered areas in the Atlas mountains. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/01431160500117758*, 26(13), 2755–2777. <https://doi.org/10.1080/01431160500117758>
- Clark, M. P., Hendrikx, J., Slater, A. G., Kavetski, D., Anderson, B., Cullen, N. J., Kerr, T., Örn Hreinsson, E., Woods, R. A., Hendrikx, J., Slater, A. G., Kavetski, D., Anderson, B., Cullen, N. J., Kerr, T., Hreinsson, m, & Woods, R. A. (2011). Representing spatial variability of snow water equivalent in hydrologic and land-surface models: A review. *Water Resources Research*, 47(7), 7539. <https://doi.org/10.1029/2011WR010745>
- Demaria, E. M. C., Maurer, E. P., Thrasher, B., Vicuña, S., & Meza, F. J. (2013). Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? *Journal of Hydrology*, 502, 128–138. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.08.027>
- Dickerson-Lange, S. E., Gersonde, R. F., Hubbart, J. A., Link, T. E., Nolin, A. W., Perry, G. H., ... & Lundquist, J. D. (2017). Snow disappearance timing is dominated by forest effects on snow accumulation in warm winter climates of the Pacific Northwest, United States. *Hydrological Processes*, 31(10), 1846–1862.
- Ellis, C. R., Pomeroy, J. W., Brown, T., & Macdonald, J. (2010). Hydrology and Earth System Sciences Simulation of snow accumulation and melt in needleleaf forest

- environments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 925–940. <https://doi.org/10.5194/hess-14-925-2010>
- Fayad, A., & Gascoin, S. (2020). The role of liquid water percolation representation in estimating snow water equivalent in a Mediterranean mountain region (Mount Lebanon). *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1527–1542. <https://doi.org/10.5194/HESS-24-1527-2020>
- Hedstrom, N. R., & Pomeroy, J. W. (1998). Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest. *Hydrological Processes*, 12(10-11), 1611-1625.
- Huerta, M. L., Molotch, N. P., & McPhee, J. (2019). Snowfall interception in a deciduous *Nothofagus* forest and implications for spatial snowpack distribution. *Hydrological Processes*, 33(13), 1818–1834. <https://doi.org/10.1002/hyp.13439>
- Jara, F., Lagos-Zúñiga, M., Fuster, R., Mattar, C., & McPhee, J. (2021). Snow processes and climate sensitivity in an Arid Mountain Region, Northern Chile. *Atmosphere*, 12(4), 520. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12040520/S1>
- Krogh, S. A., Pomeroy, J. W., & McPhee, J. (2015). Physically based mountain hydrological modeling using reanalysis data in Patagonia. *Journal of Hydrometeorology*, 16(1), 172-193.
- López-Moreno, J. I., & Latron, J. (2008). Influence of canopy density on snow distribution in a temperate mountain range. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(1), 117-126.
- López-Moreno, J. I., & Stähli, M. (2008). Statistical analysis of the snow cover variability in a subalpine watershed: Assessing the role of topography and forest interactions. *Journal of Hydrology*, 348(3-4), 379-394.
- Lundquist, J. D., Dickerson-Lange, S. E., Lutz, J. A., & Cristea, N. C. (2013). Lower forest density enhances snow retention in regions with warmer winters: A global framework developed from plot-scale observations and modeling: Forests and snow retention. *Water Resources Research*, 49(10), 6356–6370. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20504>
- Lv, Z., & Pomeroy, J. W. (2020). Assimilating snow observations to snow interception process simulations. *Hydrological Processes*, 34(10), 2229–2246. <https://doi.org/10.1002/HYP.13720>
- Mote, P. W., Hamlet, A. F., Clark, M. P., & Lettenmaier, D. P. (2005). Declining mountain snowpack in western north america*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(1), 39–50. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-1-39>
- Musselman, K. N., Molotch, N. P., Margulis, S. A., Kirchner, P. B., & Bales, R. C. (2012). Influence of canopy structure and direct beam solar irradiance on snowmelt rates in a mixed conifer forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 161, 46–56. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2012.03.011>
- Musselman, K. N., Pomeroy, J. W., & Link, T. E. (2015). Variability in shortwave irradiance caused by forest gaps: Measurements, modelling, and implications for snow energetics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207, 69–82. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2015.03.014>
- Ouatiki, H., Boudhar, A., Tramblay, Y., Jarlan, L., Benabdelouhab, T., Hanich, L., El Meslouhi, M. R., & Chehbouni, A. (2017). Evaluation of TRMM 3B42 V7 Rainfall Product over the Oum Er Rbia Watershed in Morocco. *Climate* 2017, Vol. 5, Page 1, 5(1), 1. <https://doi.org/10.3390/CLI5010001>
- Orrego, R., Abarca-del-Río, R., Ávila, A., & Morales, L. (2016). Enhanced mesoscale climate projections in TAR and AR5 IPCC scenarios: a case study in a Mediterranean climate (Araucanía Region, south central Chile). *SpringerPlus*, 5(1), 1–23. <https://doi.org/10.1186/S40064-016-3157-6/FIGURES/12>
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Hedstrom, N. R., & Janowicz, J. R. (2002). Prediction of seasonal snow accumulation in cold climate forests. *Hydrological Processes*, 16(18), 3543-3558.
- Pomeroy, J. W., Marks, D., Link, T., Ellis, C., Hardy, J., Rowlands, A., & Granger, R. (2009). The impact of coniferous forest temperature on incoming longwave radiation to melting snow. *Hydrological Processes*, 23(17), 2513–2525. <https://doi.org/10.1002/hyp.7325>
- Pomeroy, J. W., Brown, T., Fang, X., Shook, K. R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S. A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z., Companizare, M., & Lopez Moreno, J. I. (2022). The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding. *Journal of Hydrology*, 615, 128711. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.128711>
- Prudhomme, C., Giuntoli, I., Robinson, E. L., Clark, D. B., Arnell, N. W., Dankers, R., Fekete, B. M., Franssen, W., Gerten, D., Gosling, S. N., Hagemann, S., Hannah, D. M., Kim, H., Masaki, Y., Satoh, Y., Stacke, T., Wada, Y., & Wisser, D. (2014). Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3262–3267. https://doi.org/10.1073/PNAS.1222473110/SUPPL_FILE/PNAS.201222473SI.PDF
- Revuelto, J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., & Vicente-Serrano, S. M. (2015). Canopy influence on snow depth distribution in a pine stand determined from terrestrial laser data. *Water Resources Research*, 51(5), 3476–3489. <https://doi.org/10.1002/2014WR016496>
- Sanmiguel-Valladolid, A., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., Alonso-González, E., Navarro-Serrano, F. M., Rico, I., & Camarero, J. J. (2020). Variable effects of forest canopies on snow processes in a valley of the central Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, 34(10), 2247-2262.
- Sanmiguel-Valladolid, A., McPhee, J., Esmeralda Ojeda Carreño, P., Morán-Tejeda, E., Julio Camarero, J., & López-Moreno, J. I. (2022). Sensitivity of forest–snow interactions to

climate forcing: Local variability in a Pyrenean valley. *Journal of Hydrology*, 605. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.127311>

Safa, H., Krogh, S. A., Greenberg, J., Kostadinov, T. S., & Harpold, A. A. (2021). Unraveling the Controls on Snow Disappearance in Montane Conifer Forests Using Multi-Site Lidar. *Water Resources Research*, 57(12), e2020WR027522. <https://doi.org/10.1029/2020WR027522>

Sicart, J. E., Pomeroy, J. W., Essery, R. L. H., & Bewley, D. (2006). Incoming longwave radiation to melting snow: observations, sensitivity and estimation in Northern environments. *Hydrological Processes*, 20(17), 3697–3708. <https://doi.org/10.1002/HYP.6383>

Varhola, A., Coops, N. C., Weiler, M., & Moore, R. D. (2010). Forest canopy effects on snow accumulation and ablation: An integrative review of empirical results. *Journal of Hydrology*, 392(3–4), 219–233. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.08.009>

Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., Cepeda, J., Vicuña, S., Vargas, X., Gómez, · T, Vásquez, · N, Cepeda, · J, Boisier, J. P., & Mendoza, P. A. (2021). Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile. *World Water Resources*, 8, 347–363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_19

Vieira, G., Mora, C., & Faleh, A. (2017). New observations indicate the possible presence of permafrost in North Africa (Djebel Toubkal, High Atlas, Morocco). *Cryosphere*, 11(4), 1691–1705. <https://doi.org/10.5194/TC-11-1691-2017>

Zheng, Z., Kirchner, P. B., & Bales, R. C. (2016). Topographic and vegetation effects on snow accumulation in the southern Sierra Nevada: A statistical summary from lidar data. *Cryosphere*, 10(1), 257–269. <https://doi.org/10.5194/TC-10-257-2016>

ANTIBIÓTICOS EN CHILE: INGRESO AL CICLO DEL AGUA Y LOS POTENCIALES EFECTOS EN EL MEDIOAMBIENTE

Josefina Burgos¹, Ana María Leiva¹, María Cristina Martínez², y Gladys Vidal¹

ANTIBIOTICS IN CHILE: MOVILIZATION THROUGH THE WATER CYCLE AND POTENTIAL EFFECTS ON THE ENVIRONMENT

RESUMEN

En este documento se muestra el aumento del uso de antibióticos en Chile, su ingreso al ciclo del agua y los potenciales efectos en el medioambiente. A nivel nacional, el problema de sobreconsumo de antibióticos se ve reflejado principalmente en el área de la salud y sector productivo (tanto terrestre como acuícola). Específicamente, los antibióticos que ingieren los seres humanos y los animales llegan a los intestinos, se excretan y luego llegan a las plantas de tratamiento de aguas servidas directamente a los ecosistemas acuáticos superficiales o subterráneos, entrando de este modo al ciclo del agua completo. Uno de los efectos que genera el uso excesivo de antibióticos es la resistencia a antimicrobianos (RAM) y constituye una de las mayores amenazas para la salud pública, seguridad alimentaria y desarrollo humano en el planeta según estudios de la Organización Mundial de la Salud (OMS). A pesar de que la RAM es un problema que se aborda más bien desde la perspectiva de la salud pública, se propone enfocar los esfuerzos en encontrar soluciones desde una mirada interdisciplinaria efectiva. De manera tal, que tanto el sector productivo, farmacéutico y clínico como también políticas públicas estén alineadas en disminuir las causas que producen los efectos de la diseminación de antibióticos en los ecosistemas. La estrategia fundamental es controlar el origen y el consumo de antibióticos en el área acuícola, ganadera y clínica. Asimismo, se debe invertir en difusión a todos los niveles, de los efectos del sobreconsumo de antibióticos, tanto en la salud humana como animal y monitoreo a ecosistemas de conservación que se requiera promover alta biodiversidad.

Abstract

In this document the increasing use of antibiotics in Chile, their entry into the water cycle, and the potential effect on the environment is presented. At the national level, the problem of antibiotic overconsumption is primarily reflected in the health and productive sectors (both terrestrial and aquaculture). One of the effects generated by the excessive use of antibiotics is antimicrobial resistance (AMR), which constitutes one of the greatest threats to public health, food security, and human development on the planet, according to studies by the World Health Organization (WHO). Although AMR is a problem that is addressed primarily from a public health perspective, efforts should be focused on finding solutions from an effective interdisciplinary perspective. This means that the productive, pharmaceutical, and clinical sectors, as well as public policies, are aligned to reduce the causes that produce the effects of antibiotic dissemination in ecosystems. The fundamental strategy is to control the origin and consumption of antibiotics in aquaculture, livestock, and clinical settings. Investment is also needed to disseminate information at all levels about the effects of antibiotic overconsumption on both human and animal health, and to monitor conservation ecosystems that need to promote high biodiversity.

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

² Sección Microbiología Alimentos y Ambiente, Departamento Nacional y de Referencia en Salud Ambiental, Instituto de Salud Pública de Chile, Santiago, Chile.

1. INTRODUCCION

1.1 Problemática de la resistencia a antimicrobianos

Actualmente, la resistencia a antimicrobianos (RAM) es un problema que afecta a la población mundial y que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) es una de las mayores amenazas para la salud pública, seguridad alimentaria y desarrollo humano en el planeta (Zhong et al., 2022). En concreto, la RAM representa actualmente más de 7 millones de muertes al año y alcanzará alrededor de 10 millones en el año 2050 (Yadav and Kapley, 2021). Puntualmente, la RAM ha tenido un aumento acelerado debido al consumo excesivo de antibióticos, en condiciones infecciosas como el COVID-19, la cual provocó que la ingesta de antibióticos durante la pandemia se elevara a 71,9% en todo el mundo (Akram et al., 2023). La RAM, debido a antibióticos, se produce naturalmente a través de cambios genéticos. Sin embargo, la sobreexplotación de estos en la medicina, en la producción de proteínas cárnicas en el sector agropecuario y acuícola y la industria alimentaria está acelerando este proceso (Yadav and Kapley, 2021).

La RAM ocurre cuando los microorganismos, ya sean bacterias, hongos, parásitos o virus, se exponen a la presencia de uno o más antibióticos. Debido a la presión que esto genera, por un lado, se inhibe el crecimiento de microorganismos susceptibles, mientras que, por el otro, se seleccionan los naturalmente resistentes o que han adquirido esta resistencia (Aslam et al., 2018). Por otra parte, esta resistencia se puede producir de forma natural, inducida o adquirida. La primera ocurre de forma intrínseca, es decir, que los genes que producen la resistencia se expresan constantemente. La resistencia inducida ocurre cuando la bacteria, al verse expuesta a un medio con antibióticos (por ejemplo), es capaz de expresar genes de resistencia y hacer frente al medicamento. Esta es la razón por la cual los tratamientos con medicamentos y específicamente, antibióticos cambian dependiendo de la bacteria que produce la enfermedad (Reygaert, 2018). La

resistencia adquirida es seguramente la más peligrosa, pues es la que ha causado un problema de salud pública conocido a nivel mundial producto de la dificultad que ocasiona a la hora de tratar enfermedades provocadas por bacterias.

El mecanismo que utilizan las bacterias para adquirir los genes de resistencia que le otorgan esta característica se produce mediante la transferencia horizontal de genes que se da a través de 3 mecanismos principales: transformación, transducción y conjugación (Reygaert, 2018). La transformación se produce cuando la bacteria acepta material genético que existe en el ambiente; la transducción se da a través de un virus que transfiere material genético de una bacteria a otra y, por último, la conjugación se produce a través del contacto físico entre una bacteria donante que le transfiere el material genético a otra receptora (Soucy et al., 2015).

1.2 ¿Qué son los antibióticos y cuáles son sus mecanismos de acción?

Los antibióticos son medicamentos que se producen de forma biológica o sintética. Se dice que tienen un origen biológico cuando son producidos por microorganismos y sintéticos cuando son fabricado de manera industrial (Etebu and Arikekpar, 2016). Estos medicamentos fueron una revolución en el campo de la medicina y la salud de las personas, ya que antes de ellos muchos de los tratamientos contra bacterias eran peligrosos o generaban efectos tóxicos secundarios. Por ejemplo, el caso de la sífilis, enfermedad que previo al descubrimiento de la penicilina, era tratada en base a sales de mercurio inorgánicas, lo cual además de ser poco efectivo, causa efectos secundarios nocivos para la salud debido a la toxicidad del mercurio (Aminov, 2010). La alta efectividad de los antibióticos los volvió tan populares que rápidamente se extendieron alrededor del mundo, alcanzando una época dorada que finalmente acabaría con un uso excesivo y desmedido de estos fármacos, dando paso a la ya mencionada problemática de RAM (Zhong et al., 2022).

Los antibióticos se pueden clasificar en base al mecanismo de acción que poseen para combatir bacterias. En la Figura 1 se observa una

clasificación de los antibióticos, de acuerdo con el mecanismo de acción con que actúan sobre las distintas estructuras bacterianas.

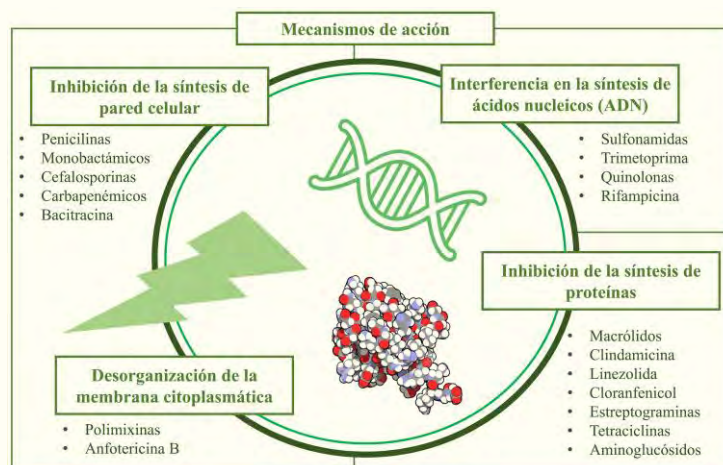


Figura 1. Principales mecanismos de acción de antibióticos sobre bacterias.

Inhibición de la síntesis de pared celular

La pared celular asegura la vida de la bacteria, por tanto, al inhibir su síntesis, la presión que ejerce el medio sobre la célula provocará que termine estallando. Diferentes antibióticos pueden actuar en distintos momentos del desarrollo de la pared celular; durante la etapa citoplasmática, momento en que se sintetizan los elementos de la pared; en el transporte de estos elementos a través de la membrana; y durante la organización de la pared (Calvo and Martinez, 2009). Fármacos como las penicilinas, carbapenémicos y cefalosporinas pueden bloquear la unión de elementos que componen la pared celular inhibiendo la formación de enlaces (Etebu and Arikekpar, 2016).

Desorganización de la membrana citoplasmática

Los antibióticos que causan una desorganización en la membrana son las polimixinas, el cual tiene la capacidad de actuar como detergente catiónico, es decir, que por su estructura química y por las cargas que posee es capaz de enlazarse a la membrana y desorganizar la estructura. Las bacterias gramnegativas son más sensibles a este antibiótico por el tipo de pared que poseen (Calvo and Martinez, 2009).

Interferencia en la síntesis de ADN

El ADN es uno de los elementos más importantes en la vida de cualquier organismo, a partir de él se sintetizan todos los elementos necesarios para mantener el orden y funcionamiento del sistema. Algunos antibióticos son capaces de interferir con la síntesis de ADN o bloquear su replicación como es el caso de las quinolonas, las cuales inhiben una enzima llamada ADN girasa, la cual mantiene la estabilidad de la molécula de ADN. Sin esta molécula la bacteria detendrá todas sus funciones y finalmente perecerá (Kapoor et al., 2017).

Inhibición de la síntesis de proteínas

Las proteínas están ligadas a múltiples procesos metabólicos y químicos en las células bacterianas. Estas son sintetizadas a través del ribosoma bacteriano, el cual a su vez está compuesto por 2 subunidades llamadas 30S y 50S. Los antibióticos que afectan la producción de proteínas se enlazan a alguna de estas subunidades impidiendo el funcionamiento de estas. Los antibióticos macrólidos, por ejemplo, atacan la etapa inicial de la síntesis de proteínas, produciendo cadenas prematuras e incompletas que no realizarán sus funciones correctamente (Kapoor et al., 2017).

1.3 Fuentes de contaminación en los ecosistemas

Dado que la diseminación de antibióticos es perjudicial para la salud humana y los ecosistemas, abordar su presencia debe considerarse como una prioridad absoluta, ya que provoca RAM y hace que el tratamiento contra cualquier infección sea ineficaz. Por tanto, encontrar la fuente de contaminación ayudaría a prevenir la entrada de los antibióticos en los humanos o en cualquier sistema vivo (Samrot et al., 2023).

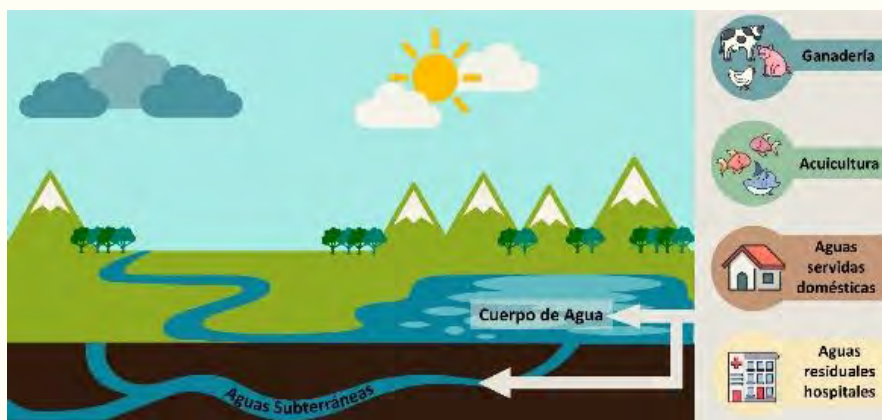


Figura 2. Ingreso de la contaminación asociadas al uso de antibióticos en el ciclo del agua.

De esta manera, los antibióticos ingresan a los cuerpos de agua a causa de un tratamiento inadecuado o una eliminación incorrecta por parte de los usuarios. En específico, los antibióticos que ingieren los seres humanos y los animales llegan a los intestinos, se excretan y luego llegan a las plantas de tratamiento de aguas servidas y directamente a los ecosistemas acuáticos superficiales o subterráneos (Iwu et al., 2020). Esto debido a que estos medicamentos no se metabolizan por completo en el organismo al ser ingeridos, provocando salida de ellos a través de la orina, y quedando retenidos en las aguas servidas que finalmente llegarán a las plantas de tratamiento (Zhong et al., 2022).

2. Situación del uso de antibióticos en Chile

A nivel nacional, el problema de sobreconsumo de antibióticos se ve reflejado principalmente en el área de la salud y sector productivo. En ambos

En la Figura 2 se muestran las principales fuentes que están asociadas al uso excesivo de antibióticos, dentro de estas se encuentran la acuicultura, la ganadería y las aguas servidas domésticas y provenientes de recintos hospitalarios (Singer et al., 2016). De esta manera, los cuerpos de agua como ríos, lagos aguas subterráneas y océanos son susceptibles a la descarga de antibióticos provenientes de dichas fuentes, es decir una circulación completa en el ciclo del agua.

casos, el uso indiscriminado de estos medicamentos contribuirá a la problemática de RAM y diseminación al medioambiente.

2.1 Sector farmacéutico y clínico

En lo que respecta al sector farmacéutico y clínico, una de las causas más relevantes en el sobreconsumo de antibióticos, es la desinformación y/o falta de conocimiento que tiene la población sobre el problema de RAM. Un estudio realizado por Pérez et al. (2022), donde se encuestaron 300 personas adultas en Santiago de Chile reveló que, sólo el 51% había escuchado el término RAM y sólo el 33% conocía la definición correcta. Este estudio demuestra que la información que maneja la población es deficiente y, por tanto, podría estar acrecentando la problemática de RAM en el país, pues esto conlleva además a malas prácticas en el cuidado de la salud, como la automedicación y el uso de estos sin prescripción médica.

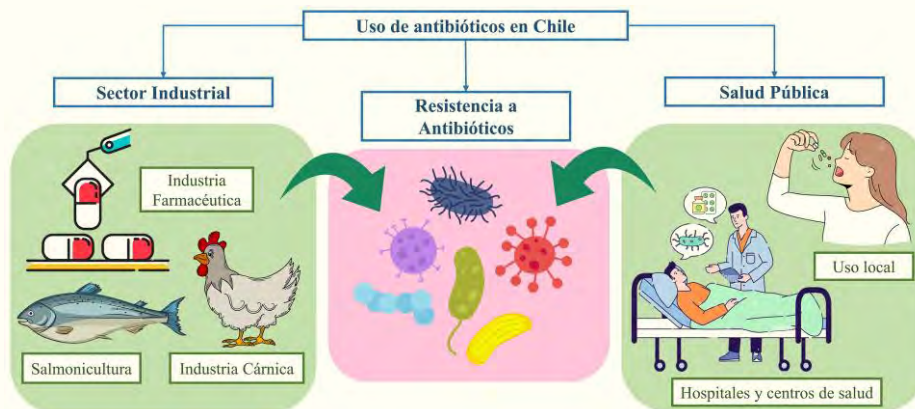


Figura 3. Uso de antibióticos en Chile e incidencia sobre problemática de resistencia a antimicrobianos (RAM)

Dicho sobreconsumo se ve reflejado en la cantidad de ventas de antibióticos en el país. En la Figura 4 se presenta en detalle la venta de cajas de antibióticos entre los años 2019 y 2023 en Chile.

El tipo de antibiótico más consumido es la amoxicilina, el cual tuvo un total de venta de 15.915.205 de cajas entre los años 2019 – 2023. En segundo lugar, se encuentra la ciprofloxacina con

un total de venta de 8.547.894 de cajas en el mismo período. Le sigue la azitromicina con 7.704.674 cajas vendidas, cefadroxilo con 5.995.153 de cajas y en último lugar la amoxicilina + ácido clavulánico con 3.768.091 de cajas vendidas. Por otra parte, el consumo de AB ha aumentado a lo largo de los años, exceptuando el año 2023, el cual posee datos únicamente entre enero y agosto.

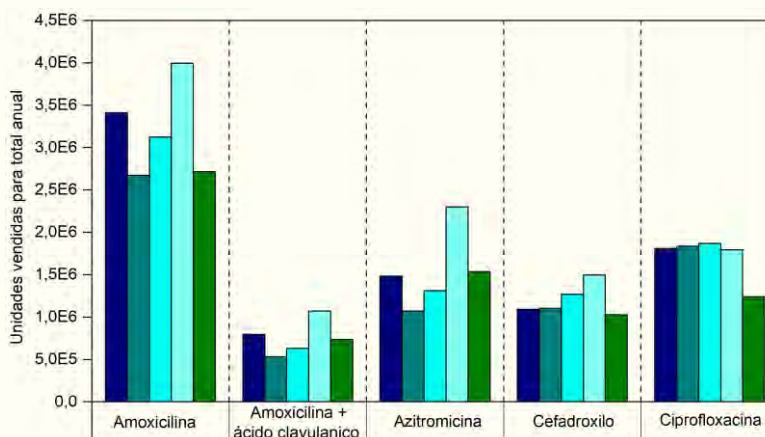


Figura 4. Cajas de antibióticos vendidas entre los años 2019 - 2023 por las tres principales cadenas de farmacias y venta indirecta de farmacias independientes. Para el año 2023 se consideran las ventas entre enero y agosto según disponibilidad de datos. Los datos se presentan por año donde ■ 2019, ■ 2020, ■ 2021, ■ 2022 y ■ 2023. (Autoría propia)

Este aumento podría estar relacionado a la pandemia por COVID – 19, en donde, erróneamente, se dio en un aumento en el consumo de antibióticos para combatir esta enfermedad provocada por la desinformación sobre el uso de

antibióticos (Arshad et al., 2020). Otra teoría está dirigida a la deficiencia del sistema inmune general de la población producto del aislamiento social ocurrido también durante la pandemia (dos Santos, 2020).

Es un hecho que la RAM es un problema que tiene evidencia empírica hoy en día a nivel nacional, bacterias. Meriño et al. (2021) realizó una investigación en el Hospital Comunitario de Bulnes (Región de Ñuble) sobre infecciones del tracto urinario y sus tratamientos basados en antibióticos. Los resultados arrojaron que la bacteria más frecuente fue *Escherichia coli* la cual presentó un alto porcentaje de resistencia a ampicilina y ciprofloxacino, siendo este último uno de los más vendidos a nivel nacional como se observa en la Figura 4. Además, de 83 pacientes que iniciaron tratamiento con antibióticos, 35 tuvieron que pasar por tratamientos inadecuados debido a la RAM prescritos, es decir, un 42% de los pacientes en este estudio presentaron resistencia, lo cual agrava la situación de salud del paciente y la problemática inicial.

2.2 Sector Productivo

Con respecto al uso de antibióticos en el sector productivo, éste está principalmente destinado a la crianza de animales para producción de proteínas cárnica a nivel terrestre y acuático, tanto a nivel mundial como nacional. Específicamente, estos compuestos (medicamentos, entre ellos el uso de antibióticos) son utilizados para promover el crecimiento y/o como método para la prevención de enfermedades infecciosas. Sin embargo, el uso

pues es común ver pacientes con tratamientos prolongados por enfermedades causadas por desmedido de estos medicamentos ha generado un impacto directo sobre la salud humana y animal, pues facilita la aparición de bacterias resistentes a antibióticos. Por ejemplo, un estudio realizado por Gutiérrez et al. (2017) evaluó la presencia de la bacteria *Campylobacter jejuni* (*C. Jejuni*) resistentes a antibióticos en carnes de pollo. Esta bacteria es responsable de la gastritis en las aves de corral y requiere un tratamiento con antibióticos. Los resultados de este estudio arrojaron que el 63% de las muestras resultaron contaminadas con esta bacteria y que el 27% de estas bacterias eran resistentes a los antibióticos eritromicina, ciprofloxacina, ampicilina, tetraciclina y ácido nalidíxico. Por lo tanto, este estudio demuestra que la resistencia a antibiótico se disemina a través del consumo de estos compuestos a la carne de las aves de corral y podría poner en riesgo a la salud humana a través del consumo de estos productos.

Por otro lado, la industria de la salmónica es otro sector productivo que utiliza antibióticos para favorecer el crecimiento de los salmones y prevenir enfermedades infecciosas en las jaulas de cultivos de salmones. La Figura 5 muestra la cantidad de antibióticos utilizados por año en términos de toneladas.



Figura 5. Consumo de antibióticos por tonelada en industria de la salmónica chilena en el periodo de 2007 hasta 2021. Datos extraídos de la Subdirección de Acuicultura, SERNAPESCA (2022).

De los antibióticos usados durante el 2021, 98,7% se administró en agua de mar y 1,3% en agua dulce. Del total de antibióticos utilizados en agua de mar un 97,1% correspondió a florfenicol, un 1,5% de oxitetraciclina y 1,4% de tiamulina. Por otro lado, del total de medicamento usado en agua dulce, un 67,0% correspondió a oxitetraciclina, 30,9% a florfenicol, un 1,1% a tilmicosina y un 1,0% a eritromicina.

Durante el año 2007 se dio a lugar una crisis sanitaria en la industria del salmón producida principalmente por el virus ISA (Infectious Salmon Anaemia) y el parásito *Caligus rogercresseyi*, el cual ha estudiado como un vector del virus (Oelckers et al., 2015). Esta crisis sanitaria está directamente ligada al sobreuso de antibióticos, ya que la presencia de estos medicamentos en el ambiente acuático crea un medio de presión selectiva ideal para la aparición de bacterias resistentes, causando un desequilibrio biológico en el entorno acuático tanto a nivel de salud humana como animal. Esta crisis dejó al descubierto las condiciones en las que se desarrollaba la crianza de salmones, que se caracterizaba por la alta densidad de peces enjaulados, estrés y muerte produciendo la aparición y fácil diseminación de enfermedades e infecciones en las zonas de cultivo (Millano et al., 2011).

Asimismo, la Figura 5 muestra que, desde el 2007, disminuyó el uso de antibióticos producto de la crisis sanitaria, lo cual dio paso a pérdidas económicas importantes en el sector acuícola y alta tasa de desempleo en la región de Los Lagos y Aysén (Molina et al., 2017). En esa época, la compañía Noruega Mowi, en ese entonces conocida como Marine Harvest, reconoció que en Chile se utilizaron 732 gramos de antibióticos por tonelada de salmón el año 2007, a diferencia de los 0,02 gramos de antibióticos utilizados durante el mismo año en Noruega. Es decir, en Chile se utilizaron por tonelada de salmón 36.600 veces más antibióticos, indicando preocupantes desregulaciones en el uso de estos medicamentos

en animales en Chile al comparar con lo establecido en Noruega (Millano et al., 2011).

También, los efectos de los antibióticos en ambientes acuáticos han sido ampliamente estudiados, indicando que son capaces de desequilibrar la biodiversidad en los sistemas acuáticos. Un ejemplo de ello es el florfenicol, uno de los antibióticos más utilizados en la industria acuícola el año 2021, el cual es capaz de sedimentar en el suelo marino y tener un efecto negativo sobre la diversidad de la microflora marina. Otro efecto sobre el sistema acuático es su repercusión sobre la estructura de comunidades microbianas asociadas a la producción de biomasa y nutrientes. Se ha descrito que este tipo de antibióticos puede causar efectos tóxicos sobre organismos marinos como crustáceos, incluso en concentraciones relativamente bajas, causando un daño a nivel celular en estos organismos, influenciando en su crecimiento, reproducción y cantidad poblacional (Sun et al., 2012; Yuxuan et al., 2019). En relación con lo anterior, también se ha reportado la presencia de bacterias resistentes a antibióticos como florfenicol, oxitetraciclina, eritromicina, entre otros, en ambientes acuáticos, los cuales causan un medio de selección ideal para la aparición y diseminación de genes de resistencia bacteriano (Schafhauser, 2018; Zeng, 2019; Mog, 2020).

Por otro lado, el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) ha publicado una declaración de venta de antibióticos para uso terapéutico en animales productivos y de compañía durante el año 2022. La Figura 6 muestra los porcentajes de tipos de antibióticos vendidos en Chile en cumplimiento y según lo indicado por la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA).

Dentro de los antibióticos más utilizados se destacan los anfenicoles, los cuales se dividen en cloranfenicol y florfenicol, siendo este último ampliamente utilizado en la industria acuícola como se describió anteriormente. De este tipo de antibióticos, hubo una venta de 291 kg durante el año 2022, seguido por las tetraciclinas, de las

cuales hubo un total de venta de 46.776 kg y en tercer lugar están las penicilinas, de las cuales hubo un total de venta de 36.861 kg.

El sobreuso de antibióticos y la evidencia científica acerca de los efectos nocivos de estos medicamentos sobre la salud humana y animal ha alertado a la población mundial.

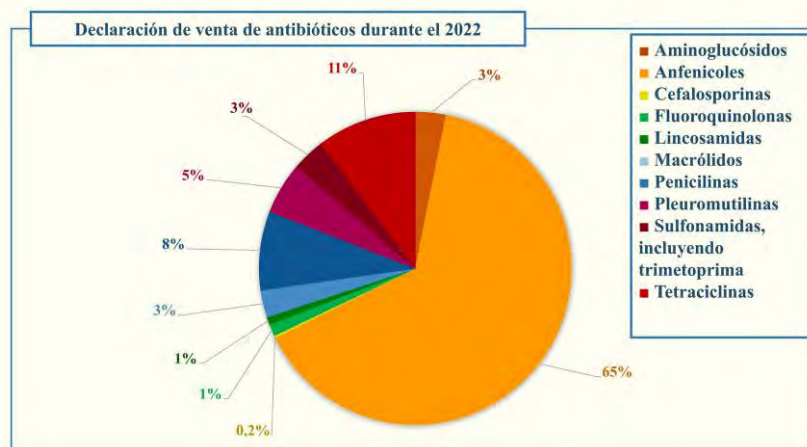


Figura 6. Declaración de venta total de antibióticos y antimicrobianos promotores de crecimiento y terapéuticos para especies tanto productivas como animales de compañía proporcionado por el SAG.

En este contexto, la OMS lanzó un Plan de Acción Mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos que incluye 5 objetivos estratégicos; 1) Mejorar el conocimiento de la resistencia a los antimicrobianos a través de una comunicación, educación y formación efectivas; 2) Reforzar los conocimientos y la base científica a través de la vigilancia y la investigación; 3) Reducir la incidencia de las infecciones con medidas eficaces de saneamiento, higiene y prevención de la infección; 4) Utilizar de forma óptima los medicamentos antimicrobianos en la salud humana y animal; y 5) Preparar argumentos económicos a favor de una inversión sostenible que tenga en cuenta las necesidades de todos los países y aumentar la inversión en nuevos medicamentos, medios de diagnóstico, vacunas y otras intervenciones (OMS, 2016).

A nivel nacional, el Gobierno de Chile implementó un Plan Nacional Contra la Resistencia a los Antimicrobianos Chile 2021 – 2025 donde se incluyeron al Ministerio de Salud (MINSAL, 2021), Economía, Agricultura, Medio Ambiente, Ciencia y Tecnología e Innovación, Educación y al Instituto de Salud Pública (ISP). El plan se basa en

el propuesto por la OMS e incluye las siguientes medidas; 1) Fortalecer la concientización y formación respecto de la resistencia a antibióticos; 2) Fortalecer el sistema nacional de vigilancia de la resistencia; 3) Prevenir y controlar las infecciones asociadas a salud humana y sanidad vegetal y animal; 4) Regular y monitorear el uso de antimicrobianos; y por último 5) Mejorar el acceso a la información y fomentar la investigación relacionada con la resistencia bacteriana. Además, el MINSAL presenta algunas recomendaciones sobre la prevención de la resistencia a antibióticos de forma personal, algunas de estas recomendaciones son evitar las infecciones en hospitales, usar antibióticos solo en caso de ser recetado por un médico (evitando automedicarse), seguir los tratamientos indicados por su médico y administrar adecuadamente y bajo supervisión veterinaria antibióticos en animales ya sea de producción de alimentos como mascotas (MINSAL, 2017).

3. Potenciales efectos de la presencia de antibióticos en el medio ambiente

Como se ha mencionado anteriormente, existe una gran cantidad de investigaciones que analizan el

efecto de los antibióticos sobre el medio ambiente, ya sea en sistemas acuáticos como en suelos. Además, se ha observado que éstos, al llegar al ser liberados al ambiente, pueden tener distintos destinos y afectar a un amplio espectro de organismos vivos. Estos puntos se desarrollan en profundidad a continuación.

3.1 Efectos sobre los ecosistemas acuáticos

La problemática que rodea a los antibióticos tiene muchas aristas, pues, aparte de las implicancias sobre la salud pública mundial y su efecto sobre el sector industrial, estos medicamentos tienen una fuerte repercusión sobre los ecosistemas acuáticos,

ya sea directamente sobre organismos vivos o sobre el equilibrio de la biodiversidad de los ecosistemas completos. La Figura 7 muestra la liberación de los antibióticos a los diferentes cuerpos de agua, ya sean aguas subterráneas, ríos, lagos y océanos a través de diferentes fuentes de diseminación. Como ya se ha mencionado, los antibióticos no son completamente metabolizados cuando son consumidos por un organismo vivo ya sea animal o humano. Estos compuestos serán excretados a través de la orina y las heces que llegará a las aguas servidas y eventualmente a las plantas de tratamiento (Szymańska et al., 2019; Sabri et al., 2020).

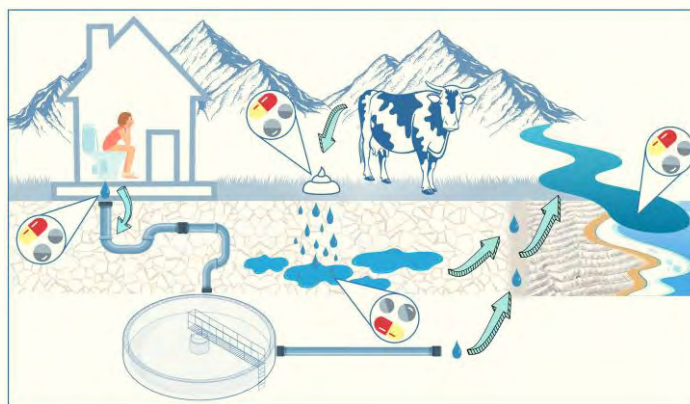


Figura 7. Diseminación de antibióticos en el medio ambiente y su ingreso al ciclo del agua.

En conjunto con lo anterior, esta problemática se ve exacerbada al considerar las aguas servidas de centros hospitalarios o industrias farmacéuticas, pues las concentraciones de antibióticos en el agua son mayores en comparación a las aguas provenientes de uso doméstico e industrial (Lien et al., 2016). Existen investigaciones que demuestran la deficiencia existente en las plantas de tratamiento de aguas servidas ante estos contaminantes (Leiva et al., 2024). Ekwanzala et al. (2020) analizaron estudios que indicaban concentraciones de antibióticos en distintas fuentes de agua. Algunos de estos resultados indicaron la presencia de ciprofloxacino en aguas servidas de España y Alemania con valores de 610 ng/L y 420 ng/L, respectivamente. Al comparar estas concentraciones con las descargas provenientes de hospitales, se reportaron concentraciones de

ciprofloxacino de hasta 7500 ng/L. Más aún, se han encontrado concentraciones de ciprofloxacino de alrededor de 140 ng/L en los efluentes generados por las plantas de tratamiento de aguas servidas. En Chile también existen estudios recientes en ecosistemas acuáticos y en plantas de tratamiento donde se demuestra la presencia de bacterias resistentes a antimicrobianos (Leiva et al., 2024, Herrera-Muñoz et al., 2024). Este resultado evidencia que los sistemas utilizados son insuficientes contra este tipo de contaminantes, descargando antibióticos a los cuerpos de agua.

Algunos antibióticos también han sido detectados en ríos, como es el caso del río Beerze en Holanda, el cual es el cuerpo de agua receptor de la planta de tratamiento de aguas servidas. Dentro de los resultados se reportaron concentraciones de antibióticos como sulfametoxazol y trimetoprima;

además, 4 genes de resistencia bacteriana en sedimento y agua hasta 20 km río abajo. Esto confirma la ineficacia de las plantas de tratamiento ante este tipo de contaminantes ya sea antibióticos como genes de resistencia bacteriano (Sabri et al., 2020). Más aún, existen estudios en diferentes países que confirman la existencia de la diseminación de antibióticos desde plantas de tratamiento de aguas servidas ya sea retenidas en agua como en sedimento de cuerpos de agua (Wang et al., 2016; Hussain et al., 2017).

Otro destino de los antibióticos y genes de resistencia bacteriano liberados al ambiente son las aguas subterráneas, una de las formas de reserva de agua más importantes, pues son comúnmente utilizadas para consumo humano y riego agrícola. Se ha reportado presencia de antibióticos y genes de resistencia bacteriano en aguas subterráneas cercanas a vertederos de residuos sólidos e instalaciones ganaderas (Lyu et al., 2020; Junaid et al., 2022). Los antibióticos se movilizan en diferentes medios a través de un proceso de adsorción/desorción. Por medio de la adsorción se mueven desde un medio acuoso a la superficie de un medio sólido sin cambios en su estructura química y a través de la desorción sucederá lo contrario. La adsorción/desorción de un antibiótico indica la persistencia de este compuesto en un medio y determina su movilidad/retención en suelos y su potencial de transporte en agua (Conde-Cid et al., 2020).

3.2 Efectos sobre organismos y microorganismos

Algunos organismos vivos pueden verse afectados por la presencia de antibióticos en su ecosistema. En consecuencia, se ha reportado que para especies acuáticas fotosintéticas estos medicamentos pueden interferir con la síntesis de proteínas, desarrollo de cloroplastos y con la fotosíntesis, inhibiendo su crecimiento (Liu et al., 2018). Otra consecuencia de igual importancia es la capacidad que presentan los antibióticos para bioacumularse ya sea en plantas, animales acuáticos e incluso animales terrestres como aves (Li et al., 2012). Esta característica produce problemas a nivel

sistémico tanto del medio en que se liberan estos fármacos como de los organismos que viven en él, pues se ha reportado cambios en el metabolismo de ciertos peces y bioacumulación en sus tejidos (Zhang et al., 2021). Además, esta problemática está directamente relacionada con el problema de salud pública asociada a resistencia bacteriana, pues la bioacumulación de antibióticos también se ha reportado en animales de producción marino para consumo humano (Zhang et al., 2021; Li et al., 2021).

4. Conclusiones y desafíos futuros

A pesar de que la RAM es un problema que se aborda más bien desde la perspectiva de la salud pública, se deben enfocar los esfuerzos en encontrar soluciones desde una mirada interdisciplinaria. De manera tal, que tanto el sector productivo, farmacéutico y clínico como también las políticas públicas estén alineadas en disminuir las causas que producen los efectos de la diseminación de antibióticos en los ecosistemas.

Las políticas públicas son primordiales para la toma de decisiones en diferentes áreas, por esto es muy importante controlar el origen y el consumo de antibióticos en el área acuícola, ganadera y clínica. Más aún el Ministerio de Salud ha incluido en sus planes de Adaptación al Cambio Climático este tema como uno de los ejes de trabajo. Asimismo, se debe invertir en la difusión de los efectos del sobreconsumo de antibióticos tanto en la salud humana como animal. Además, las nuevas políticas deberían considerar los efectos de los antibióticos en los organismos acuáticos, implementando guías de monitoreo ambiental y contemplar una mayor difusión e información ciudadana.

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

6. Referencias

Akram F., Imtiaz M., ul Haq I. 2023. Emergent crisis of antibiotic resistance: A silent pandemic threat to 21st century. *Microbial Pathogenesis*, 174, 105923.

- Aminov R. 2010. A brief history of the antibiotic era: lessons learned and challenges for the future. *Frontiers in Microbiology*, 1, 134.
- Arshad M., Mahmood S.F., Khan M., Hasan R. 2020. Covid-19, misinformation, and antimicrobial resistance. *BMJ*, 371.
- Calvo J. Martinez L. 2009. Mecanismos de acción de los antimicrobianos. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 27, 44 – 52.
- Conde-Cid M., Núñez-Delgado A., Fernández-Sanjurjo M.J., Álvarez-Rodríguez E., Fernández-Calviño D., Arias-Estévez M. 2020. Tetracycline and sulfonamide antibiotics in soils: presence, fate and environmental risks. *Processes*, 8(11), 1479.
- Dos Santos R.M. 2020. Isolation, social stress, low socioeconomic status and its relationship to immune response in Covid-19 pandemic context. *Brain, Behavior, & Immunity-health*, 7, 100103.
- Etebu E., Arikekpar I. 2016. Antibiotics: Classification and mechanisms of action with emphasis on molecular perspectives. *International Journal of Applied Microbiology and Biotechnology Research*, 4, 90 – 101.
- Gutiérrez S., Orellana D., Martínez C., García Mena V. 2017. Caracterización de cepas de *Campylobacter jejuni* obtenidas desde carne de pollo y heces de aves de corral de la zona central de Chile. *Revista Médica de Chile*, 145(12), 1551-1558.
- Herrera-Muñoz M.I., Calzadilla, W., Cabrera-Reina A., García, V., Salazar-González R., Hernández, F., Campos-Mañas M., Miralles-Cuevas, S. 2024. Assessment of contaminants of emerging concern and antibiotic resistance genes in the Mapocho River (Chile): A comprehensive study on water quality and municipal wastewater impact. *Science of The Total Environment*, 954, 176198
- Hussain S., Naeem M., Chaudhry M.N. 2017. Estimation of residual antibiotics in soil and underground water of areas affected by pharmaceutical wastewater in Lahore. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 39, 56-60.
- Iwu C.D., Korsten L., Okoh A.I. 2020. The incidence of antibiotic resistance within and beyond the agricultural ecosystem: A concern for public health. *MicrobiologyOpen*, 9(9), e1035.
- Junaid M., Zainab S.M., Xu N., Sadaf M., Malik R.N., Wang J. 2022. Antibiotics and antibiotic resistant genes in urban aquifers. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 26, 100324.
- Kapoor G., Saigal S., Elongavan A. 2017. Action and resistance mechanisms of antibiotics: A guide for clinicians. *Journal of Anaesthesiology Clinical Pharmacology*, 33, 300 – 305.
- Leiva A.M., Gómez G., González-Rocha G., Piña B., Vidal G. 2024. Performance of full-scale rural wastewater treatment plants in the reduction of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes from small-city effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12(2) 112322.
- Li W., Shi Y., Gao L., Liu J., Cai Y. 2012. Occurrence of antibiotics in water, sediments, aquatic plants, and animals from Baiyangdian Lake in North China. *Chemosphere*, 89(11), 1307-1315.
- Li J.Y., Wen J., Chen Y., Wang Q., Yin J. 2021. Antibiotics in cultured freshwater products in Eastern China: Occurrence, human health risks, sources, and bioaccumulation potential. *Chemosphere*, 264, 128441.
- Lien L.T.Q., Hoa N.Q., Chuc N.T.K., Thoa N.T.M., Phuc H.D., Diwan, V., Dat N.T., Tamhankar A.J., Lundborg, C.S. 2016. Antibiotics in wastewater of a rural and an urban hospital before and after wastewater treatment, and the relationship with antibiotic use—a one year study from Vietnam. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(6), 588.
- Liu L., Wu W., Zhang J., Lv P., Xu L., Yan Y. 2018. Progress of research on the toxicology of antibiotic pollution in aquatic organisms. *Acta Ecologica Sinica*, 38(1), 36-41.
- Lyu J., Yang L., Zhang L., Ye B., Wang L. 2020. Antibiotics in soil and water in China—a systematic review and source analysis. *Environmental Pollution*, 266, 115147.
- Meriño M., Morales I., Badilla, J., Vallejos, C. 2021. Resistencia antimicrobiana en infección del tracto urinario con bacteriuria en el servicio de urgencia de un hospital comunitario de la región de Ñuble, Chile. *Revista Virtual de la Sociedad Paraguaya de Medicina Interna*, 8(1), 117-125.
- MINSAL 2021. <https://diprece.minsal.cl/wp-content/uploads/2021/10/Plan-Nacional-Contra-la-Resistencia-a-los-Antimicrobianos-Chile-2021-2025.pdf>

- Mog M., Ngasotter S., Tesia S., Waikhom D., Panda P., Sharma S., Varshney S. 2020. Problems of antibiotic resistance associated with oxytetracycline use in aquaculture: A review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8, 1075-1082.
- Oelckers K., Vike S., Duesund H., González J., Nylund A., Yany G. 2015. *Caligus rogercresseyi*: posible vector en la transmisión horizontal del virus de la anemia infecciosa del salmón (ISAv). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 43(2), 380-387.
- Pérez P.R., Quiroz J.B., Palma P.I., Sierra C.R., Scott M.B., Reyes Arteaga J.B., Kline M., Bralic R.A. 2022. Conocimiento y conductas asociadas al uso comunitario de antimicrobianos en adultos en Santiago de Chile. *Revista Chilena de Infectología*, 39(5), 517-524.
- Pérez M., Mota M. 2006. Morfología y estructura bacteriana. *Temas de Bacteriología y Virología Médica*, 23 – 42.
- Reygaert W.C. 2018. An overview of the antimicrobial resistance mechanisms of bacteria. *AIMS Microbiology*, 4(3), 482 – 501.
- Sabri N., Schmitt H., Van der Zaan B., Gerritsen H.W., Zuidema T., Rijnaarts H.H.M., Langenhoff A.A.M. 2020. Prevalence of antibiotics and antibiotic resistance genes in a wastewater effluent-receiving river in the Netherlands. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 102245.
- Samrot A.V., Wilson S., Sanjay Preeth R.S., Prakash P., Sathiyasree M., Saigeetha S., Shobana N., Pachiyappan S., Rajesh V.V. 2023. Sources of antibiotic contamination in wastewater and approaches to their removal—an overview. *Sustainability*, 15(16), 12639.
- Seija V., Vignoli R. 2006. Principales grupos de antibióticos. *Temas de Bacteriología y Virología Médica*, 2, 631-633.
- Schafhauser B.H., Kristofco L.A., de Oliveira C.M.R., Brooks B.W. 2018. Global review and analysis of erythromycin in the environment: occurrence, bioaccumulation and antibiotic resistance hazards. *Environmental Pollution*, 238, 440-451.
- Soucy S.M., Huang J., Gogarten J.P. 2015. Horizontal gene transfer: building the web of life. *Nature Reviews Genetics*, 16(8), 472 – 482.
- Subdirección de Acuicultura, Departamento de Salud Animal. 2022. Informe sobre el uso de antimicrobianos en la salmonicultura nacional.
- Sun Y., Dai Z., Xiong W., Luo X., Zou M. 2012. Fate of florfenicol in a simulated aquatic ecosystem and effects on sediment microflora. *Water Environment Research*, 84(11), 2054-2059.
- Szymańska U., Wiergowski M., Sołtyszewski I., Kuzemko J., Wiergowska G., Woźniak M.K. 2019. Presence of antibiotics in the aquatic environment in Europe and their analytical monitoring: Recent trends and perspectives. *Microchemical Journal*, 147, 729-740.
- Urban-Chmiel R., Marek A., Stępień-Pyśniak D., Wieczorek K., Dec M., Nowaczek A., Osek J. 2022. Antibiotic resistance in bacteria—A review. *Antibiotics*, 11(8), 1079.
- Wang J., Zhou A., Zhang Y., Si C., Chen Z., Qian H., Zhao Z. 2016. Research on the adsorption and migration of sulfa antibiotics in underground environment. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-9.
- Yadav S., Kapley A. 2021. Antibiotic resistance: Global health crisis and metagenomics. *Biotechnology Reports*, 29, e00604.
- Yuxuan Z., Peiyong G., Yanmei W., Xiaoyan Z., Meixian W., Simin Y., Yinshi S., Jun D., Haitao S. 2019. Evaluation of the subtle effects and oxidative stress response of chloramphenicol, thiamphenicol, and florfenicol in *Daphnia magna*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(3), 575-584.
- Zhang X., Zhang J., Han Q., Wang X., Wang S., Yuan X., Zhang B., Zhao S. 2021. Antibiotics in mariculture organisms of different growth stages: tissue-specific bioaccumulation and influencing factors. *Environmental Pollution*, 288, 117715.
- Zeng Q., Liao C., Terhune J., Wang L. 2019. Impacts of florfenicol on the microbiota landscape and resistome as revealed by metagenomic analysis. *Microbiome*, 7, 1-13.
- Zhong S., Wu X., Zhang D., Du S., Shen J., Xiao L., Zhu Y., Xu Y., Lin Y., Yin L., Rao M. Lu S. 2022. Antibiotics in urine from general adults in Shenzhen, China: Demographic-related difference in exposure levels. *Science of The Total Environment*, 843, 157070.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

ALSTOM CHILE S.A.

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

COLBÚN S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

GUZMÁN Y LARRAÍN VIVIENDAS ECONÓMICAS SpA

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

EMPRESAS DE INGENIERÍA COLABORADORAS

ACTIC CONSULTORES LTDA.

ARCADIS CHILE S.A.

IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX CONSULTORES LTDA.



Nuestros canales digitales:

Sitio web: www.iing.cl

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

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

Nuestros teléfonos:

(+56) 22696 8647 · (+56) 93736 0656