



Revista Chilena de

# INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 / N° 501 / Abril 2024

Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 136, N° 1 / 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*

Javier García Monge

### *Tesorero*

Jorge Pedrals Guerrero

### *Protesorero*

Mauro Grossi Pasche

## DIRECTORIO 2024

Hernán Alcayaga Saldías

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Cristian Barrientos Gutiérrez

Juan Carlos Barros Monge

Juan Enrique Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Alejandra Decinti Weiss

Rodrigo Fernández Aguilera

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Javier García Monge

Mauro Grossi Pasche

Germán Millán Valdés

Marcela Munizaga Muñoz

Eduardo Muñoz Castro

Juan Music Tomicic

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

Jorge Yutronic Fernández

### *Secretario General*

Carlos Gauthier Thomas

## SOCIEDADES ACADÉMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA DE SISMOLOGÍA  
E INGENIERÍA ANTISÍSMICA, ACHISINA.

*Presidente:* Jorge Carvallo W.

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

*Presidente:* Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA  
HIDRÁULICA, SOCHID.

*Presidente:* Hernán Alcayaga S.

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

### **Cambio climático y el agua.**

*Presidente:* Luis Nario M.

### **Comunicaciones.**

*Presidente:* Germán Millán V.

### **Convergencia Biológica Digital.**

*Presidente:* Alejandro Steiner T.

### **El Estado, su eficiencia, su rol y los desafíos futuros.**

*Presidente:* Jorge Pedrals G.

### **Ingenieros en la historia presente.**

*Presidente:* Miguel Ropert D.

### **Práctica y academia en la ingeniería chilena.**

*Presidenta:* Silvana Cominetti C.

### **Propuestas desde la ingeniería para superar la pobreza.**

*Presidente:* Juan Enrique Castro C.

### **Prospectivas de la Ingeniería Chilena (II parte).**

*Presidente:* Jorge Yutronic F.

### **Una visión y diagnóstico desde la ingeniería a la baja participación de jóvenes en Sociedades Académicas y Profesionales.**

*Presidente:* Eduardo Muñoz C.

### **Seguridad (Ad-hoc)**

*Presidente:* Raúl Manásevich

## CONSEJO CONSULTIVO

Raquel Alfaro Fernandois

Elías Arze Cyr

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

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

Germán Millán Pérez

Guillermo Noguera Larraín

Luis Pinilla Bañados

José Rodríguez Pérez

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazín Arellano

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



Nuestra portada

Inteligencia Artificial es considerada una tecnología de propósito general, que impacta la vida de las personas y todos los sectores de la economía, hay quienes comparan la inteligencia artificial con lo que ocurrió con la internet y anteriormente, con la electricidad.

## REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 501, abril de 2024

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

### DIRECTOR

Raúl Uribe S.

### CONSEJO EDITORIAL

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

### REPRESENTANTE LEGAL

Juan Carlos Barros Monge

### SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

### SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

### DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

### EDITORIAL.

Pág. 2

### FORO “INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA), DESAFÍOS PARA UN MUNDO EN TRANSFORMACIÓN POLÍTICA, SOCIAL Y AMBIENTAL”.

Pág. 3

Conferencias de los Sres. Juan Carlos Barros Monge, Ricardo Baeza Yates y José García Conejeros.

### ¿QUÉ VAMOS A HACER CON EL LITIO?

Pág. 34

Conferencia del Sr. Daniel Jiménez, Director de IliMarkets.

### FORO “LA ECONOMÍA DE LA COMPLEJIDAD DE LA POLÍTICA NACIONAL DEL LITIO.

Pág. 49

Conferencias de los Sres. Jaime Alée y César Hidalgo.

### ENTREVISTA

#### A INGENIEROS DESTACADOS.

Pág. 77

– SR. JUAN CARLOS DE LA LLERA M.  
Comisión de Ingenieros en la Historia Presente  
Presidente: Miguel Ropert D.

### RICARDO NICOLAU DEL ROURE G.

Pág. 80

Premio Infraestructura Año 2023 del Colegio de Ingenieros de Chile A.G.

El primer evento realizado en forma telemática en el tercer trimestre de 2023 consistió en la conferencia del Sr. Daniel Jiménez, Director de IliMarkets, quién expuso el tema: **¿Qué Vamos a hacer con el Litio?** El señor Jiménez es ingeniero civil y MBA de la Pontificia Universidad Católica de Chile, socio fundador de IliMarkets y uno de los principales expertos en el mercado del litio. En su presentación desarrolló un análisis muy sólidamente sustentado en cifras, identificando lo que estima que es y será, o que se espera que sea, el mercado del litio para Chile, concluyendo en lo que se podría hacer. Comenta que la demanda de litio el año 2020 fue del orden de 300.000 toneladas de carbonato y litio equivalente y la demanda para el 2030 se proyecta que sea sobre 3.000.000 de toneladas, a un ritmo de crecimiento uniforme de 300.000 toneladas anuales. Sin embargo, hay que tener claro que los desafíos productivos serán igualmente enormes. La composición de la demanda va a estar muy ligada al uso del litio en baterías, con una concentración del 80% en vehículos eléctricos, dependiendo de la penetración que estos tengan en el mercado automotriz. En el 2030 la mitad de las ventas mundiales de vehículos se concentrará en los eléctricos y que a partir del año 2027 o 2028, empezará a aparecer la batería Ion Sodio, primera señal de fuerte competencia de tecnología alternativa.

Luego de analizar el mercado previsible para el litio concluye en que, su única receta es que Chile, tal como lo han hecho los países exitosos (Australia, Argentina, Brasil y Canadá) debe aceptar que el litio es tan solo un mineral más, y que, para recuperar el rol protagónico, debe actuar de inmediato, para recuperar lo perdido por no haberlo hecho hace 15 años atrás.

El segundo evento del periodo en referencia, contempló la realización del **Foro Inteligencia Artificial (IA): Desafío Para Un Mundo En Transformación Política, Social Y Ambiental**, a cargo de los expositores señores Juan Carlos Barros, Ricardo Baeza-Yates y José García todos ellos destacados especialistas en el campo de la Inteligencia Artificial.

El señor Barros, actual presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, es Ingeniero Civil Mecánico y MBA de la Universidad de Chile. Presidió la Comisión de Inteligencia Artificial y Big Data y en su presentación compartió acciones y estrategias propuestas por la mencionada Comisión, orientadas a maximizar el impacto positivo de la IA en la sociedad chilena.

El señor Baeza-Yates, Doctor en Ciencias de la Computación de la Universidad de Waterloo (Canadá), es el director del Instituto de Investigación de Inteligencia Artificial Experiencial de la Northeastern University (Estados Unidos), Profesor Titular en la Universidad Pompeu Fabra en Barcelona y Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile. Su presentación se concentró en la Importancia de la Responsabilidad y Ética en el Desarrollo y Aplicación de la Inteligencia Artificial. El señor Baeza-Yates agrega una precisión muy importante, al discutir respecto de las acepciones IA responsable, IA Ética e IA Confiable, manifestándose contrario a las dos últimas, por razones que explica muy claramente en el texto reproducido de su presentación, sugiriendo que se adopte tan solo la acepción IA responsable.

El señor García, Doctor en Ingeniería Informática especializado en Inteligencia Artificial y Análisis de Big Data, es Académico e Investigador de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Durante su presentación expuso detalladamente diversos ejemplos reales de cómo la inteligencia artificial está transformando la resolución de problemas en el ámbito industrial en Chile. Ha acumulado bastante experiencia trabajando en roles académicos, científicos y dirección de los equipos que construyen este tipo de soluciones.

Coinciden los tres en que la Inteligencia Artificial se ha convertido en un motor clave de integración y cambio transformador, por eso es fundamental que países como el nuestro aprovechen el potencial de esta tecnología para impulsar el desarrollo sostenible, el crecimiento económico y el progreso social.

Destacamos en esta edición el texto completo del discurso de don Ricardo Nicolau del Roure, quien recibió el premio **“Infraestructura año 2023”** del Colegio de Ingenieros de Chile y una entrevista a don Juan Carlos de la Llera Martin, quien recientemente se suma como miembro internacional de la prestigiosa Academia Nacional de Ingeniería de Estados Unidos (National Academy of Engineering). Extendemos a ambos, nuestras más cálidas felicitaciones por escalar a tan altas distinciones profesionales.

# FORO “INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA). DESAFÍO PARA UN MUNDO EN TRANSFORMACIÓN POLÍTICA, SOCIAL Y AMBIENTAL”

*Conferencias de los señores Juan Carlos Barros Monge, Ricardo Baeza Yates y José García Conejeros.*



*Sr. Juan Carlos Barros.*



*Sr. Ricardo Baeza.*



*Sr. José García.*

*El día jueves 7 de diciembre de 2023 a las 15:00 horas - vía zoom, ante una gran cantidad de asistencias del ámbito público y privado, se realizó el Foro “Inteligencia Artificial (IA), desafíos para un mundo en transformación política, social y ambiental”. Para esta ocasión se contó con la participación de los Sres. Juan Carlos Barros, Director y Presidente de la Comisión de Inteligencia Artificial y Big Data del Instituto de Ingenieros de Chile, Ricardo Baeza Yates, Director de Investigación del Instituto de Inteligencia Artificial Experiencial de Northeastern University de EEUU, y José García Conejeros, Académico e Investigador de la PUCV.*

*Juan Carlos Barros Monge, es Ingeniero Civil Mecánico y MBA de la Universidad de Chile, director del Instituto de Ingenieros de Chile y presidente de la Comisión de Inteligencia Artificial y Big Data. Él compartirá algunas acciones y estrategias propuestas por la comisión que presidió, para maximizar el impacto positivo de la I.A. en la sociedad chilena.*

*Ricardo Baeza-Yates, es Doctor en Ciencias de la Computación de la Universidad de Waterloo (Canadá), director del Instituto de Investigación de Inteligencia Artificial Experiencial de la Northeastern University (Estados Unidos), Profesor Titular en la Universidad Pompeu Fabra en Barcelona y Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile. Abordará la Importancia de la Responsabilidad y Ética en el Desarrollo y Aplicación de la Inteligencia Artificial.*

*José García Conejeros, es Doctor en Ingeniería Informática especializado en Inteligencia Artificial y Análisis de Big Data, Académico e Investigador de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Llevará a través de ejemplos concretos cómo la inteligencia artificial está transformando la resolución de problemas en el ámbito industrial en Chile.*

*A continuación, reproducciones sus intervenciones.*

**Sra. Silvana Cominetti.**

—Muy buenas tardes a todos, bienvenidos al Foro “Inteligencia Artificial (IA). Desafío para un mundo en transformación política, social y ambiental”.

Como Presidenta del Instituto de Ingenieros de Chile, quiero darles la más cordial bienvenida a esta actividad, en la que conversaremos sobre el importante rol que la inteligencia artificial está desempeñando en nuestro mundo en constante cambio.

Saludamos a los expositores don Carlos Barros, José García y don Ricardo Baeza.

El Instituto de Ingenieros de Chile es una corporación sin fines de lucro que desde hace 135 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 o Charlas, que se ocupan de temas que, por su relevancia para el país, requieren ser expuestos ante la comunidad. En una era de avances tecnológicos vertiginosos como la que vivimos hoy día, la inteligencia artificial se ha convertido en un motor clave de innovación y cambio transformador. Estamos en el umbral de una nueva era donde es fundamental que naciones como Chile aprovechen el potencial de la I.A., para impulsar el desarrollo sostenible, el crecimiento económico y el progreso social.

Esperamos tener una discusión enriquecedora sobre el futuro de la I.A. en Chile y las posibilidades que se nos abren para la ingeniería y para los ingenieros.

Ahora, permítanme presentar a nuestros panelistas quienes compartirán sus conocimientos y experiencias en el campo de la Inteligencia Artificial:

Dividiremos nuestro tiempo en tres bloques (uno para cada panelista) donde exploraremos los temas indicados anteriormente. Al final de las presentaciones abriremos el espacio para preguntas y comentarios de la audiencia.

Queremos agradecer a los miembros de la Comisión de Inteligencia Artificial y Big Data del Instituto de Ingenieros de Chile que han puesto mucho esfuerzo y trabajo al estudiar este tema y han finalizado con un Informe que hemos difundido por medio de una distribución y además está publicado en nuestra página.

Por último, queremos expresar también nuestro agradecimiento a REUNA que hace posible este Foro, sin cuya colaboración no podríamos disfrutar de esta valiosa conversación. Muchas gracias, bienvenidos a todos, a todas.

**Sr. Juan Carlos Barros Monge.**

—Muchas gracias, Presidenta por la presentación y agradezco a Ricardo y a José que hayan podido hacerse un espacio en sus agendas para poder participar en esta actividad.

La Inteligencia Artificial o IA se ha convertido en un motor clave de integración y cambio transformador, por eso es fundamental que países como el nuestro aprovechen el potencial de esta tecnología para impulsar el desarrollo sostenible, el crecimiento económico y el progreso social.

Considerando lo anterior y el rol que ha tenido el Instituto de Ingenieros de Chile, el Directorio de la Corporación tomó la decisión de formar una comisión de trabajo para analizar el impacto que está teniendo y que podría tener el desarrollo actual y esperado de esta tecnología, en la sociedad chilena.

Esta comisión estuvo presidida por quien les habla y constituida por los siguientes ingenieros, a quienes el instituto agradece su aporte y dedicación: Iván Álvarez, Javier García, Mauro Grossi, Cristian Hermansen, José Manuel Peña, Miguel Ropert y Carlos Villagrán.

Como resultado del trabajo realizado se elaboró el documento: “**Inteligencia Artificial una Nueva Oportunidad de Desarrollo para Chile**”, que está disponible en la página web del Instituto y cuyo link les fue enviado junto con la invitación a este Foro. En este documento, se presentan las principales percepciones y preocupaciones de los ingenieros y las tendencias e impactos esperados. Se plantean además consideraciones éticas, se analiza el potencial del país para liderar el desarrollo y uso de esta tecnología y finalmente, se presentan los principales desafíos y oportunidades para la ingeniería y los ingenieros.

El documento es bastante extenso y tiene varios ejemplos, muy interesantes, se muestran nuevas empresas que se han originado en base a esta tecnología, tanto en el extranjero como en el país. El objetivo de este Foro es discutir algunos

de los aspectos más relevantes que están tratados en el documento, por ello, en esta presentación, me voy a referir principalmente a las conclusiones y recomendaciones.

La Inteligencia Artificial es considerada una tecnología de propósito general esto significa, que puede impactar en múltiples sectores, transformando la economía y la vida de las personas, hay quienes comparan la inteligencia artificial con lo que ocurrió con la internet y anteriormente, con la electricidad, es decir, es una tecnología que impacta la vida de las personas y todos los sectores de la economía (Figura A1).



Figura A1

Esta tecnología también tiene el potencial de acelerar el logro de los objetivos de desarrollo sustentable (ODS) que fueron planteados por la Organización de Naciones Unidas (ONU), en el año 2015. Nuestro país enfrenta grandes desafíos, tales como, mejorar la prosperidad económica, la educación y reducir las desigualdades sociales, entre otras; y la Inteligencia Artificial nos ofrece una oportunidad para poder abordar estos desafíos mediante talento humano, educación, desarrollo tecnológico y colaboración con empresas globales (Figuras A2 y A3).

Chile tiene un gran potencial para el desarrollo y uso de la inteligencia artificial por lo que tenemos la oportunidad de convertirnos en líderes en América latina. En varias publicaciones se nos reconoce como un país que tiene un gran potencial. El problema, es que hemos estado muchas veces en la situación, de tener un gran potencial y no haberlo aprovechado, de ahí el título de la publicación “Inteligencia Artificial una Nueva Oportunidad de Desarrollo para el Chile”. Creo que ésta es una oportunidad que no debíamos

dejar pasar. El estado ha desarrollado leyes y está desarrollando políticas para impulsar la adopción de la inteligencia artificial, existe talento. Centros de Investigación y Desarrollo y también empresas tecnológicas globales que están desarrollando inteligencia artificial en el país. Si bien existe déficit en la formación de capital humano, tenemos un buen nivel de desarrollo en infraestructura de comunicaciones y existen diversos proyectos de universidades locales para la investigación y desarrollo en inteligencia artificial. Existe además un notable incremento en emprendimientos en inteligencia artificial (Figura A4).



Figura A2

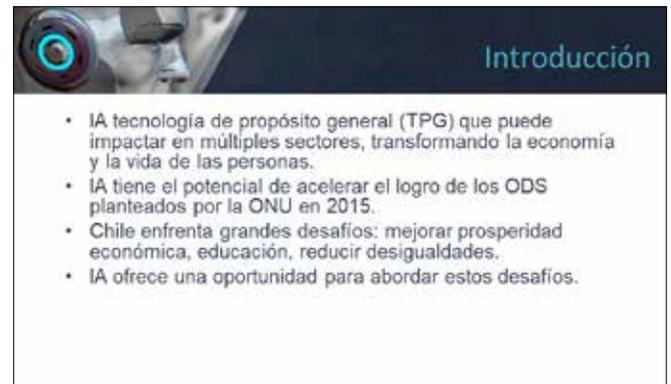


Figura A3

De acuerdo a lo que vimos en el trabajo realizado en la comisión, se visualizan dos caminos paralelos de oportunidades para la ingeniería y los ingenieros. El primero, es el camino tradicional: incorporar esta tecnología en aquellas áreas que han sido relevantes en el pasado como, por ejemplo: agroindustria, minería, construcción y energía, entre otros. El segundo es desarrollar tecnología de inteligencia artificial

en aquellas áreas en las que tenemos ventajas comparativas. A modo de ejemplo, disponemos de una gran cantidad de datos climáticos, en diferentes zonas geográficas, que nos permiten aportar en el desarrollo de soluciones para el cambio climático, tenemos infraestructura para la transmisión y procesamiento de grandes datos astronómicos, disponemos de grandes ciudades y conurbaciones que podemos utilizar como laboratorio de experimentación. En el documento se detallan, otras áreas en las que la podríamos realizar desarrollos tecnológicos (Figura A5).



Figura A4

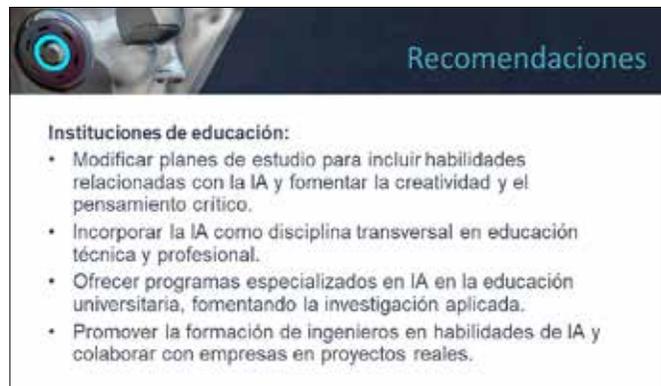


Figura A6

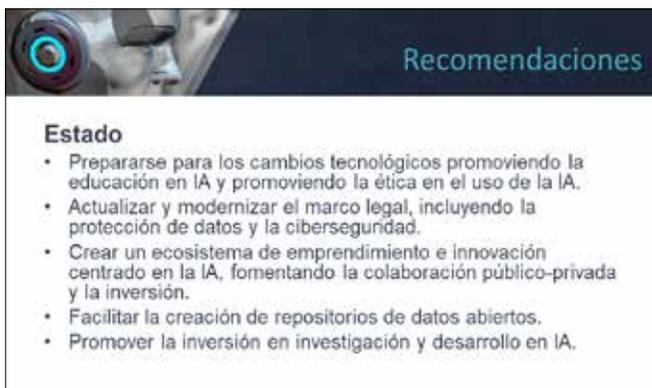


Figura A5

Finalmente, algunas recomendaciones que hacemos en el documento, en función de los diferentes actores involucrados. Creemos que el Estado debe prepararse para los cambios tecnológicos: promoviendo la educación en inteligencia artificial y también la ética en su uso. Si bien tenemos un marco legal, con leyes vigentes, existen otras, que están en estudio, que creemos que es necesario actualizar, especialmente en lo relacionado con la protección de datos y

ciberseguridad. Creemos también que el Estado debería crear un ecosistema de emprendimiento e innovación centrado en Inteligencia Artificial, fomentar la colaboración Pública-Privada y la inversión, además de facilitar la creación de repositorios de datos abiertos, como lo que está haciendo el Centro Nacional de Inteligencia artificial (CENIA) ya que, en la medida en que tenemos acceso a datos abiertos podemos propiciar, el desarrollo de inteligencias artificiales. Finalmente, es necesario promover la inversión en investigación y desarrollo (Figura A6).

A nivel de las instituciones de educación, creemos que es necesario modificar los planes de estudio para incluir habilidades relacionadas con la inteligencia artificial, junto con fomentar la creatividad y pensamiento crítico. Es necesario incorporar la inteligencia artificial como una disciplina transversal, tanto en la educación técnica como en la educación profesional no solamente en las áreas de matemática, computación e ingeniería. Además, creemos que es necesario ofrecer programas especializados en inteligencia artificial con foco en investigación aplicada. Finalmente, estimamos que es necesario promover la formación de ingenieros en habilidades de inteligencia artificial y colaborar con empresas en proyectos reales (Figura A7).

En relación a las empresas, podemos distinguir tres tipos: las que desarrollan la tecnología, aquellas que son usuarias de tecnología y nuevas empresas tecnológicas. Cada una de las cuales tiene un rol diferente. Las empresas que desarrollan tecnología, deberían invertir en investigación y desarrollo, junto con colaborar con las usuarias de la tecnología para desarrollar funciones más personalizada. Aquellas empresas usuarias de la tecnología, deberían identificar áreas

en la que la inteligencia artificial puede mejorar procesos junto con invertir en infraestructura y establecer acuerdos de colaboración con aquellas que desarrollan tecnología. Finalmente, las nuevas empresas tecnológicas, creemos que deberían identificar oportunidades de negocio en inteligencia artificial, invertir en formación y colaborar con otras organizaciones de ecosistema.

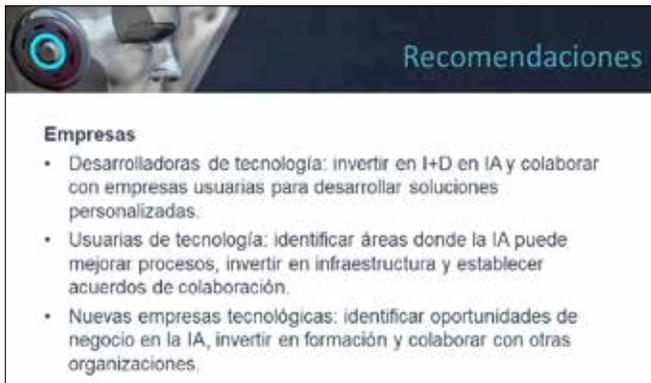


Figura A7

Este es un gran resumen de lo que son las conclusiones y recomendaciones que planteamos en el documento. Un documento que, al estar escrito en una forma muy didáctica, creemos que puede convertirse en un documento de divulgación de esta tecnología y del potencial que tiene para nuestra sociedad.

Eso es todo lo que les quería comentar.

Muchas gracias.

### Ricardo Baeza Yates.

—Muchas gracias, Presidenta. Mucho gusto, no nos habíamos conocido antes y a Juan Carlos por la oportunidad de exponer aquí. Lamentablemente las láminas están en inglés, que es lo más común en mi trabajo, pero por supuesto que mi exposición será en castellano (Figura B1).

Antes de empezar me gustaría contarles donde estoy trabajando ahora, el Instituto para IA Experiencial. El nombre de IA Experiencial viene porque Northeastern fue la universidad que inventó lo que se llama el programa Co-op,

que significa que cada estudiante de cualquier carrera, en uno de los tres trimestres que tiene por año, trabaja. Esto fue hace más de 100 años y el objetivo principal era que la clase media baja de Boston pudiera financiar sus estudios y que los estudios universitarios no solamente quedaran para las familias ricas. Este objetivo social se ha continuado en el tiempo y por eso todo lo que hacemos tiene que ver con la experiencia práctica de la tecnología y por eso tenemos este instituto que tiene como objetivo implantar una IA que funcione bien en la práctica, respetando a las personas.



Figura B1

Hay dos cosas importantes que quiero destacar porque tienen que ver con esta presentación. Primero, es tener a las personas siempre involucradas en el proceso y más que lo que se usa en inglés, *Human-in-the-loop*. Yo creo que las personas deben tener el control del sistema, pues nosotros somos los creadores. Es decir, si queremos jugar a ser dioses, tenemos que estar a cargo de estos sistemas y eso tiene que ver con predicciones catastróficas que son muy poco probables que ocurran, como que la IA nos va a destruir o que vamos a ser esclavizados por ella. Si uno ve la historia de la humanidad, lo primero que va a ocurrir es que algunos seres humanos usarán esta tecnología para avasallar a otros seres humanos que no la tienen. Y no estoy hablando necesariamente por la fuerza, hay también colonialismo cultural (Figura B2).

La segunda acotación es que hay una dependencia muy fuerte en los datos, es decir, muchas veces la solución es agregar más datos, pero la verdad es que el 99% o más de todos los problemas que tenemos en la Tierra, no tienen ni tendrán datos masivos, es decir, *big data* es una quimera, es un sueño y tenemos que preocuparnos de cómo hacer

buenas soluciones, buenos algoritmos para cuando tenemos pocos datos. Por ejemplo, la mayor parte de las compañías en Chile, yo diría que todas menos cinco y tal vez son menos, NO tienen datos masivos, porque datos masivos no solamente significa volumen, sino también implica la velocidad con que llegan los datos y para eso tienen que ser compañías que reciban información permanentemente por Internet con una gran tasa de ancho de banda.

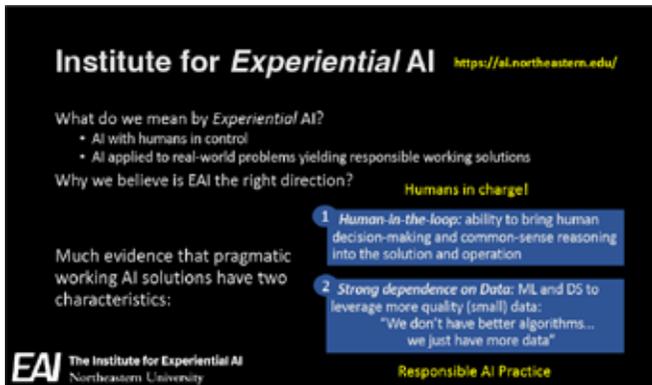


Figura B2

Y por esto tenemos un servicio que llamamos *Práctica Responsable de la IA*, que es la base de esta presentación, donde trabajamos con empresas, principalmente en Estados Unidos, ayudándolas en todos los aspectos que van desde los principios pasando por la gobernanza y llegando a la parte técnica, incluyendo auditorías de modelos, cuando lamentablemente hay problemas.

Para continuar me gustaría explicar que es la IA responsable, y primero no es la IA ética, ya que la IA ética no existe conceptualmente. La ética, la justicia, la confianza, las alucinaciones, son características humanas y no tenemos que humanizar la tecnología. Es decir, no podemos asociar la ética a una máquina o la justicia o la confianza, eso tenemos que dejarlo con los humanos. Voy a volver sobre este punto, pero si empezamos a humanizar la tecnología pasamos a la película *El hombre bicentenario*, y decir que los robots tienen derechos al igual que un ser humano no tiene ningún sentido porque son creaciones nuestras.

Otro término que se usa mucho, lamentablemente, en programas de investigación de la Unión Europea y de Estados Unidos, es lo que se llama la *IA Confiable* y también tenemos problemas con este término porque primero, sabemos que la

IA no funciona todo el tiempo, es decir, podemos tener un sistema muy bueno que un 90% del tiempo funciona, pero un 10% del tiempo no funciona. Por ejemplo, ¿Cuántos de ustedes se subirían a un ascensor que dice que funciona al 99% del tiempo? Eso para mí no es ingeniería de verdad, parece más alquimia. Yo me subiría al ascensor si dijera que no funciona el 1% del tiempo y cuando no funciona, se detiene. Pues entonces sé que estoy seguro, pero eso no es lo que está ocurriendo hoy en día con la IA. Y por esto, pedir que la IA sea confiable es poner todo el peso de la decisión en el usuario, lo que no corresponde pues creo que incluso no es ético hacerlo, por eso es que usamos IA responsable. De hecho, me gusta usar un ejemplo: si hace 100 años atrás alguien hubiera dicho, tengo un nuevo método de transporte, la compañía se llama *Aviación Confiable* y voy a venderte un pasaje en un avión. Si tienen que poner aviación confiable yo sospecho inmediatamente que hay un problema si tienen que decir que es confiable (Figura B3).

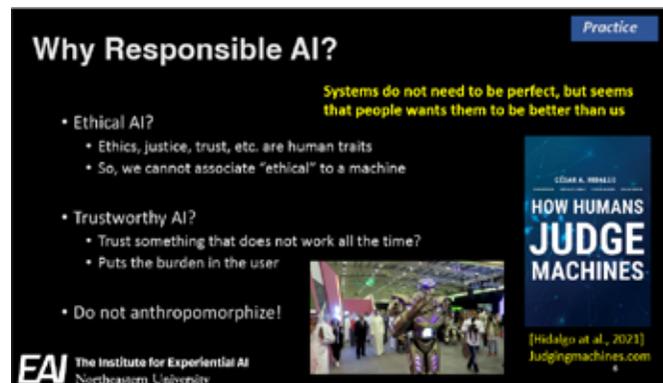


Figura B3

César Hidalgo publicó en el año 2021, chileno que trabaja ahora en Francia, un libro muy interesante en que explora, usando todo lo que es *Amazon Mechanical Turk*, una herramienta para hacer preguntas a mucha gente, en este caso de como los seres humanos juzgamos a las máquinas. Uno de los resultados interesantes es que somos más duros con las máquinas que con las personas, es decir, errar es humano, pero no para las máquinas y esto es una contradicción, una paradoja, porque las máquinas están aprendiendo de nosotros (Figura B4).

Bueno, ahora daremos ejemplos de IA irresponsable, porque si no sabemos cuáles son los problemas, es muy difícil concretar la segunda parte que es cómo lo tenemos que hacer

bien. Y estos son los 6 problemas más importantes en mi opinión y hay un sesgo personal aquí, el primero es el más conocido ya que es el más popular en las noticias y es la Discriminación Automatizada. A las mujeres, a minorías, incluso a grupos que no se conocían hasta que el sistema lo discriminó. Y después voy a explicar el resto excepto el comercio injusto, pues no tendré tiempo para hablar de eso.

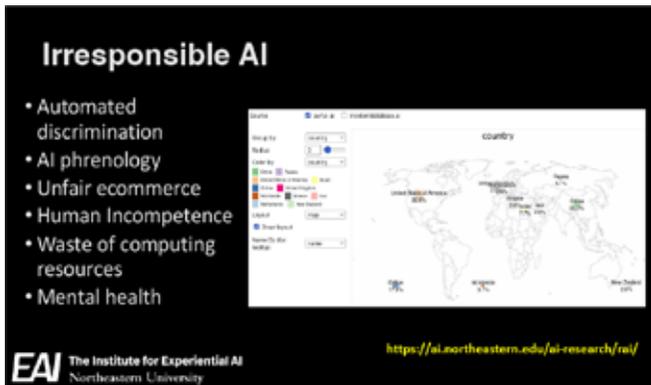


Figura B4

Resumiendo, hoy en día todo el comercio digital, mal llamado electrónico, es injusto. Respecto a la incompetencia humana, podemos recordar el famoso dicho de Einstein, si es que es de Einstein; el mal uso de los recursos y el problema medio ambiental y claramente el que más me preocupa hoy en día, aparte de la desinformación, es la salud mental de las personas.

Nosotros hicimos un atlas de la IA irresponsable con dos bases de datos y la segunda es muy buena, se llama insidentdatabase.ai que tiene más de seiscientos ejemplos confirmados de problemas, la mayoría que tiene que ver con discriminación, pero en esta pequeña que se llama IA horrible (awful.ai), y pueden ver que la mitad de los problemas están en Estados Unidos o en China, son las dos grandes potencias en esta base de datos pequeña (Figura B5).

El primer problema tiene que ver con la maldición de los sesgos. Ahora, todos los algoritmos reciben datos sesgados, porque la información es sesgo, es decir, si uno recibe datos aleatorios no sirven de nada. Entonces, el primer sesgo que tenemos, es que pensamos que sesgo es algo negativo y, en eso las noticias ayudan, porque siempre hablan del sesgo negativo, pero en principio, el sesgo es neutral. Y dependiendo del caso, puede ser positivo o negativo, por

ejemplo: paridad de género es algo positivo; cualquier acción afirmativa, como se llama en EEUU, por ejemplo, el apoyo a minorías, es un sesgo positivo ya que estamos tratando de cambiar los sesgos negativos de la sociedad.

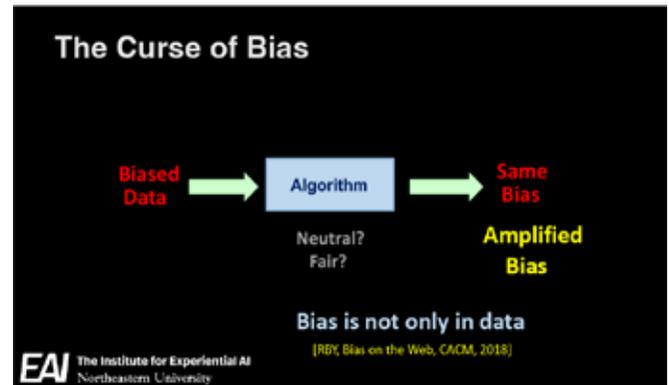


Figura B5

De ahora en adelante, voy a usar sesgo solamente en el sentido negativo, pero tenemos que estar muy conscientes que tenemos un sesgo cuando usamos o escuchamos esa palabra.

¿Debería preguntarse el algoritmo si tiene que ser neutral con respecto a ese sesgo, por ejemplo, no preocuparse del género o debería ser justo? Bueno, la mayor parte de los algoritmos no se hacen esta pregunta, no son personas tampoco y tenemos en la salida el mismo sesgo, pero puede ser peor, podemos también amplificar ese sesgo. Ahora, si el algoritmo amplifica el sesgo, no le podemos echar la culpa sólo a los datos y, esto es lo que yo expuse en un artículo que escribí en el año 2018, que salió en la revista más importante de computación, “Communications of the ACM”, sobre todos los sesgos que hay en la web, que es un círculo vicioso y, que muestra que la fuente de los sesgos no están sólo en los datos, sino que también están en los algoritmos y en la interacción de las personas con los algoritmos (y por la importancia del tema más de veinte mil personas han descargado este artículo) (Figura B6).

Déjenme mostrarles un ejemplo de lo que estoy hablando, es un trabajo que me gusta mucho, fue hecho por cuatro científicos de la computación de primer nivel de Estados Unidos, hecho a petición de la Oficina Nacional de Economía de Estados Unidos, no de la Oficina de Justicia que podría haber sido, pero por supuesto los jueces no quieren ser reemplazados y yo les voy a dar razones de por qué no

deberían ser reemplazados. Ellos estudiaron tres cuartos de millón de casos de fianzas en el Estado de Nueva York y, mostraron que, si las predicciones del sistema de ayuda en la toma de decisiones de los jueces eran correctas, se podía disminuir la tasa de crimen en 25%, manteniendo la misma cantidad de gente en la cárcel o se disminuía la tasa de cárcel en 42%, manteniendo la misma tasa de crimen. Esto suponiendo que las predicciones son correctas, recuerden, todas estas inferencias son predicciones, no son verdades absolutas. Ahora, incluso el sistema indica que los jueces liberan al 50% de los criminales más peligrosos, de los cuales el 56% no vuelve a la Corte y el 62% delinque de nuevo. Ahora, algo muy interesante en el Estado de Nueva York que es muy distinto a otras partes del mundo, es que el juez tiene que tomar la decisión solamente tratando de predecir si la persona va a volver a la Corte o no, es decir, no puede tomar la decisión basado en si puede cometer un crimen o no. Para mí es sorprendente, porque si yo tengo un posible asesino serial delante, no correría el riesgo de que cometiera otro asesinato (Figura B7).

Este sistema amplifica el sesgo de los jueces. Aquí está el resultado final, de la gente que llega a la Corte, el 49% son negros y 33% son hispanicos, en total 82% de estas dos minorías. Ahora, aquí en rojo yo puse cual era el porcentaje de esas minorías en el Estado de Nueva York y solamente el 32% lo son, así que tenemos un sesgo que es más del doble aquí, que es parte de los sesgos sistémicos. Ahora, los jueces aumentan el sesgo negativo con respecto a los negros, el 57% no obtienen fianza, el 32% de los hispanicos que no obtienen fianza, disminuye un poco, seguramente porque hay más latinos blancos y aquí se nota un sesgo positivo. Pero las dos minorías aumentan al 89%. Ahora, el algoritmo de predicción usado es una variante no lineal de los árboles de decisión llamada Gradient Boosting Decision Trees que es algo más simple que una red neuronal profunda, la cual no se puede usar pues no tenemos suficientes datos. Y muy importante, el único dato demográfico que usa es la edad. Es decir, no hay ninguna forma directa de saber cuál es la etnia de estas personas. Bueno, el sistema, como ya dije, mejora la tasa de crimen en casi 25%, pero aumenta los negros al 60%, disminuye los latinos al 30%, es decir, aprende los dos sesgos que tienen los jueces y nuestras dos minorías aumentan al 90%, o sea un poco más. Lo bueno con los algoritmos es que nosotros podemos sintonizar el resultado y, por ejemplo, si usamos la tasa más baja tanto para negros como para latinos, conseguimos que el porcentaje baje al 80% en vez del 82% inicial, disminuyendo igual la tasa criminal en casi 23%. No tengo más tiempo de explicar este ejemplo en detalle, pero básicamente los jueces están tomando decisiones casi aleatorias, pues están dejando libre a personas de todo tipo de criminalidad si las predicciones de este sistema son correctas (Figura B8).

**Justice Example**

### Human Decisions vs. Machine Predictions

- Almost **760K** bail cases from New York (2008 - 2013)
- Decrease crime rate in **25%** keeping the jail rate **or**
- Decrease jail rate in **42%** keeping the same crime rate
- Judges bail **49%** of 1% most dangerous criminals that fail to appear **56%** & reoffend **62%** of the cases
- USA National Bureau of Economic Research  
[Kleinberg et al, JOE, 237–293, 2018]

**Amplified Bias**

EAI The Institute for Experiential AI  
Northeastern University

Figura B6

**Justice Example**

### Racial Discrimination

**GBDTs (age)**

	Crime Rate	Drop Relative to Judge	10%	15%	32%
Table 7: Racial Fairness					
Release Rate Distribution of Defendants (Base Rate)					
Judge	.1134 (.0038)	0%	.073 (.0039)	.1152 (.0037)	.0802 (.0034)
Algorithm Equal Bauding	.084 (.0048)	-24.64%	.084 (.0039)	.1023 (.0037)	.1007 (.0034)
Matches Judge on Race	.085 (.0048)	-24.64%	.073 (.0039)	.1152 (.0037)	.0802 (.0034)
Equal Release Rates for all Races	.073 (.0048)	-35.02%	.077 (.0038)	.1054 (.0033)	.1055 (.0033)
Matches Lower of Base Rate or Judge	.076 (.0048)	-22.74%	.077 (.0039)	.1152 (.0037)	.1029 (.0033)

EAI The Institute for Experiential AI  
Northeastern University

Figura B7

**Dilemma**

What is better?  
A biased (just) algorithm or a noisy judge?

**Noise: How to Overcome the High, Hidden Cost of Inconsistent Decision Making**  
Algorithmic Judgment is more efficient than human society. By Daniel Kahneman, Andrew W. Rosslerford, Linaea Ganesh, and Ron Bleier

Target charts showing accuracy levels:  
A. Exact (400)  
B. Noisy (100)  
C. Biased (140)  
D. Biased & noisy (90)

EAI The Institute for Experiential AI  
Northeastern University

Figura B8

Ahora, aquí entonces podemos hacer una pregunta, una pregunta falaz, que es ¿es mejor tener un algoritmo sesgado justo o un juez que toma decisiones incoherentes? Justo porque dos personas con un caso parecido, obtienen la misma condena, o sea, por ejemplo, no tiene fianza o tiene fianza, o lo que se llama un juez ruidoso, porque lo que pasa con los jueces toman muchas decisiones que no son coherentes en el tiempo, es decir, un día a uno para un caso lo deja libre y otro día para un caso muy parecido, lo deja en la cárcel. Ahora, ¿por qué es una pregunta falaz? Porque en realidad los jueces también son sesgados, así que en realidad tenemos que comparar los algoritmos que son como C, son sesgados y los jueces que son como D, son sesgados y también variables. Hasta hace dos años atrás yo usaba como ejemplo de esto un artículo muy interesante en la Harvard Business Review de Daniel Kahneman, premio Nobel de Economía, el primero en economía del comportamiento humano, y coautores, sobre el alto costo de tomar decisiones inconsistentes en el tiempo, que es lo que pasa con los jueces. Es más, un trabajo muestra que la peor hora para ver a un juez es después del almuerzo, porque si no ha comido, seguramente te va a tocar una pena peor. Pero hace dos años Daniel Kahneman, con Oliver Sibony y Cass Sunstein escribieron un libro completo sobre este tema, de lo que significa la incoherencia de nuestras decisiones, que es una falla en los juicios humanos (Figura B9).

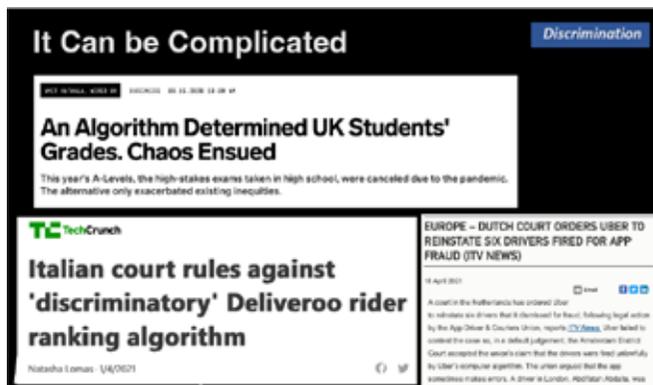


Figura B9

Pero esto puede ser un poco más complicado, en el año 2020 durante la pandemia, Inglaterra y Gales (aquí le pusieron Reino Unido, pero fue solamente Inglaterra y Gales) decidieron predecir los resultados de un examen para entrar a la universidad y por supuesto discriminaron a los colegios públicos. ¿Por qué? Porque es cierto que en

promedio los colegios públicos tienen peores estudiantes o aprenden menos, pero eso es en promedio. En todas las escuelas hay buenos estudiantes, lo mismo en colegios públicos o privados, y por supuesto esto discriminaba a los buenos estudiantes en las escuelas públicas. Al final no se usó porque mucha gente reclamó.

Otro caso muy interesante, es el de Deliveroo, una plataforma para repartir comida como Rappi o como Uber Eats. Había un grupo de personas que se sentían discriminadas porque ganaban menos que otro grupo de personas y no sabían exactamente por qué, ya que no tenían alguna característica común. La razón principal es que hay gente que no podía repartir de noche, por supuesto esa gente tenía menos trabajo. Así que la solución era muy simple, darle más trabajo a la gente que podía repartir de día durante el día, seguramente porque eran mujeres, porque eran personas que tenían hijos u otros dependientes o, por último, porque eran personas que no querían trabajar de noche y eso es completamente legal en la mayor parte de los países (Figura B10).



Figura B10

Y el peor caso de impacto político de un sistema mal hecho empezó en el año 2012 en Holanda. Un Ingeniero, seguro que era varón, aquí mi sesgo de género es intencional, decidió buscar fraudes en subsidios de Jardines Infantiles. Nadie le dijo que, si uno quiere buscar fraude, debe empezar por las personas ricas y no por las personas vulnerables, así que ya la idea no era ética, pero nadie le dijo que no lo podía hacer y seguramente ni siquiera preguntó si lo podía hacer. Y este sistema acusó falsamente a 26.000 familias de haber cometido fraude y las familias tuvieron que devolver mucho dinero porque se les acusó por el subsidio de varios años y los jardines infantiles en Holanda son caros. Mucha

gente perdió su casa, mucha gente tuvo que volver a su país de origen porque eran inmigrantes, es decir, fue un desastre social gigantesco. Finalmente, la Sociedad Civil demandó al Estado y esto fue a una Corte de La Haya que finalmente dijo que esto era ilegal y que el Estado tenía que compensar a todas estas familias. En muchos casos ya era muy tarde, pero la oposición en Holanda dijo que esto no era suficiente y el Ministro del Ministerio involucrado en ese entonces, el líder de la oposición que antes formaba parte del Gobierno, renunció en ese momento y dijo: yo soy responsable, pero yo no sabía que iba a ocurrir esto. Pero esto no fue suficiente, al día siguiente, el 15 de enero del año 2021, el primer Ministro de Holanda y todo su Gobierno renunció. Este ha sido el impacto político más grande de un sistema de software, da lo mismo si usa IA o no. Por supuesto tuvieron elecciones de nuevo y fue elegido el mismo Gobierno, pero ese ya es otro tema (Figura B11).

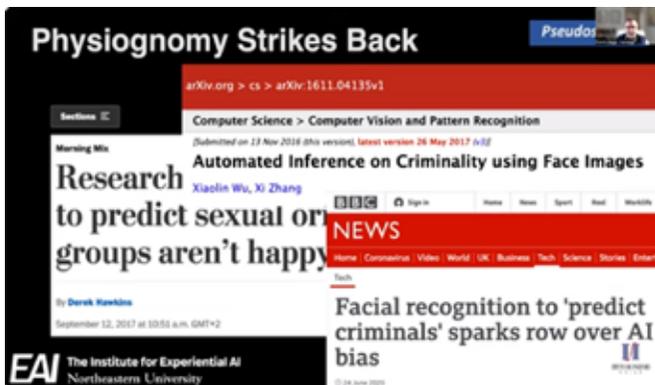


Figura B11

La discriminación debe ser el 80% de los problemas que tenemos hoy en día, pero hay otros temas que también son importantes y que tenemos que ser conscientes de ello. Y lo primero es la fisionomía, supongo que muchos de ustedes tal como yo cuando tuvieron filosofía en el liceo, aprendieron que, dependiendo de cuatro tipos de caras, había cuatro tipos de personalidad asociadas a esas caras. Hoy en día, sabemos que esto es pseudociencia, que no es cierto, que la cara no dice nada sobre nuestra personalidad, puede decir algo sobre nuestra etnia, pero no sobre nuestra personalidad. Pero, lamentablemente, hay personas que están haciendo esto de nuevo. Por ejemplo, el año 2017, Kosinski, un famoso psicólogo en Stanford, aquí muy cerca de donde yo vivo, decidió usar las caras para predecir las preferencias

sexuales. Por supuesto esto no funciona, estas son correlaciones espurias, tal vez a partir de la barba, el pelo y si uso aros u otras cosas puedo deducir algo, pero esto funciona solamente por eso, no porque realmente uno pueda inferir algo a partir de la cara. Y el estudio estaba mal hecho, hubo muchas críticas. Un año antes, en China decidieron hacer algo como en la película donde tres mujeres predicen si puede cometer un crimen en el futuro, Sentencia Previa (*Minority Report*). Este sistema, por supuesto, también es pseudociencia, incluso si funcionara, uno no puede arrestar a alguien antes de que cometa un crimen. Y por supuesto este trabajo tuvo muchas críticas y durante la pandemia un grupo de Estados Unidos intentó hacerlo de nuevo y esto casi se publica en una revista del grupo Nature hasta que finalmente una persona dijo: esto no es ético, esto no funciona, no se puede publicar. Así que es muy interesante que los comités de ética de las universidades, aprueban estas cosas, incluso los revisores y editores de revistas aprueban estas cosas, no se dan cuenta que son aplicaciones que no solamente no son éticas, sino que no funcionan pues no tienen sustento científico (Figura B12).



Figura B12

Kosinski volvió a la carga en el año 2021 prediciendo la orientación política a partir de la cara. Esto es más fácil en Estados Unidos porque son solamente 2, pero en países donde hay 10 partidos esto es imposible, imposible de predecir. Y esto es lo que se llama una frenología moderna. Para los que no saben que es una frenología, fue una pseudociencia que comenzó a finales del siglo XVIII en Alemania que postulaba que los criminales tenían distintas las convoluciones del cerebro, algo difícil de comprobar (Figura B13).



Figura B13

Pero esto puede ser peor, el MIT publicó en el año 2019 un trabajo, donde postula que, a partir de la voz, tú puedes reconstruir la cara de una persona. Yo podría creer que mi boca, mi cuello, tal vez todo lo que está bajo la nariz, tiene que ver con cómo yo hablo, podría creer eso; pero seguro que el color de mi pelo, mis ojos, mis orejas, mi nariz, mi frente, etc., no tiene nada que ver con mi voz. Lamentablemente esto fue publicado en un Congreso de Visión por Computador muy conocido. Y entonces este es mi algoritmo maestro que propongo para la frenología, ustedes me mandan mensaje por Whatsapp, yo reconstruyo la cara de ustedes y a partir de eso puedo saber si son opositores políticos, si son homosexuales, lo que en algunos países está penado, o si incluso van a cometer un crimen, imagínense esto en manos de un dictador. Incluso puedo saber el nombre de ustedes. Si, increíblemente la Oficina de Patentes de Estados Unidos adjudicó una patente a Mitre, donde dicen que pueden predecir el nombre de ustedes usando la cara. Tal vez funciona para Juan, José y María, pero se imaginan predecir el nombre de un niño de otra etnia que fue adoptado en Estados Unidos, por supuesto esto no funciona (Figura B14).

Bueno, pero esto puede ser mucho más complicado, hay una famosa neurocientífica de Northeastern, Lisa Feldman Barrett, experta en emociones, que demostró hace un par de años que las personas no podemos reconocer bien emociones, lo que reconocemos son estereotipos. Si una persona se ríe pensamos que está feliz, pero muchas veces puede estar nerviosa, si una persona llora pensamos que esta triste, pero podría estar feliz, etc. Y cuando usamos etiquetas generadas por personas para entrenar un modelo de aprendizaje automático, lo único que estamos haciendo, básicamente es redescubrir y peor, replicar

en el tiempo estereotipos que no tendríamos que tener (Figura B15).

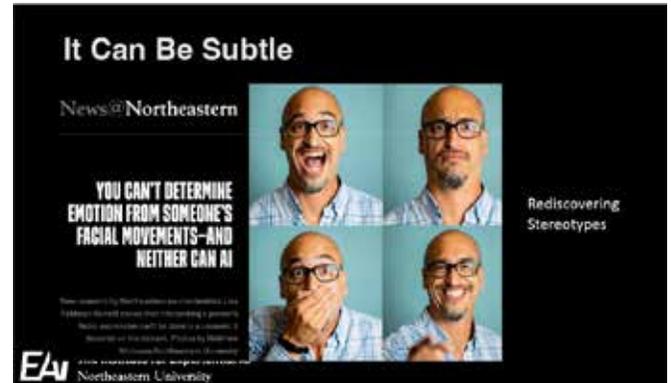


Figura B14

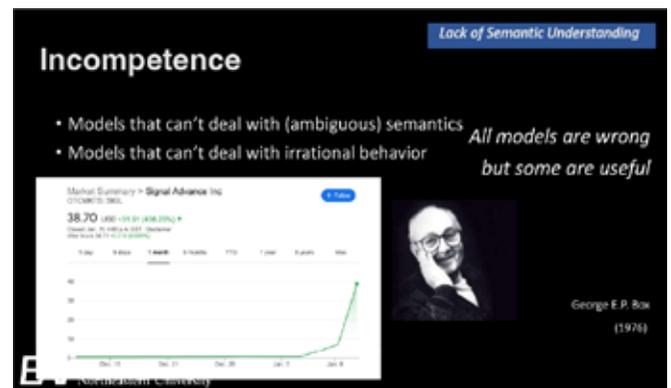


Figura B15

En el año 1976, George Box, un famoso estadístico, dijo que todos los modelos estadísticos estaban errados, pero algunos eran útiles. Hoy en día podemos decir lo mismo de la IA, sólo es estadística más avanzada. Veamos un primer ejemplo. Al final del año 2020, Elon Musk dijo: “usen Signal” por Twitter, que ahora se llama X gracias a él o por culpa de él, y una IA accionaria que usa datos de personas con influencia en las redes sociales infirió que estaba diciendo que había que comprar acciones de esta compañía que se llama Signal Advance en Texas y esta compañía subió de precio en más del 400% porque el modelo no se dio cuenta de que estaba hablando de otra cosa. Por supuesto, la compañía quedó muy contenta, pero toda la gente que siguió esta tendencia y que perdió mucho dinero no quedó nada contenta.

Aquí a la derecha tenemos un ejemplo de lo que se llama IA contra un adversario, donde yo cambio un pixel y la predicción del modelo cambia. Por ejemplo, aquí pueden ver que un perro cambia a gato con un 75% de confianza, o aquí un gato cambia a perro con un 78% de confianza, es decir, el cambio parece muy fácil y es muy confiable. Otro ejemplo de 2021: un ingeniero en Facebook decidió usar un modelo entrenado en inglés para encontrar palabras ofensivas y decidió que el pueblo de Bitche en Francia tenía que estar prohibido y eliminó la página Facebook de ese pueblo que tardó tres semanas en volver a tenerla porque no había tampoco ningún ser humano atendiendo a los reclamos. Por supuesto esto parece divertido, pero si ese pueblo está usando esa página para hacer anuncios sobre el COVID, eso no es nada de divertido y puede causar daño (Figura B16).

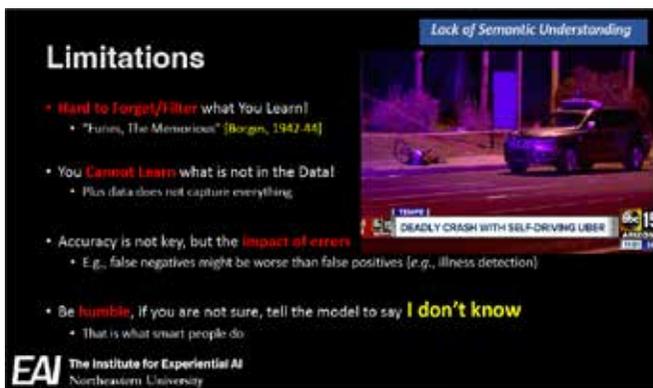


Figura B16

Ahora quiero recordar las limitaciones que hay en los sistemas de aprendizaje automático, me gusta mucho este cuento de Borges, espero que alguno lo haya leído, “Funes, el memorioso”, donde muestra cual es el problema de no poder filtrar información, de no poder olvidar nada, así que si alguien tuvo la mala idea de preguntarle a Funes como fue su mañana, te tienes que esperar unas cuatro horas porque contar tres horas seguro toma más de tres horas.

La primera limitación es que no se puede aprender lo que no está en los datos, esto es obvio, pero hay que decirlo y es importante, ya que los datos no capturan todo, los datos como se dice, son una aproximación de la realidad, no es la realidad misma y en muchos problemas los datos son una muy mala aproximación de la realidad y no deberían ser usados y eso lamentablemente tampoco es tomado

en cuenta. Y esto fue lo que pasó el año 2018 en Arizona, en Temple cerca de Phoenix, cuando una mujer cruzó de noche en bicicleta donde no debía y un auto autónomo de Uber no se dio cuenta y la atropelló. El auto llevaba un conductor de emergencia, pero esa persona tampoco la vio, y ya voy a explicar por qué, pero, básicamente, eso era algo que no estaba dentro de los datos de entrenamiento. Los entrenamientos generalmente son con casos normales, no con casos raros y uno de los problemas es que la mayoría de los datos de entrenamiento de cualquier sistema están en el futuro, así que no existen todavía. Y, por supuesto, todos ustedes han visto accidentes en YouTube donde uno dice: esto no puede ser cierto, pero fue. Por todo esto, a mí no me importa cuando funciona el sistema, lo que realmente me importa es cuál es el impacto de los errores. Yo estoy trabajando con un estudiante de doctorado en lo que yo llamo errores en no humanos. Seguro que todos ustedes habrían reconocido a una mujer cruzando en bicicleta si están con todas sus capacidades físicas adecuadas, no tiene sueño o no tomaron alcohol, etc. Otras veces, el punto de operación de este sistema no es el de mayor exactitud o el de mayor correctitud, si no que depende de los valores sociales que tengamos. Por ejemplo, he hablado con doctores que me dicen que están dispuestos a ver 10 veces más personas sanas para no dejar escapar a una persona que está enferma de cáncer. Es decir, en este caso los falsos negativos tienen mucho más valor social que los falsos positivos: decirle a una persona que está enferma cuando no lo está. Finalmente, para los ingenieros en computación que hay en la audiencia tenemos que decir no sé cuándo no sabemos, es lo que hacen las personas inteligentes. Lamentablemente todos estos sistemas dan una respuesta incluso cuando la confianza del sistema es baja (Figura B17).

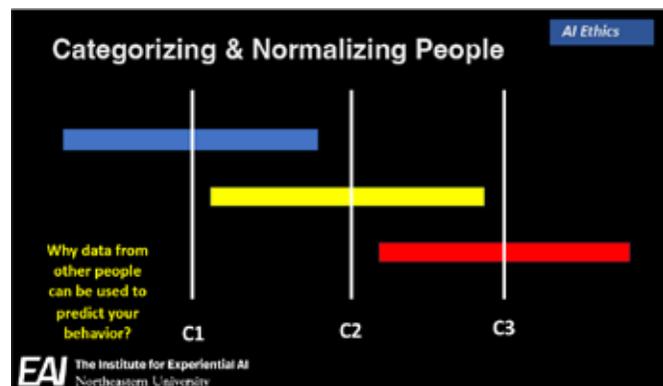


Figura B17

Ahora, hay un tema más de fondo que estoy tratando de investigar, que es más complicado y es que muchas veces lo que hacemos es que inventamos categorías que no existen y daré ejemplos más adelante. Por ejemplo, usemos las categorías que se usan en Chile para el nivel económico, pongamos que estos son A, B y C, con unos umbrales arbitrarios en donde se dividen. Pero que es lo que pasa, si tomamos cualquier otra variable, por ejemplo, nuestro nivel de educación, lo que va a pasar es que en esa variable hay traslape, no están separadas y cuando uno usa estas categorías para tomar decisiones, por ejemplo, bancarias, ya cometemos un error. Por ejemplo, imagínese una persona de una categoría económica baja que va por primera vez a un banco. El sistema actualmente toma datos de personas similares y predice si esa persona va a ser un buen cliente o no. Es muy probable que la predicción va a ser que es un mal cliente porque viene de una clase económica que tiene menos dinero y en promedio como dije antes, puede que sea cierto, pero en general no es cierto así que vamos a discriminar y favorecer personas sin tener ninguna demostración científica que diga que datos de otras personas pueden ser usadas para predecir mi comportamiento la primera vez o incluso siempre, porque yo soy una persona única, las personas no venimos de una distribución de probabilidad (Figura B18).

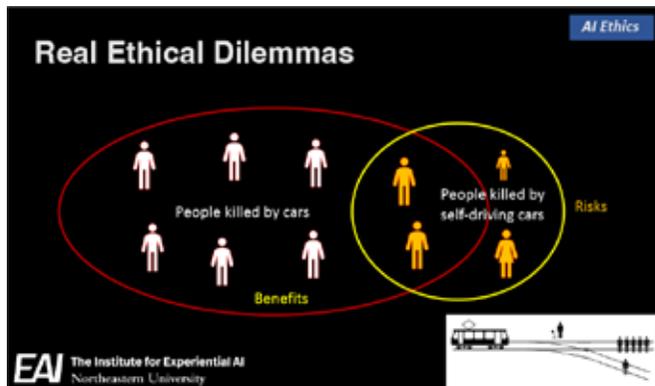


Figura B18

Y si tienen un problema ético adicional, supongo que todos conocen el famoso problema del tranvía, donde el tranvía va a matar a cinco personas, pero si yo desvío el tranvía mato una sola persona, pero lo desvío yo, así es que yo la mato. Bueno, olvídense del problema del tranvía nunca lo van a tener en su vida, pero hoy tenemos un problema con los autos autónomos. Supongamos que esta es la o las personas

que va a morir en accidentes, por supuesto van a morir muchas personas por los autos autónomos porque no se quedan dormidos, no ven el celular, no beben alcohol, etc., pero el problema es que van a matar algunas personas que antes no estaban en peligro de morir y ese es el problema ético. Porque seguramente, vamos a salvar un montón de hombres que estaban con alcohol o, por ejemplo, yendo muy rápido y vamos a matar tal vez a un niño que cruzó la calle muy rápido para recoger una pelota, se agachó sobre la pelota, pareció una pelota y el auto pasó sobre la pelota. O, por ejemplo, una persona mayor que se quedó completamente inmóvil porque no podía caminar muy rápido y del pánico no se movió y el auto pensó que era un objeto inanimado y fue sobre ella. Ese es el problema, vamos a matar a algunas personas vulnerables y vamos a salvar algunos hombres irresponsables, estoy exagerando, pero es solamente para que vean que es el dilema, no tengo respuesta a este dilema es casi personal, cada uno tiene que decidir que es mejor y supongo que hay que ponerle números. Cuantos números hay aquí y es difícil de ponerle número a las vidas de las personas (Figura B19).

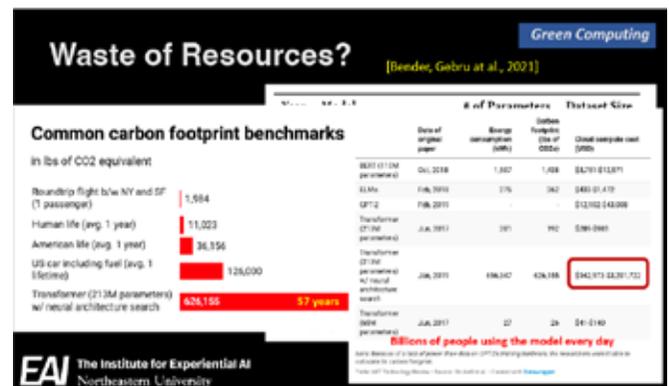


Figura B19

El penúltimo tema es el mal uso de recursos, por ejemplo, el famoso trabajo de Bender et al. que causó que tanto Timnit Gebru como Meg Mitchell fueran despedidas de Google. Muestran que entrenar un modelo de lenguaje como ChatGPT, mucho más pequeño, solamente con 200 millones de parámetros, son básicamente 57 años de la huella de carbono de una persona promedio en la Tierra. O, por ejemplo, que usamos entre 1 y 3 millones de dólares en electricidad, pero el problema no es solamente entrenar estos modelos, es usarlos, pues hay miles de millones de personas que usan estos modelos cada día

y hay un trabajo reciente que muestra que cada vez que usamos ChatGPT es como tirar medio litro de agua en el desierto (Figura B20).



Figura B20

ChatGPT es un ejemplo de IA Generativa, donde por la ley del mínimo esfuerzo, vamos a empezar a involucionar en vez de evolucionar, porque la gente no va a saber ni siquiera escribir una carta en 10 años más y no va a querer pensar, porque para que voy a pensar si la IA puede hacer todo por mí. El tema no es escribir, el tema es poner nuestros pensamientos en palabras. Eso es parte de lo que nos distingue como seres humanos (Figura B21).

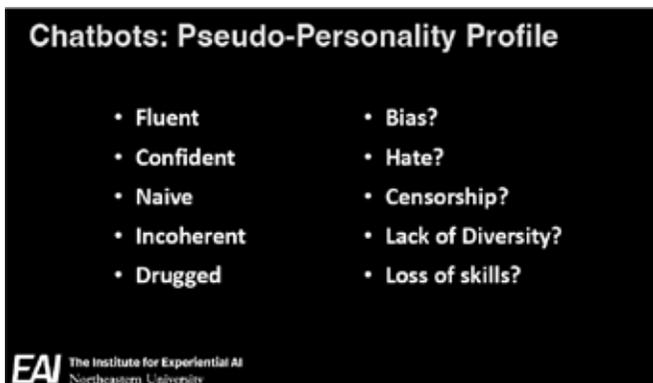


Figura B21

Si caracterizamos a un chatbot con una pseudo personalidad porque no son humanos, ellos “escriben” muy bien, parece que tienen mucha confianza, pero son ingenuos, porque creen cualquier mentira que yo digo, son incoherentes y

parecen drogados si también alucinan, pero por supuesto, no alucinan, cometen errores. Y tenemos temas de sesgo, de odio, de censura implícita, cuántas cosas que no vemos porque están censuradas y no sabemos. Falta de diversidad, ChatGPT funciona en 95 idiomas, pero ¿saben cuántos idiomas vivos hay? Hoy en día hay 7.100 y el 15% de la población mundial no habla alguno de esos 95 idiomas. Los estamos dejando de lado y estamos incrementando la brecha digital, así que no solamente es la falta de Internet, es no conocer algún lenguaje de los que usan estas herramientas, no tener la capacidad de ser digital, etc. Hoy en día, más de la mitad del planeta no tiene la oportunidad de usar estas herramientas y por ende la brecha digital está aumentando rápidamente en vez de disminuir. Y finalmente, como ya dije, vamos a perder muchas habilidades, la mayoría de la gente en este planeta ya no puede encontrar un lugar sin usar el GPS, algo que tardamos cientos de miles de años en perfeccionar y poder volver a nuestra cueva sin ni siquiera una brújula (Figura B22).



Figura B22

Bueno, pero la realidad es mucho más complicada, seguro que ustedes vieron esto del Papa o Trump este año, imágenes muy bien hechas que son falsas y, que implica que hoy en día es muy fácil tener un video donde yo pongo una persona con su voz que dice lo que yo quiero y en el idioma que yo quiera (Figura B23).

Incluso hace dos semanas, Microsoft lanzó su propia herramienta para hacer lo que se llama una mentira profunda o *Deep Fake* por el uso del aprendizaje profundo, redes neuronales de muchas capas (Figura B24).

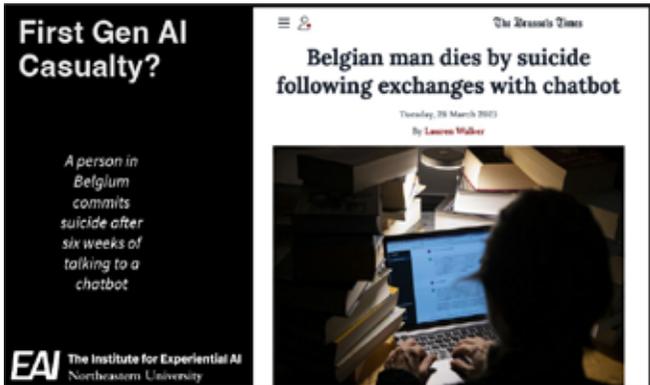


Figura B23

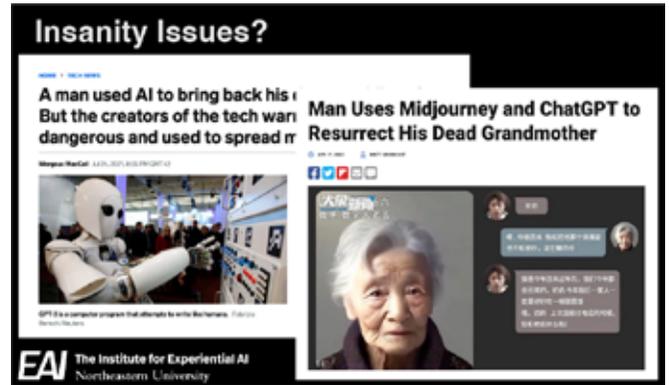


Figura B25



Figura B24



Figura B26

Y esto es muy fácil de abusar. Este es un caso que lamentablemente ocurrió en un pueblo pequeño de Extremadura en España, donde adolescentes usaron una de estas herramientas para desnudar a sus compañeras mujeres y por supuesto poner esto en redes sociales. A una de ellas incluso la extorsionaron y esto causó un escándalo en España porque tampoco es muy claro que hacer con un adolescente que usa esto para, básicamente, acosar sexualmente a sus compañeras. Ya tenemos un problema de ética y moral, muy grande (Figura B25).

Pero hay cosas que tienen que ver con la sanidad mental que ya mencionaba antes. Por ejemplo, en el año 2021 un ingeniero hizo una versión especializada de Chat basada en GPT 2 para hablar con su novia muerta. Cada vez que estaba triste hablaba con su novia muerta, Jessica. Este año un chino incluso resucitó a su abuela con video usando Midjourney y Chat GPT, y cada vez que quiere habla con su abuela, con la imagen y voz correcta, ¿es sano esto?, no estoy seguro, pero las cosas se vienen más complicadas (Figura B26).

De hecho, el 23 de marzo de 2023, en el periódico *The Guardian*, uno de los próceres de la realidad virtual dijo: “el peligro no es que la IA nos destruya, el peligro es que nos vuelva locos”. Bueno, yo concuerdo con él, pero lo que ni él ni yo sabemos es que iba a tener razón solamente 5 días después.

Una persona en Bélgica, después de hablar por seis semanas con un chatbot que llamaba Eliza, se suicidó, y por si ustedes no saben, el primer chatbots se llamaba Eliza, hecho en el MIT en los 60s. El que lo hizo, fue uno de los pocos científicos que dijo inmediatamente que la IA era peligrosa y eso hace más de 40 años (Figura B27).

Y les quiero dejar leer la última conversación que parece tomada de una película de ciencia ficción. Y por favor decidan si el chatbot ayudó a la persona a suicidarse y espero se den cuenta que hay una suposición implícita de que después de morir se iba a encontrar en el más allá con este chatbot. Y les puede recordar la película *ex Machina* si la vieron (Figura B28).



problemas en forma independiente de la tecnología porque van a aparecer otras tecnologías que vamos a tener que regular que van a ser usadas para los mismos problemas. Esto va a ser un camino largo, tedioso, tal vez con mucho trabajo para los abogados, pero muy mal para el resto del mundo. Esto también incluye ahora la IA generativa, aunque fue difícil pues Italia, Francia y Alemania, los tres países principales, no se ponían de acuerdo en la parte de los modelos de lenguaje abierto y también yo creo en temas como reconocimiento facial que fue prohibido inicialmente por el parlamento, pero que seguro que Gobiernos como Hungría o Polonia quieren poder usarla. Al final sólo se permitió su uso para tres casos específicos, incluyendo terrorismo. Es importante recordar que esta regulación no incluye el ámbito militar (Figura B31).

se publicó en noviembre de 2023, van a cambiar muchas cosas porque ahora se define lo que es una IA segura, pero lamentablemente todavía usan la palabra confiable, que para mí es un error conceptual (Figura B33).



Figura B31

Y otro problema que tiene esto, es que genera categorías que no existen, el riesgo es una variable continua. Ya cometimos el error muchas veces, por ejemplo, las razas no existen, el color de piel es una variable continua, no hay sentido no tiene sentido decir donde se divide lo claro con lo oscuro, etc. Y lo mismo está pasando aquí, el riesgo es una variable continua que no sabemos ni siquiera como medir y por supuesto la vamos siempre a subestimar (Figura B32).

Otro problema de la propuesta de la Unión Europea es que habla solamente de inteligencia artificial. En octubre de 2022, cuando por primera vez Estados Unidos publicó un anteproyecto para regular el uso de la inteligencia artificial, dejó muy claro que era para cualquier sistema automatizado, es decir no solamente la IA, porque cualquier software, cualquier sistema tiene que ser regulado de la misma manera. Y ahora con la orden ejecutiva que



Figura B32

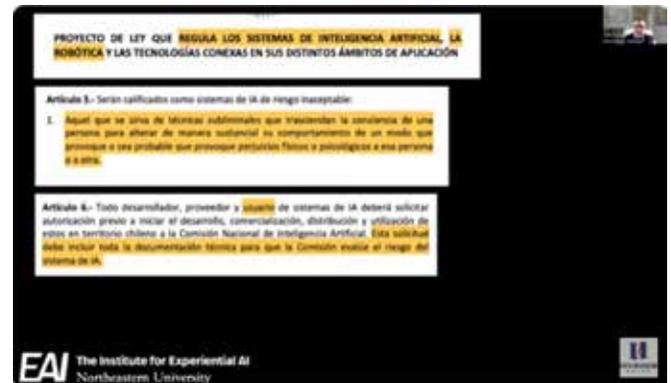


Figura B33

Ahora, me invitaron de la Cámara de Diputados a hablar sobre la propuesta del diputado Lagomarsino que está basada en la de la Unión Europea y aquí muestro los problemas más importantes que encontré y que mencioné en noviembre de 2023 en la Cámara de Diputados; primero regula los sistemas de Inteligencia Artificial, error conceptual, pues debiera decir que regula el uso de la IA, no la IA misma. También dice que regula la robótica, después no se menciona la robótica en toda la propuesta, así que ya en el título hay dos problemas (sin contar que no cubre todo tipo de software). El artículo que muestro está copiado de la propuesta europea, es uno que dice que no se pueden usar técnicas subliminales, que afecte la consciencia de una persona para alterar de manera sustancial su comportamiento de un modo que provoque o

sea probable que provoque perjuicios físicos o psicológicos a esa persona u otra, lo que aparece dos veces y podría haberse escrito mejor. Pero cuál es el problema, es muy difícil de hacer cumplir esto, por ejemplo: si uno cumple esto al pie de la letra, no debería mostrarle una publicidad en la web de una torta a un diabético o de comida rápida a una persona que tiene obesidad mórbida, imposible de controlar, es como el famoso derecho a ser eliminado de la web, sí, yo puedo eliminarlo de la web, pero al día siguiente otra persona lo vuelve a poner. Hay cosas que técnicamente no se pueden hacer y que la gente que escribe estas cosas no las entiende. El artículo 6 por ejemplo, no sé porque, pide que los usuarios tengan autorización para estos sistemas, no tiene ningún sentido. Y pedirle a los desarrolladores y proveedores toda la documentación técnica es como se dice en inglés “*Wishful Thinking*” (ser ingenuos), porque nadie va a dar toda la documentación técnica y por ende es difícil evaluar el riesgo. Es mejor pedir que se haga un análisis de impacto ético que es parecido a un análisis de impacto ambiental. Eso sí tiene sentido y espero que eso ocurra en el futuro (Figuras B34 y B35).

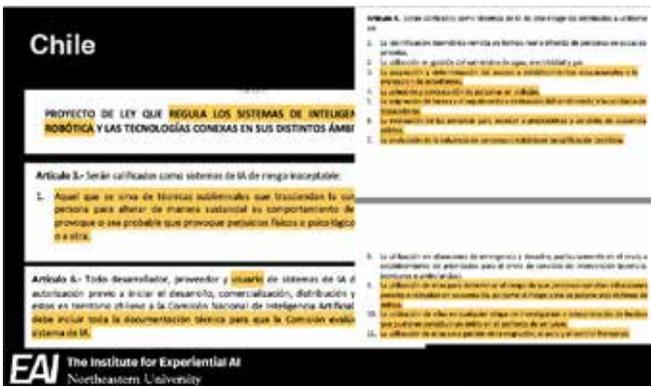


Figura B34

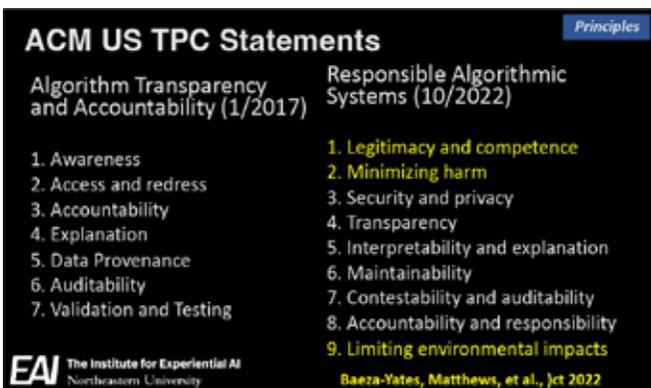


Figura B35

Y finalmente el artículo 4 que son los sistemas de alto riesgo en Europa, bueno aquí tengo marcados sistemas que para mí son más peligrosos, porque tienen que ver con esta parte no ética y de pseudociencia que les mencioné antes, cualquier cosa que pone en peligro el futuro de una persona no puede ser usada porque, aunque funcione el 95% del tiempo, si yo destruyo la vida del 1% de las personas, el costo social es mucho mayor que las veces que funciona. Y esto es justicia, esto es educación, estos son ofertas de trabajo etc., al que le interese le puedo mandar esto después con todas las partes que tienen problemas para mí.

En octubre de 2022 en la ACM, la asociación profesional de informáticos más grande del mundo, creamos el nuevo conjunto de principios para sistemas algorítmicos responsables, donde soy uno de los dos coautores principales y empujé sobre todo el primer principio que se llama legitimidad y competencia. Antes de hacer cualquier cosa uno tiene que mostrar que el sistema es legítimo para la sociedad, es decir, que tiene más beneficio que daño en una gran proporción y que se tienen las competencias para llevar el proyecto a cabo, incluyendo la competencia administrativa. Así es, muchas veces el problema ha sido que personas han hecho algo que no debían hacer pues no tenían el permiso de la autoridad correspondiente, como seguramente ocurrió en el caso de Holanda (Figura B36).

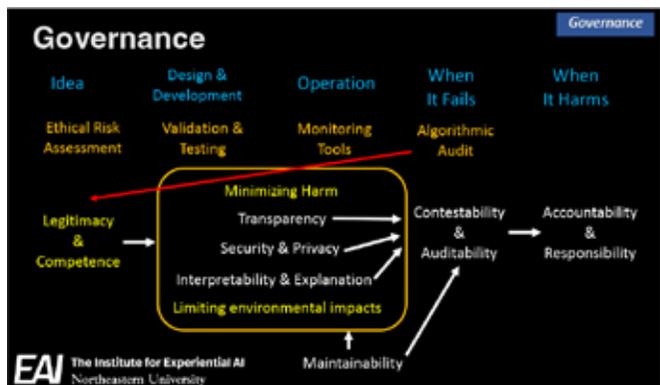


Figura B36

Aquí está la gobernanza porque estos principios tienen un orden temporal. Comenzamos con la legitimidad y competencia y para eso tenemos que hacer un análisis de impacto ético, luego, durante el diseño y desarrollo tenemos que hacer la validación y testeo, la operación la tenemos que monitorear todo el tiempo para asegurarnos de que

sigue funcionando como debiera funcionar, manteniendo en el tiempo el sistema. Cuando falla tenemos que tener lo que se llama derecho a reclamo y el derecho de auditoría y ahí tenemos que tal vez hacer una auditoría algorítmica. Y finalmente, si realmente dañamos a una o más personas, ya es muy tarde, tenemos que ir a la corte y tenemos que ser responsables y rendir cuentas de los hechos. Ahora, muy importante, nunca hay que hacer una auditoría a un algoritmo ilegítimo porque entonces lo legitimamos y lamentablemente mucha gente ha hecho auditorías a sistemas que no deberían existir y lo legitiman. Por ejemplo, sistemas que usan juegos para decidir cuál es la mejor persona para un trabajo, no hay ninguna ciencia que diga que un juego puede decidir quién es la mejor persona para un trabajo (Figuras B37, B38 y B39).

Veamos ahora un ejemplo de rendición de cuentas, ¿quién fue responsable cuando una mujer murió atropellada en Arizona por un auto autónomo de Uber? Debería haber sido Uber pero en menos de una semana la compañía llegó a un acuerdo con la familia y no hubo demanda de parte de ella. Al mismo tiempo Uber dio la información de que la persona que estaba de conductor de emergencia, una mujer, estaba viendo un video en ese momento y por eso no había respondido a las señales del auto. La verdad es que el auto autónomo se dio cuenta solamente dos segundos antes de chocar, de que era una bicicleta, así que la conductora de emergencia no pudo hacer nada en tan poco tiempo, pero lamentablemente el Estado de Arizona tuvo que acusarla de homicidio involuntario y en 2023 se declaró culpable, cuando ya estaba con arresto domiciliario y una anilla en su tobillo, es lo que ponen en Estados Unidos para que la gente no pueda salir de su casa. Ahora, solamente en 2022 finalmente en una entrevista a la revista Wired, esta persona habló, una mujer transgénero inmigrante de México. Era el único trabajo que había podido conseguir ganando el salario mínimo. Es decir, al final una persona vulnerable fue responsable del accidente y por supuesto era un trabajo muy aburrido, porque el auto funcionaba muy bien hasta que no funcionó, que es lo que pasa en la inteligencia artificial, uno no puede saber cuándo no va a funcionar, es muy difícil predecir eso.

Por todo lo anterior nosotros tenemos un esquema de IA responsable donde ayudamos a las empresas a tener una gobernanza responsable de la IA, a realizar los análisis de impacto ético/social de algún producto o proyecto, y nos encargamos del entrenamiento de las personas tanto al

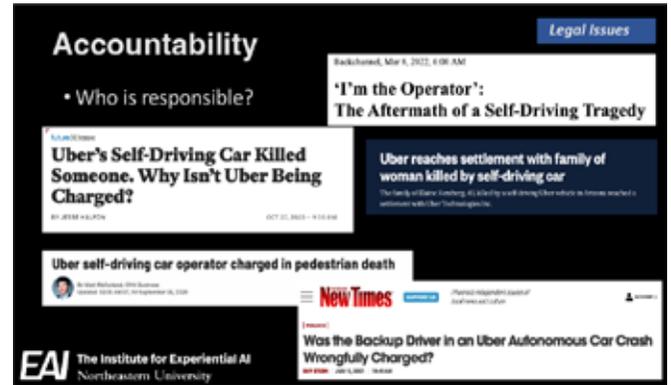


Figura B37

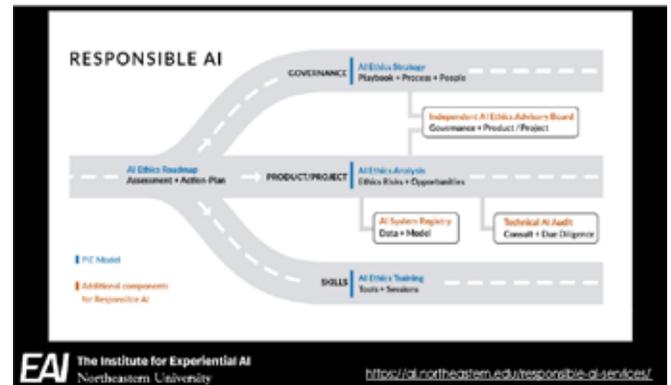


Figura B38



Figura B39

nivel más alto, como el nivel de gerentes hasta el nivel de ingenieros.

Y en julio de 2022 creamos el primer Comité Consultivo Internacional de Ética de la IA, que son 50 personas de

todo el mundo, con culturas distintas y una diversidad muy amplia de temas distintos, de modo que cualquier institución puede usar este comité para tener un consejo privado de alto nivel. Esto resuelve varios problemas: primero, no existen suficientes expertos para tener un comité de ética para cada empresa; segundo, siempre uno tiene un conflicto de interés consigo mismo si el comité es interno; y tercero, este comité no se necesita todo el tiempo (Figura B40).



Figura B40

Y esto es un problema multidisciplinario, no es solamente computación sino también diseño, ciencias sociales, la filosofía donde radica la ética, y también todo lo que tiene que ver con leyes y políticas tecnológicas (Figura B41).



Figura B41

Para terminar, quiero focalizarme en la última frase: lo que hay que hacer es empoderar a las personas, hacerlas mejores, no querer reemplazarlas. Y eso es parte del problema que vemos, que muchas compañías intentan reemplazar personas

en vez de ayudar a las personas a ser mejores, más productivas. Otra cosa muy importante, que es que no podemos tener ética en la IA, si no hay ética en las personas. Ética es algo que falta en todo el mundo y en Chile tenemos el famoso caso que, en vez de mandar a unos empresarios a la cárcel, los mandan a hacer unas clases de ética y seguro que con una persona más pobre eso no ocurre (Figura B42).

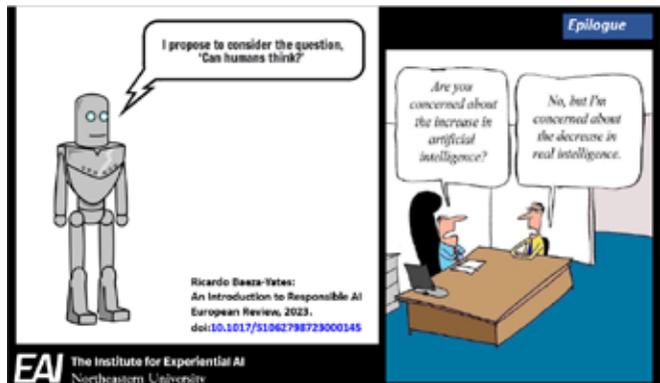


Figura B42

El epílogo es que no estoy preocupado de la Inteligencia Artificial, estoy preocupado de la falta de Inteligencia Natural, porque me gustaría terminar con esta pregunta que la hace ahora la inteligencia artificial, ¿podemos pensar? Hay que mantener la lucidez, creo que estamos pensando poco y estamos creyendo que la inteligencia artificial es más de lo que es.

Gracias.

### Sr. José García Conejeros.

—Quisiera expresar mi agradecimiento a Silvana y Juan Carlos por extenderme esta invitación. La presentación de Ricardo nos invita a una profunda reflexión sobre aspectos cruciales en la industria de la Inteligencia Artificial, especialmente en lo que respecta a la ética, los sesgos inherentes y la importancia de abordar estos temas desde una perspectiva integral desde el inicio del proceso de desarrollo de modelos.

A lo largo de mi carrera, he tenido la oportunidad de desempeñar varios roles en la industria, incluyendo el de científico de datos y gestor de equipos encargados de

construir soluciones avanzadas en este campo. Paralelamente, mi vinculación con el ámbito académico me ha permitido liderar proyectos de investigación y supervisar trabajos estudiantiles, lo cual ha enriquecido mi comprensión y enfoque hacia la Inteligencia Artificial.

A menudo, el foco de atención se centra en el algoritmo, percibido como el elemento más relevante del proceso. Sin embargo, para materializar estos desarrollos teóricos en aplicaciones prácticas exitosas, es fundamental incorporar una variedad de componentes adicionales que aseguren la efectividad de las soluciones propuestas. Esta experiencia subraya la importancia de adoptar un enfoque holístico en el desarrollo de proyectos de Inteligencia Artificial, considerando no solo la precisión técnica, sino también el impacto ético y social de nuestras innovaciones (Figura C1).



Figura C1

La finalidad de esta exposición es compartir algunos casos prácticos en los que he tenido la oportunidad de participar directamente. Opté por seleccionar ejemplos de naturaleza relativamente sencilla, partiendo de la premisa de que, aunque en la investigación se tiende a explorar las tecnologías emergentes, en el ámbito industrial se puede generar un impacto significativo empleando metodologías más convencionales, dependiendo del grado de madurez de la industria en cuestión. Mi intención es ilustrar cómo es posible aportar valor en diversos sectores industriales mediante la aplicación de técnicas simples, para posteriormente adentrarnos en casos que se acercan más al ámbito de la investigación (Figura C2).



Figura C2

Además de presentar estos casos, es crucial discutir el proceso de integración de los modelos desarrollados dentro de las organizaciones. Esto abarca no solo la implementación del modelo per se, sino también cómo asegurar que este impacte positivamente en la organización y cómo optimizar el proceso de desarrollo para que sea más eficiente. La construcción de un modelo puede ser una tarea monumental; sin embargo, el verdadero desafío radica en mantener y adaptar este modelo a lo largo del tiempo. Los datos y las condiciones cambian dinámicamente, por lo que es fundamental abordar estas variaciones de manera efectiva para asegurar la relevancia y la eficacia continuas del modelo.

En el ámbito industrial actual, una tendencia predominante en los proyectos de tecnología se centra en la automatización de procesos. La observación de la industria revela un esfuerzo constante por digitalizar y optimizar las actividades manuales. Contrario a la percepción común de que la finalidad de estas iniciativas es sustituir la labor humana, el objetivo principal es, en realidad, complementar y mejorar la eficiencia de las tareas existentes. Mediante la implementación de tecnologías avanzadas, se busca asignar las operaciones rutinarias a sistemas automatizados, permitiendo así que el personal se dedique a funciones más críticas y de mayor valor añadido. Esta estrategia subraya el propósito de la automatización no como un reemplazo, sino como un complemento que enriquece el conjunto de habilidades y capacidades dentro de una organización.

Otro ámbito de aplicación significativo de la tecnología en la industria es la mejora de la calidad. En el sector agrícola, por ejemplo, a menudo es necesario seleccionar productos

basándose en su nivel de calidad, especialmente en procesos de exportación. La inteligencia artificial, y en particular los algoritmos de Machine Learning, han demostrado ser herramientas valiosas en esta tarea. Aunque no son perfectos, generalmente superan en eficacia a los sistemas convencionales. La optimización de procesos es otra área beneficiada, facilitando la identificación de valores óptimos para controlar la variabilidad en ciertas características. El uso de técnicas de Machine Learning permite descubrir estos valores críticos, contribuyendo significativamente a la toma de decisiones.

La predicción de tendencias y la personalización también resaltan por su claridad de impacto. La sugerencia de productos vista desde una perspectiva industrial, plantea desafíos notables: la integración de modelos en la toma de decisiones y en el entorno tecnológico empresarial. La gestión de datos se convierte en un proceso complejo, abarcando su estructuración, ordenamiento y gobernanza. Además, la automatización de flujos de trabajo es crucial; una vez establecidas las etapas en un proceso analítico, la capacidad para secuenciarlas eficientemente resulta esencial para obtener resultados relevantes (Figura C3).



Figura C3

La formación y el desarrollo de habilidades pertinentes para ingenieros y profesionales relacionados no se limitan solo a la construcción de análisis o modelos, sino que también incluyen la participación activa en el proceso de toma de decisiones desde una perspectiva de datos. Asimismo, las cuestiones de seguridad y privacidad cobran importancia, dado que trabajar con estos datos y tecnologías conlleva la generación de información sensible.

En este primer caso de estudio, abordamos un proyecto desarrollado para la industria minera del cobre, donde una empresa mediana enfrentaba el desafío específico de optimizar la eficiencia del proceso de molienda, especialmente con sulfuros de cobre, con el objetivo de reducir el consumo energético. Este escenario destacó la importancia de contar con un conocimiento profundo del proceso industrial y una colaboración estrecha entre expertos en datos y especialistas del sector, como metalurgistas. La comunicación efectiva entre estos dos mundos, el de los algoritmos de Machine Learning y el químico-metalúrgico, resultó crucial para el entendimiento mutuo y el éxito del proyecto (Figura C4).

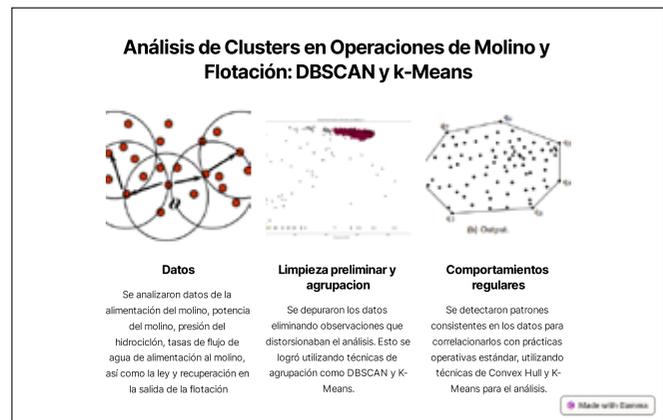


Figura C4

Inicialmente, el enfoque se centró en la eficiencia energética; sin embargo, al profundizar en el análisis y examinar los datos, se evidenció que la optimización debería extenderse a dos procesos interconectados: la molienda y la flotación subsiguiente, donde el cobre se separa de los materiales no deseados. Esta comprensión llevó a la conclusión de que mejorar la eficiencia en un solo proceso podría afectar adversamente al otro, lo que sugería que una verdadera eficiencia solo podría lograrse mediante la integración y el examen detallado de ambos procesos. Este enfoque holístico fue fundamental para redefinir el alcance del proyecto y garantizar una solución más integral y efectiva.

Durante la fase de análisis de datos en este proyecto, nos enfrentamos al desafío típico de lidiar con datos ruidosos y complejos que complicaban el análisis. La estrategia inicial se centró en el proceso de molienda, extendiéndose posteriormente para incluir datos del proceso de flotación. Para abordar la limpieza de datos, recurrimos a técnicas estándar

de clasificación y escaneo, con el objetivo de identificar patrones de operación consistentes. Este proceso implicó el diseño de métodos que permitieran eliminar outliers y reducir la dispersión de los datos, para finalmente concentrarnos en agrupaciones de datos cohesivas y relevantes.

El análisis reveló la existencia de prácticas operativas específicas que pudieron ser mapeadas a partir de los datos. A través del uso de técnicas de clustering y geometría computacional, pudimos depurar la información inicial y destacar aquellos clusters que demostraban patrones de comportamiento regulares y predecibles. Este enfoque nos permitió no solo limpiar los datos de influencias distorsionantes sino también identificar tendencias operativas clave que podrían ser explotadas para optimizar el proceso de producción. La complejidad del problema superaba las dos dimensiones inicialmente consideradas, lo que requería una estrategia detallada y multifacética para el análisis y la interpretación de los datos (Figura C5).



Figura C5

Un aspecto crucial de nuestra investigación fue validar la efectividad del agrupamiento. La validez de nuestro enfoque se comprobó en la práctica, aplicando los hallazgos al entorno operativo real. En la fase inicial, sin un grupo de control para comparar, identificamos cuatro agrupaciones principales basadas en el comportamiento operativo, excluyendo un grupo que correspondía a un tipo diferente de mineral. De los grupos restantes, el azul representaba el más eficiente energéticamente, mientras que el rojo indicaba el menos eficiente. Aunque nuestro análisis de clustering fue multidimensional, nos enfocamos en la producción y el consumo de energía para evaluar la eficiencia energética.

El resultado fue significativo: al proporcionar a los operadores datos precisos sobre comportamientos eficientes, pudieron ajustar el proceso de molienda basándose en nuestras recomendaciones. Este ajuste operativo demostró la aplicabilidad práctica de nuestro análisis, subrayando la importancia de la minería de datos y el aprendizaje automático para optimizar procesos industriales complejos (Figuras C6 y C7).



Figura C6



Figura C7

Lo que ocurrió fue que el clúster azul continuó siendo el más eficiente, observándose un incremento significativo en la cantidad de puntos dentro de este clúster, mientras que se redujeron los puntos pertenecientes a los clústeres



de los datos analizados, diseñar una interfaz de usuario intuitiva y optimizar la experiencia del usuario. Además, la automatización jugó un papel fundamental para facilitar decisiones en tiempo real, requiriendo la implementación de sistemas avanzados y la integración de sensores adecuados. La gestión del proyecto no fue una tarea menor; se hizo necesario adoptar metodologías ágiles para navegar por la incertidumbre y coordinar la colaboración entre profesionales de disciplinas variadas, cada uno aportando perspectivas únicas al proyecto (Figura C11).

mencionado anteriormente, se logró simular, en cierta medida, los resultados obtenidos por las tradicionales encuestas de origen y destino, tal como se ilustra en la figura de la derecha. Este hallazgo demostró la potencial equivalencia entre los métodos, sugiriendo que el análisis de datos de señalización celular podría ofrecer insights valiosos para la toma de decisiones relacionadas con la planificación y gestión del tráfico urbano (Figuras C12 y C13).

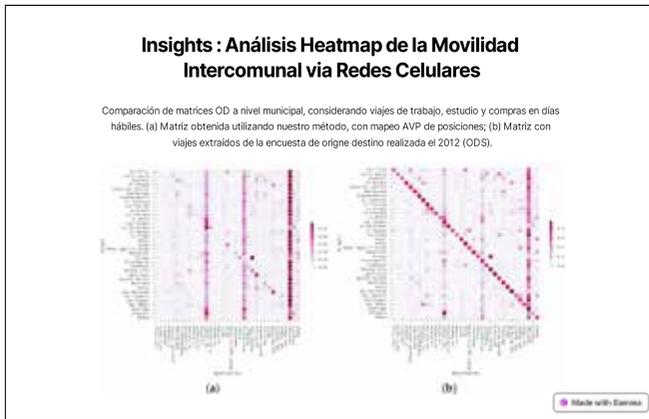


Figura C11

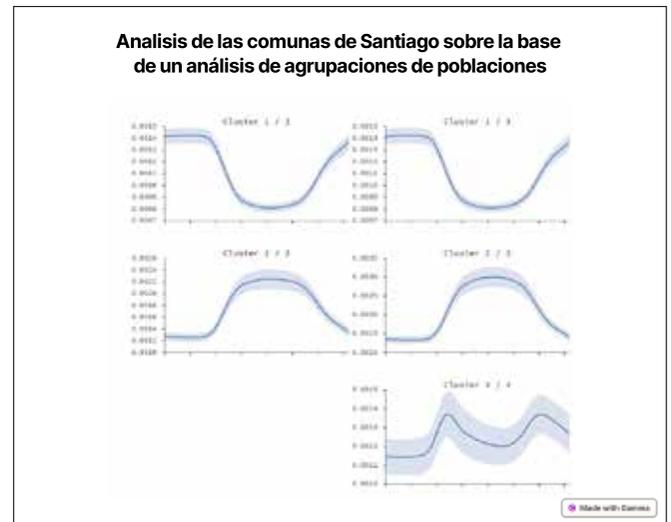


Figura C12

En este siguiente proyecto colaborativo, publicado en 2016, se investigó el potencial analítico de los datos de señalización de redes celulares en un contexto exploratorio, sin una pregunta de investigación definida inicialmente. El reto consistió en manejar un volumen masivo de datos, aproximadamente diez mil millones de registros diarios, que se generaban en tiempo real conforme operaba la red. La investigación inicial se enfocó en identificar agrupaciones geográficas relacionadas con los lugares de trabajo y residencia de las personas en Santiago. Este enfoque permitió demostrar que era posible extraer información valiosa de estos datos, aunque el uso específico de dicha información aún no estaba claro, presentando una oportunidad para futuras aplicaciones.



Figura C13

En el ámbito de este proyecto, se propuso una investigación más detallada con el objetivo de determinar si sería factible replicar encuestas de origen y destino, las cuales suelen realizarse periódicamente para comprender la dinámica de movilidad urbana. Utilizando el mismo conjunto de datos

Con el análisis de los datos obtenidos a partir de las redes celulares, disponíamos de un conjunto de información más detallado en comparación con los datos tradicionalmente más limitados de las encuestas de origen y destino. Inicialmente, se procedió a identificar agrupaciones aplicando técnicas analíticas específicas. Este proceso permitió distinguir, tras eliminar interferencias y ruidos irrelevantes, distintas áreas dentro de Santiago. Se identificaron zonas residenciales predominantes y áreas principales de empleo. Al profundizar en el análisis, se observaron patrones consistentes a lo largo del día, incluyendo las variaciones en las horas punta matutinas y vespertinas, revelando picos de desplazamiento en ciertas comunas. Estos patrones temporales evidencian claramente las fluctuaciones en la movilidad urbana, caracterizadas por aumentos significativos de actividad durante las horas de inicio y fin de la jornada laboral.

A través del análisis detallado, fue posible generar una representación visual que ilustra el dinamismo de Santiago, reflejando sus patrones de movimiento. Este enfoque subraya la importancia de considerar las implicaciones éticas y el impacto potencial en la toma de decisiones derivadas de esta información. La profundización del estudio condujo a la identificación de cinco agrupaciones distintas, proporcionando una comprensión más matizada de la movilidad urbana en la metrópoli. Este descubrimiento ofrece una perspectiva valiosa sobre la dinámica de desplazamiento en Santiago, marcando un avance significativo en la investigación (Figura C14).



Figura C14

La colaboración con consultoras y especialistas en transporte marcó una etapa significativa del proyecto, donde el objetivo principal era enriquecer el entendimiento del

flujo urbano mediante la integración de datos y descubrimientos analíticos. Este enfoque no buscaba automatizar la toma de decisiones, sino ofrecer un complemento a los conocimientos previos de los expertos en la materia. Se desarrolló una aplicación interactiva que permitía a los usuarios explorar patrones de movilidad entre distintas zonas, seleccionando variables como fechas específicas, días laborales, fines de semana y franjas horarias, para obtener una comprensión detallada del comportamiento de movimiento basado en datos de redes celulares. Este esfuerzo demandó un volumen significativo de recursos humanos y tiempo, superando incluso al dedicado a la fase de investigación inicial (Figuras C15 y C16).



Figura C15



Figura C16

En un proyecto más reciente en el que tuve la oportunidad de participar, nos enfocamos en el análisis y diseño de estructuras complejas bajo criterios de sostenibilidad

ampliados. Este enfoque buscaba trascender la tradicional consideración de costos para incluir también consideraciones ambientales y sociales en el proceso de modelado y diseño estructural. Habitualmente, el diseño de estas estructuras se lleva a cabo mediante software especializado; sin embargo, nos planteamos si sería posible optimizar este proceso no solo desde la perspectiva económica, sino también teniendo en cuenta los impactos ambientales y sociales. La adopción de tecnologías avanzadas se presentó como una vía prometedora para alcanzar este objetivo integral de eficiencia (Figura C17).



Figura C17

En el desarrollo del mencionado proyecto, se implementaron algoritmos de optimización en conjunción con redes neuronales, particularmente de una tipología simplificada, con el propósito de agilizar la evaluación estructural. La aplicación de redes neuronales nos habilitó para modelar de manera eficiente las diversas restricciones impuestas por las normativas de diseño estructural. Esta capacidad de aceleración en los cálculos nos permitió abordar decisiones de diseño más complejas, permitiéndonos así realizar optimizaciones que trascienden los análisis convencionales para incluir consideraciones ambientales y sociales. Este enfoque innovador no solo facilita una optimización integral, sino que también abre la puerta a la inclusión de criterios adicionales, como la resiliencia y el análisis de daños, ofreciendo una comprensión más holística sobre la idoneidad del diseño estructural. Este trabajo, actualmente en proceso de evolución, destaca por su potencial para integrar de manera continua nuevas variables y condiciones, aprovechando la eficiencia que proporciona la aceleración de los cálculos mediante tecnologías avanzadas.

En las etapas iniciales del proyecto, se logró una notable mejora en la eficiencia del proceso de cálculo, lo cual inicialmente nos permitió evaluar los costos de manera efectiva. Posteriormente, esta optimización en los tiempos de cálculo facilitó la inclusión de un análisis más exhaustivo que abarcaba el ciclo completo de la construcción. Esto incluía desde la manufactura de los elementos constructivos hasta la mantención y eventual finalización de la estructura, permitiéndonos así realizar una evaluación integral que contemplaba aspectos económicos, ambientales y sociales. La aceleración de los cálculos fue crucial; sin ella, la complejidad computacional del análisis habría impedido alcanzar los resultados deseados en el marco temporal establecido (Figura C18).

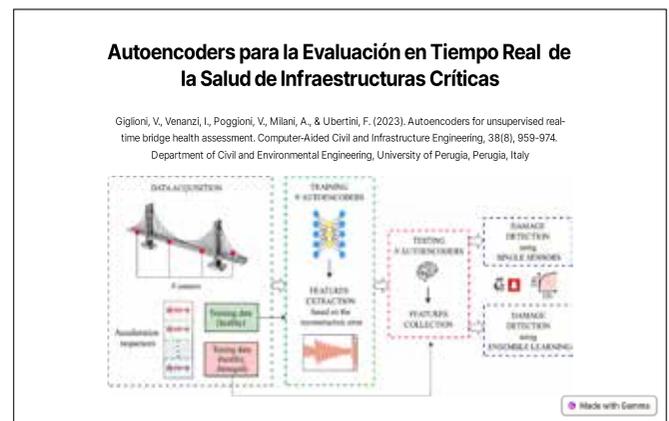


Figura C18

Siguiendo la misma línea, actualmente colaboro con un doctorando en un proyecto que se alinea con investigaciones realizadas por académicos de la Universidad de Perugia. Ellos abordaron una cuestión interesante sobre el monitoreo de estructuras críticas, tales como puentes, para evaluar su estado de conservación. La interrogante central radica en cómo determinar cuándo estas infraestructuras esenciales requieren mantenimiento, aprovechando la tecnología de sensores y la inteligencia artificial. Uno de los desafíos significativos es prever fallas en estas estructuras críticas, dado que generalmente están equipadas con dispositivos vitales para la industria.

La propuesta de estos investigadores se centra en el empleo de redes neuronales especializadas en el análisis de series temporales y autoencoders. Estos últimos son una configuración particular dentro de las redes neuronales

capaces de detectar variaciones en los datos. Bajo condiciones normales, un autoencoder puede reconstruir la información de entrada con alta fidelidad. Sin embargo, ante la degradación del objeto de estudio, la reconstrucción realizada por el autoencoder diverge del estado original, lo que permite emitir alertas tempranas. Este sistema puede implementarse para analizar datos provenientes de un único sensor o de un conjunto de ellos, dotando a cada uno de un modelo específico para discernir posibles deterioros. De este modo, se facilita un mecanismo para monitorear continuamente el estado de salud de la infraestructura a lo largo del tiempo, contribuyendo significativamente a su mantenimiento preventivo (Figura C19).

**Modelos Analíticos en Entornos Operativos:  
Estrategias y Cultura de Datos en Ingeniería**

**Visión Estratégica de la Empresa:** Planificación estratégica para la adopción de tecnologías y prácticas orientadas a los datos.

**Desarrollo de un Repositorio de Datos:** Creación de una infraestructura de datos robusta y accesible, que sirva como columna vertebral para todas las operaciones analíticas.

**Cultura de Datos en Ingeniería:** Capacitación y desarrollo de habilidades en análisis de datos y toma de decisiones basada en evidencia.

**Agilidad en la Implementación y Adaptación:** Enfoque en metodologías ágiles para la mejora continua y la innovación en el uso de datos.

**Estrategias para la Operativización de Modelos:** Enfoque en la automatización, escalabilidad y mantenimiento continuo de los modelos.

Made with Canva

Figura C19

Al contemplar la integración de estas tecnologías en procesos operativos, es crucial reconocer que, aunque el modelo pueda demostrar su eficacia mediante métricas específicas, su implementación efectiva en la industria requiere de varios pilares fundamentales. En primer lugar, es imprescindible contar con una estrategia de datos bien definida que guíe la incorporación de soluciones basadas en inteligencia artificial, lo cual puede presentar desafíos significativos. Además, es esencial disponer de un sistema organizado para el almacenamiento de datos, lo que en términos técnicos actuales se conoce como un data lake, y su evolución hacia lo que se denomina un delta lake (Figura C20).

Asimismo, la cultura organizacional juega un papel crucial; la empresa debe estar preparada para manejar y analizar datos de manera efectiva. Esto incluye la adopción de metodologías adecuadas para el desarrollo de proyectos de este tipo, donde las prácticas ágiles se destacan por su capacidad para gestionar la incertidumbre y facilitar la

implementación rápida de soluciones. Finalmente, es fundamental tener una visión clara sobre cómo los modelos y sus resultados se integrarán en el entorno productivo. No basta con generar y observar datos; es necesario que estos contribuyan directamente a la toma de decisiones estratégicas en la organización.

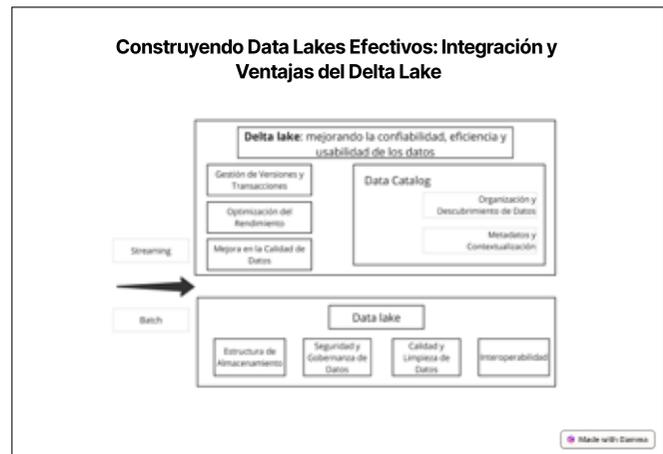


Figura C20

En el transcurso de la evolución tecnológica, hemos sido testigos de una notable transformación en el manejo de datos. Originalmente dominado por las bases de datos relacionales, el enfoque ha progresado hacia una gestión más compleja y holística conocida como “data lake”. Esta evolución busca no solo estructurar y gobernar los datos de manera efectiva sino también asegurar su calidad e interoperabilidad con diversos sistemas. A pesar de los retos inherentes a esta transición, el concepto de “data lake” promete una organización y acceso a los datos aún más refinados. Características como la versionación de datos y un catálogo de datos integral facilitan enormemente que los profesionales encargados de construir modelos analíticos o de procesar análisis accedan a la información necesaria de forma simplificada, eliminando la necesidad de recolectar datos de manera manual. Este avance representa un salto cualitativo en la forma en que interactuamos y aprovechamos nuestros recursos de datos (Figura C21).

Este proceso ha evolucionado hacia la implementación en un entorno productivo caracterizado por una integración continua, donde el diseño, construcción, despliegue y monitoreo forman un ciclo perpetuo. Esta metodología no solo busca garantizar la escalabilidad y el mantenimiento

eficiente de los modelos, sino también establecer un catálogo de modelos que facilite una comprensión clara de los recursos disponibles, su funcionamiento y su rendimiento. Además, este enfoque promueve la colaboración entre diversas disciplinas, extendiéndose más allá del ámbito de la ciencia de datos para incluir otras áreas esenciales para la implementación efectiva de soluciones tecnológicas (Figura C22).

profundamente el negocio. Los Data Translators se posicionan en este espacio intermedio, con un sólido conocimiento del negocio y de los datos, facilitando la comunicación y la implementación de soluciones. Además, los ingenieros especialistas juegan un rol crucial al modelar condiciones específicas para el análisis de datos. Este espectro de perfiles refleja la necesidad de una colaboración interdisciplinaria para traducir efectivamente las necesidades empresariales en soluciones tecnológicas aplicables. Gracias.

*Al término de las presentaciones se respondió consultas y comentarios de los asistentes. A continuación, reproducimos lo más relevante de estas intervenciones.*

**Sr. Juan Carlos Barros.**

—Las exposiciones han estado muy interesantes. Ricardo Baeza nos ha hecho reflexionar sobre temas que ni siquiera habíamos pensado. Su presentación nos genera una serie de preguntas y también nos da una visión de que es lo que se está haciendo fuera de Chile. El tema de la ética en ingeniería y en la inteligencia artificial es un tema relevante, que está siendo considerado en todas partes. Su exposición nos permite estar al día con lo que está ocurriendo en el exterior.

La presentación de José García, por otra parte, está aplicada a la ingeniería, es decir, cómo resolvemos, cómo incorporamos la inteligencia artificial en los problemas de ingeniería, en situaciones cotidianas, por ejemplo, en una compañía minera o en una empresa de transporte urbano. Han sido visiones muy interesantes y complementarias.

**Sra. Jéssica Pizarro.**

—Pensando en la importancia de prepararnos para enfrentar la IA masiva y todos los elementos que Ricardo nos ha presentado ¿En qué elementos pondría énfasis, para entregar en los actuales procesos formativos a los actuales profesionales, para que aprendan a tener en cuenta las variables que nos ha indicado?

**Sr. Ricardo Baeza.**

—Sí gracias, una excelente pregunta. Creo que hay dos cosas que yo haría hoy en día. Por ejemplo, en la enseñanza de

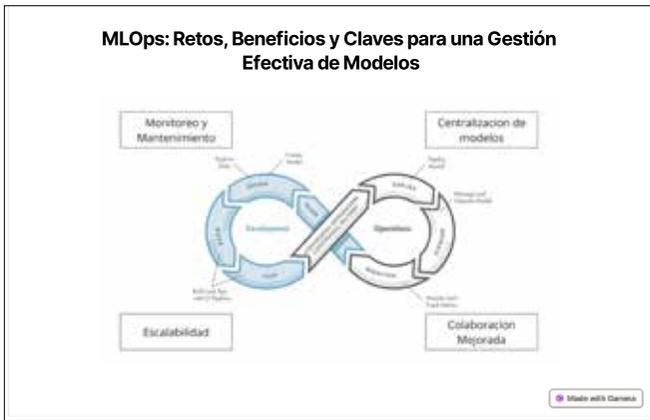


Figura C21



Figura C22

En este contexto, la última diapositiva destaca la evolución de los perfiles profesionales en el ámbito técnico y empresarial. Se han desarrollado roles específicos como arquitectos de datos, ingenieros de datos e ingenieros de MLOps, que se centran en la infraestructura técnica necesaria para el manejo y análisis de datos. Paralelamente, en una vertiente más cercana a las necesidades del negocio, surgen figuras como los científicos de datos, que no solo deben dominar su especialidad técnica, sino también comprender

ingeniería en Chile: una, es que en el Primer Año debería haber un curso de ética de la tecnología, es decir, cómo se aplica la ética de la tecnología en particular, en Inteligencia Artificial. También otras tecnologías tienen similares problemas sobre todo en el ámbito, por ejemplo, medioambiental y en otros ámbitos que no tienen que ver solamente con los derechos humanos. Eso sería como el primer elemento; y el segundo elemento, es que yo creo que, si uno hace solamente eso, no es suficiente. Esto hay que practicarlo. La ética se practica, yo he aprendido ética en los últimos años con gente que sabe mucho del tema, pero también practicando y diría que casi debería ser obligatorio, que cada materia que pueda tener un impacto ético o incluso legal. Debe haber una tarea, un mini proyecto o un ejemplo donde se practique eso, o sea, una clase donde se diga, este es el problema analicemos el punto de vista de cuáles son los límites éticos de lo que podemos hacer aquí, con esta tecnología, en este problema o con estas tecnologías en este problema. Entonces, digamos que, practicando todo el tiempo hasta que termine la carrera, para que al final la ética esté, como se dice, incrustada en uno y no sea algo así como que tengo que saber porque me enseñaron filosofía en el colegio y aunque no me gusta la filosofía, no es algo que tenemos que practicar todos los días.

### **Sr. Juan Carlos Barros.**

—*Muchas gracias. Y eso lleva a otra reflexión, en el Instituto hemos tenido comisiones de ética y también comisiones de educación. Y estas dos respuestas a la pregunta de Jéssica, de alguna forma nos ayudan a poder incorporar la ética en lo que hacemos. El hecho de incorporar la ética en la formación de los ingenieros desde primer año es algo que hemos planteado en varias oportunidades, pero no habíamos hecho esta propuesta en el ámbito de la tecnología, sino más bien en la carrera de ingeniería en general. Creo que la ética en el uso de la tecnología es muy distinta y muy relevante. Lo otro, el tema de practicarlo, es decir, no solamente estudiarlo, sino que también practicarlo. Muchas gracias por tu respuesta.*

*Tengo una pregunta para José García que tiene que ver con la reconversión laboral, porque siempre se plantea que tenemos un déficit en la formación de los profesionales, que se manejen en las nuevas tecnologías; y por otra parte, tenemos una cantidad importante de ingenieros que no están actualizados con estas nuevas tecnologías, entonces, ¿es posible, en tu opinión José, lograr un equilibrio, de tal forma de poder reconvertir*

*laboralmente a ingenieros que tienen mucha experiencia en el desarrollo de ingeniería tradicional e incorporarlos a este mundo de la inteligencia artificial y las nuevas tecnologías?*

### **Sr. Jorge García.**

—Sí, efectivamente los ingenieros con su formación son un punto fundamental de toda la parte de análisis de datos y con relación a la pregunta, la respuesta es categórica sí y más, sí se puede y en realidad se está haciendo. Hoy en día, muchos ingenieros que probablemente tienen una visión, entre comillas, tradicional, de su ingeniería, ya tienen las capacidades o las habilidades necesarias, toda la parte analítica, toda la parte matemática. Por lo tanto, tenemos que repasar todo lo que tiene que ver con el análisis de datos. Toda la parte, probablemente, sí es necesario de programación y con eso efectivamente, ellos son capaces de hacer una inserción laboral, yo lo he visto, sobre todo si conocen una especialidad de buena manera, porque ese complemento es súper interesante. Yo conozco un negocio, un área y sé analizar los datos respecto de esa área, eso tiene un potencial enorme, por lo tanto, ahí, la invitación es efectivamente a complementar todo lo que ellos ya saben desde el mundo de vista de los datos para poder mejorar la toma de decisiones.

### **Sr. Gustavo Saavedra.**

—*¿Cuándo aplicamos la ética, cuándo iniciamos el uso de la inteligencia artificial o cuando los sistemas ya están operando?*

### **Sr. Ricardo Baeza.**

—Buena pregunta porque hay una pequeña falacia, eso que se dice de que, por ejemplo, la regulación es para impedir la innovación, yo creo que no, yo creo que la buena regulación genera la mejor innovación, un sesgo que hay, hablando que soy experto en tema sesgo, tenemos que, cuando pensamos en innovación pensamos que la innovación siempre es positiva, lo que no es cierto. Si vieron la película sobre Marie Curie, tienes buenos y malos usos, lo mismo con la energía atómica, lo mismo con cualquier tecnología, porque el problema es el uso indebido de la tecnología. Yo creo que la ética hay que hacerla, como yo dije en este diagrama en la gobernanza, cuando uno tiene

la idea, si es una idea que puede afectar personas, hay que hacer un análisis de impacto ético, hay que empezar a decir, mira es como las vacunas, las vacunas pasan por un proceso muy fuerte, incluso durante el Covid, de análisis, para saber cuál es el impacto real. Por ejemplo, si vamos a salvar al 99% de la gente, pero tal vez un 0,1% de la gente va a morir, por otros efectos secundarios. Es lo mismo aquí, si yo tengo algo que ayudar a 10 personas, pero discriminar a una, hay que pensarlo. Aquí me gusta mucho esa frase de que era mejor dos criminales libres que un inocente en la cárcel. Poco después en Inglaterra un famoso juez dijo: prefiero tener 10 criminales sueltos que un inocente en la cárcel; y Benjamín Franklin, solamente unos años después dijo: prefiero tener 100 criminales sueltos, que una persona inocente en la cárcel. Así que esa es la variedad de la ética humana, o sea, entre 2 y 100. Cuál era el número de ustedes, dónde ponen el daño y dónde ponen el beneficio. Y ese es una cosa cultural, tenemos que decidir como sociedad, no lo pueden decidir los ingenieros, es un error que muchas veces estamos tomando decisiones éticas en un área que no tenemos idea, que no sabemos, que es mucho más complicado. Así que creo, que hay una meta ética. Aquí, la respuesta: la ética correcta es hacerse la pregunta al comienzo, no hacerse la pregunta después. Si no, lo haces tarde, ya no estás siendo ético, se está realmente ocultando un problema hasta que ya puede ser demasiado tarde. Hoy en día, los problemas de ética se descubren cuando hay un problema, cuando alguien sufre y lamentablemente,

aquí hay gente que está ganando mucho dinero y personas vulnerables están sufriendo el uso de estas herramientas. Por ejemplo, el caso de predicción de un caso en Argentina muy malo, que al final no se usó, pero la predicción, por ejemplo, de embarazos en adolescentes es completamente no ético. Y hay casos en Chile también, de cosas que son complicadas, que uno no debe analizar. Digamos, en un ámbito más genérico, sobre todo hablando con las personas que son tan afectadas, los primeros casos que no debieran ser. Estas son mis suposiciones del sistema, son ciertas o son las que yo creo, he hablado con los usuarios, he hablado con todas las personas que van a estar involucradas y he hablado con los que van a usar las herramientas y muchas veces la respuesta es no. Nosotros pensamos que tenemos todas las respuestas cuando no las tenemos, es parte de la arrogancia que hay un poco en los humanos.

### **Sra. Silvana Cominetti.**

—Muchísimas gracias a los expositores, ha sido una instancia muy profunda de reflexión, de análisis y ha sido un lujo contar con todos ustedes. Y gracias a los asistentes también, a las interesantísimas preguntas, así seguiremos con nuestras reuniones de pensamiento de reflexión, que nos hacen crecer. Muchísimas gracias a todos.

**Fin de la Conferencia.**

# ¿QUÉ VAMOS A HACER CON EL LITIO?

*Conferencia del Sr. Daniel Jiménez, Director de IliMarkets.*



*Sr. Daniel Jiménez.*

*El día martes 17 de octubre de 2023 a las 12.15 horas, vía zoom, se realizó ante una gran concurrencia del ámbito académico, público y privado, la conferencia del Sr. Daniel Jiménez, Director de IliMarkets, quién expuso el tema: ¿Qué Vamos a hacer con el Litio?*

*Daniel Jiménez es Ingeniero Civil y MBA de la Pontificia Universidad Católica de Chile; socio fundador de IliMarkets y uno de los principales expertos en el mercado del litio. Trabajó 28 años en SQM, donde ocupó diversos cargos, entre ellos el de Vicepresidente Comercial Senior de litio y yodo durante 10 años. Ha sido pionero en la producción y comercialización de carbonato de litio e hidróxido de litio en Asia, Europa y América del Norte, y fue responsable del desarrollo de las oficinas comerciales globales de LI de SQM, incluida la apertura de oficinas en Asia.*

*Desde septiembre de 2019 es miembro del Directorio de Galán Lithium, empresa australiana de desarrollo de proyectos de litio con depósitos en Argentina.*

*El Sr. Jorge Pedrals, actuó como moderador. Él es Ingeniero Civil de Minas de la Universidad de Chile, Magister en Historia y Director Ejecutivo el Instituto de Ingenieros de Chile.*

**Sra. Silvana Cominetti, Presidenta.**

—Muy buenos días.

Algunos de los objetivos del Instituto, fundado en el año 1888, son tratar los problemas que afectan a la ingeniería, a su enseñanza y la profesión; contribuir al prestigio y desarrollo de ingeniería y colaborar en la solución de problemas de interés nacional. En este contexto, la actividad de hoy titulada ¿Qué vamos a hacer con el litio? aborda una problemática de gran interés nacional, como se observa permanentemente en el debate nacional.

Periódicamente se leen y se escuchan opiniones, o aparecen noticias, a veces alarmantes, dando a entender que el país está avanzando muy lentamente a diferencia de otros países que corren a mayor velocidad. Por otra parte, también hay una información que indica una caída muy importante en el precio del litio este año, a diferencia del año pasado. Aparecen opiniones dramáticas en que se expresa “... se nos escurre entre las manos una oportunidad histórica...”.

Otras informaciones recientes ayer indican: “... se informa que una empresa china invertirá en Mejillones para construir una planta de producto en base a litio etc., etc...”, o sea, estamos en una noticia en permanente desarrollo y bastante dinámica y seguramente vamos a seguir teniendo noticias. Pero hoy día, queremos poder comprender el escenario actual y futuro del país de una manera más profunda.

En este mismo sentido, hace dos meses tuvimos un foro relacionado con la “Política Nacional del Litio y las Áreas de Desarrollo Económico” que presenta el país comparado con otros países. En esa oportunidad sentimos que era necesario abordar este tema nuevamente y así poder contar con más visiones y poder ir cerrando un poco y haciéndonos una opinión cada uno teniendo una opinión personal.

Por este motivo, hoy tenemos la presencia del ingeniero Daniel Jiménez, quien nos aportará con su mirada respecto del futuro del litio para Chile.

**Sr. Daniel Jiménez.**

Esta presentación va a cubrir, primero lo que es y será o se espera que sea el mercado del litio, y después entrar en qué es lo que está pasando en Chile o qué es lo que podríamos

hacer en Chile, dado todo lo que se está desarrollando a nivel global.

Primero vamos a hablar un poco del mundo del litio y a dónde va.

La demanda de litio el año 2020 fue del orden de 300.000 toneladas de carbonato y litio equivalente. La demanda para el 2030 se proyecta que sea sobre 3.000.000 de toneladas, es decir, en 10 años la demanda global se va haber multiplicado por 10; más aún, significa que en promedio la demanda va a crecer en 300.000 toneladas anuales y esa es toda la demanda del 2019, 2020, un crecimiento espectacular. Pero también los desafíos productivos son increíbles, porque necesitamos todos los años replicar la producción del 2020, y la gente que sabía producir litio en 2020, no se puede multiplicar por 10 en poco tiempo, por lo tanto, la industria tiene todo este desafío de cómo satisfacer esta creciente demanda.

Por otro lado, también si miramos el gráfico y vemos la composición de la demanda, el año 2030 el 95% de la demanda va a estar dada por el uso del litio en baterías y de ese total, el 80% son vehículos eléctricos y el 15% más o menos es en baterías, o sea en almacenamiento estacionario de energía. Es decir, la historia del litio es una historia de electromovilidad por sobre todo y consecuentemente de baterías (Figura 1).

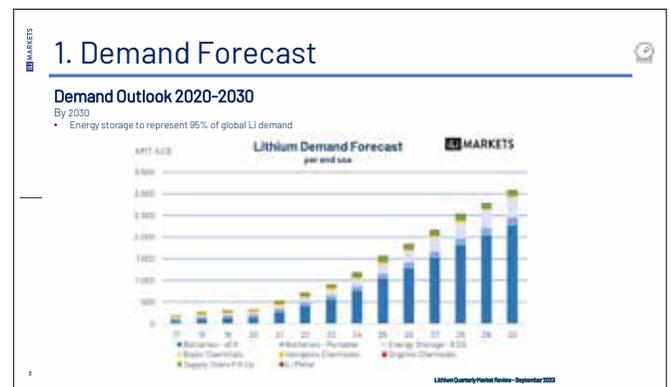


Figura 1

El tema electromovilidad tiene que ver en definitiva con la penetración que tengan los vehículos eléctricos en las ventas de vehículos a nivel global.

El 90% más del consumo de litio en baterías, es en vehículos de pasajeros, es decir, buses, camiones, etc., pero lo que hay que estar mirando son vehículos de pasajeros. Y en vehículos de pasajeros el año pasado la penetración de vehículos eléctricos *plug-in*, es decir que se enchufan, pero también tiene un motor de combustión interna, la relación del tamaño batería en un full eléctrico es cuatro veces más grande la batería. Pero la penetración de ese grupo de vehículos en el año 2022 fue un 12%, este año va a estar entre un 15% y 16% a nivel global, y el 2030 se espera que esto sea cercano al 50%, que es algo que en Chile nos cuesta imaginar cuando vemos muy pocos vehículos en la calle, pero esto es lo que está pasando a nivel global.

Si miramos el gráfico al lado derecho, esto es el crecimiento de esta penetración de vehículos eléctricos en el mundo, se ve que hay una gran dispersión de penetraciones por regiones, lidera Europa junto con China; Estados Unidos bastante más atrás y en el resto del mundo incipiente, llama por ejemplo la atención Japón, es muy chico.

Bueno, pero esto es lo que se está proyectando, en definitiva, que el 2030 en la práctica la mitad de los vehículos que se vendan en el mundo van a ser eléctrico, es decir, con baterías y baterías que se carguen de un sistema de potencia (Figura 2).

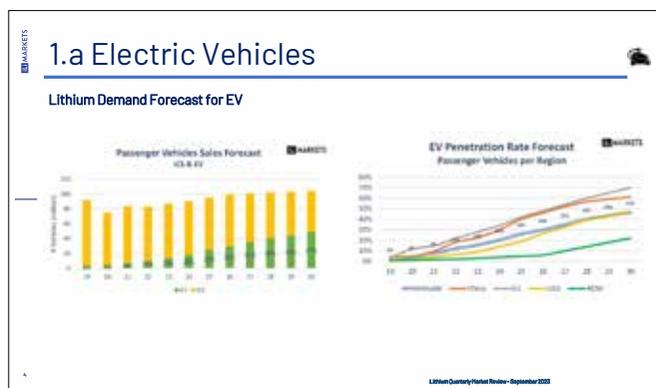


Figura 2

Ahora, estas son baterías de Ion litio, pero existe una amenaza que no hay que perder de vista que es la batería Ion Sodio, y en este gráfico tenemos agrupados como los 3 grandes grupos de baterías que hoy día están compitiendo:

A la derecha arriba están las baterías ion litio, NMC, y que se ve que tiene una gran densidad energética y energía específica, entonces mucha energía en poco volumen y poco peso.

El grupo del medio son las baterías LFP. El LFP es una tecnología que se está desarrollando fundamentalmente en China, que tiene menor performance, como se ve, pero es de costo mucho más bajo, también ocupa el litio, y ese puntito cuadrado, es una batería LFP -Blade, que es un desarrollo que hizo WH/it, TL son muy parecidos, en que logran tener densidades energéticas muy similares a las NMC. Entonces, esta es la gran batalla tecnológica que se está dando hoy día en las baterías. Occidente apostó fundamentalmente a NMC, mientras que China apostó por LFP (la cuadradita), y de desempeño no tan buena, pero de costo significativamente más baja y en términos de seguridad, en número de ciclos también es superior.

Entonces esta pelea de las baterías hoy día la está ganando China, porque son capaces de producir estas baterías, y Japón, Corea, que son los otros dos polos de producciones que están muy concentrados en NMC, han visto erosionarse un poco lo que esperaban fuese su base de clientes que eran los fabricantes de autos occidentales.

Ahora, esta es la situación, pero lo que también se está desarrollando son los triángulos azules, la batería Ion Sodio, y si se fijan en la batería Ion Sodio, están bastante cerca de los círculos verdes que son la batería LFP, por lo tanto, el desempeño no es tanto peor y si no consume litio y tiene sodio que es bastante más barato, entonces este es el otro segmento donde se va a dar una batalla tecnológica y, en esos segmentos donde LFP, que recordemos consume litio, se va a topar con Ion sodio, y este le va a quitar un porcentaje a esa industria (Figura 3).

Y eso nos lleva a la siguiente gráfica, que muestra la proyección de demanda o de producción de baterías para almacenamiento estacionario, y que son las barras que se expresan en GWH anuales de demanda.

Y acá vemos que, a partir del año 2027, 2028, empieza aparecer la batería Ion Sodio, y esto es lo que se está proyectando, que básicamente Ion Sodio en este segmento, en que la densidad energética o la densidad específica no son tan relevantes, el Ion Sodio empiece ya a comerle parte de lo que podría ser un mercado exclusivo de la batería Ion

Litio. Entonces, esta es la primera señal de fuerte competencia de tecnología alternativa de la batería Ion Sodio. En este segmento particular, el almacenamiento estacionario en tener un contenedor de batería o tres contenedores da lo mismo, mucho más relevante es que sea barato y que tenga muchos ciclos (Figura 4).

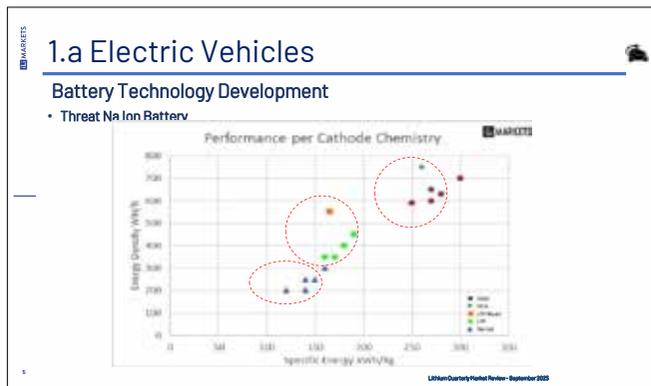


Figura 3

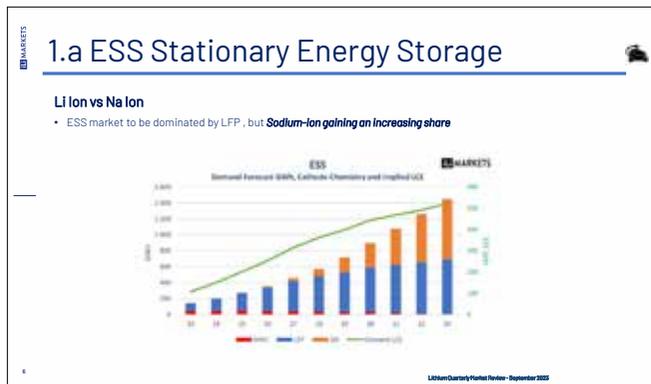


Figura 4

Vámonos a la parte oferta y acá es donde inmediatamente vemos lo que está pasando en el mundo.

Esta proyección de oferta que es hasta el 2027 y que es una oferta bastante cierta, nosotros ya tenemos bien mapeado y sabemos muy bien cuáles son los proyectos, en qué etapa de desarrollo están y cuál es la factibilidad de que produzcan. Y lo que estamos viendo es que, por un lado, va a haber oferta, pero por otro es que no solo Australia, que es el amarillo, va a seguir siendo el país dominante en la producción de litio, sino que, además, empiezan a aparecer muchos países nuevos, y ahí en particular hay que

destacar a Brasil y Zimbabue, que eran países que si miran del 2021 para atrás no existían, y empiezan a aparecer en forma importante hasta 2027.

Lo otro que lamentablemente nos llama la atención, es que Chile crece relativamente poco. Chile en la porción azul baja, y Argentina que es el naranja, la vemos creciendo a velocidades tremendas y claro, porque en Argentina hoy día hay 10, 12 proyectos que no están en papel, están en etapa de factibilidad o de construcción. Entonces Chile que en algún minuto vendió el 60%, 65% del litio en el mundo, y yo por experiencia personal les puedo decir que a principio de los 2000 hasta antes del año 2010, SQM sólo vendió cerca del 50% de los químicos del litio del mundo, por lo tanto, nos quedamos evidentemente atrás ante esta data (Figura 5).

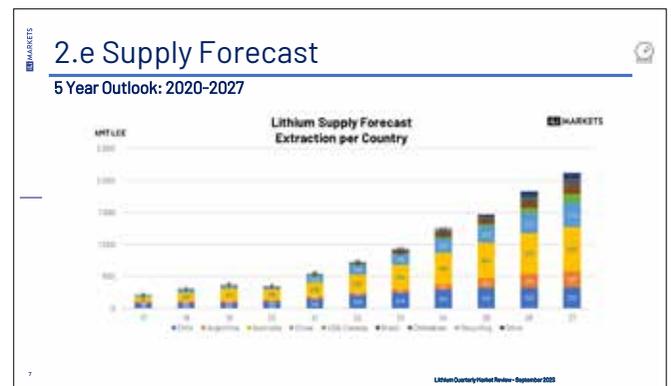


Figura 5

Los precios del litio usualmente se movieron entre 5 y 6 USD por kilo de carbonato de litio.

Hubo un primer boom en 2018 en que llegaron a precios increíbles, inimaginables 18 USD, coincide ese peak con que, en Australia, aparecen varias minas produciendo, que debieron haber estado en producción en 2015 o 2014, se atrasaron 2, 3 años, y aparecen todas mismo tiempo. Y los precios colapsan en el 2020 y llegan nuevamente a nivel de 6 USD, y después nuevamente tenemos esa capacidad ociosa que se ocupa hace fines del 2021 y ahí empieza el peak de precios que se logra a fines del 2022, casi 80 USD, y ahora se produjo este ajuste en que los precios están nuevamente en 20 USD, 25 USD. Efectivamente, un gran colapso de 80 a 25, pero es un precio de locos si miramos lo que fue la historia del litio, entonces también hay que

poner en contexto estos 20, 25 dólares hoy día, eso es algo que hace 6 años solo soñábamos con que existiera (Figura 6).

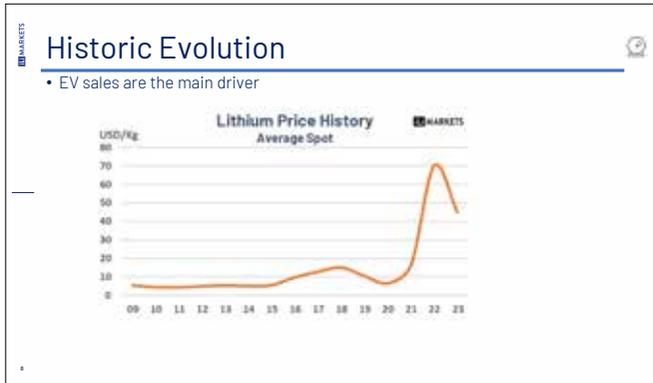


Figura 6

Otra cosa que hay que tener presente cuando uno habla de litio, es que, a diferencia del petróleo, y creo que también a diferencia del cobre, el litio va a ser muy reciclado ¿Y por qué?, porque las baterías de litio van a estar fundamentalmente en el auto eléctrico y el almacenamiento estacionario.

Ambas fuentes relativamente controlables, en el sentido de que es fácil la recolección de esas baterías, y porque el valor de las materias primas de una batería es muy alto. Y para tener un orden de magnitud, una batería tiene en promedio, digamos 50 kg de carbonato de litio equivalente a 20 USD, eso son 1.000 USD, solamente en litio, más cobalto, más níquel, entonces una vez que la batería llegue al fin de su vida o el vehículo llega al fin de su vida, va a tener mucho sentido económico devolver esa batería para el dueño del auto, para así recuperar no sé, 1.000, 1.500 USD por esa batería (Figura 7).

Entonces, ese reciclaje va a ocurrir y consecuentemente, en las tasas de reciclaje netas van a ser bastante altas. Nosotros hemos modelado esto con este modelo que tenemos aquí y también depende mucho de la vida de las baterías ¿Pero esto qué significa a la larga? Que, si miramos esta proyección de demanda, que es la línea azul que va hasta el 2060, es decir, muchos probablemente no vamos a estar a esa altura aquí, pero lo que vemos es que en esta década del 20 al 30 este incremento de demanda se satisface fundamentalmente con litio primario, es decir, litio que se extrae todos los años y

todos los años necesitamos extraer estas 300.000 toneladas adicionales de litio para satisfacer esa demanda. ¿Qué pasa en la próxima década? es que esa demanda asumiendo que continúa con crecimiento muy alto, va a demandar de nuevo 3.000.000 de toneladas de litio incrementales. Pero empieza aparecer el litio reciclado, porque, la batería va a tener una vida útil en un vehículo probablemente 10 años, todo lo que instalamos hace 10 años empieza a estar disponible para ser reciclado. Y créanme que la realidad del litio, el cobalto, el níquel que se recicla, es exactamente como si fuera nuevo, y consecuentemente mucho del crecimiento de la demanda va a ser satisfecho por esta fuente de litio, y de otros químicos de batería reciclado.

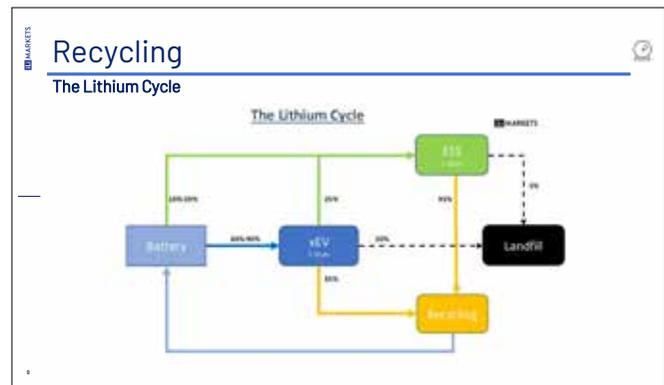


Figura 7

Y consecuentemente los requerimientos de litio primario, la tasa de crecimiento se baja en este modelo, tanto así que la década de los 40 ya se estabiliza, no necesitamos minar más litio, porque hemos extraído tanto las décadas anteriores, que no necesitamos extraer cantidades incrementales y más aún después, incluso el modelo muestra bajas, o sea, que necesitamos minar cada año menos litio.

Estos modelos son discutibles, puede haber menor tasa de reciclaje, mayor duración de la vida útil de la batería, etc., pero conceptualmente, hay que entender que todo el litio que extraemos hoy día va a volver a ser ocupado; 2, 3, 4, 5 veces, y consecuentemente, esta necesidad imperiosa de producir más litio todos los años, en verdad se da durante esta década y probablemente la próxima no (Figura 8).

Cambiando de tema, quiero mostrarle otra cosa que está pasando en el mundo hoy en día.

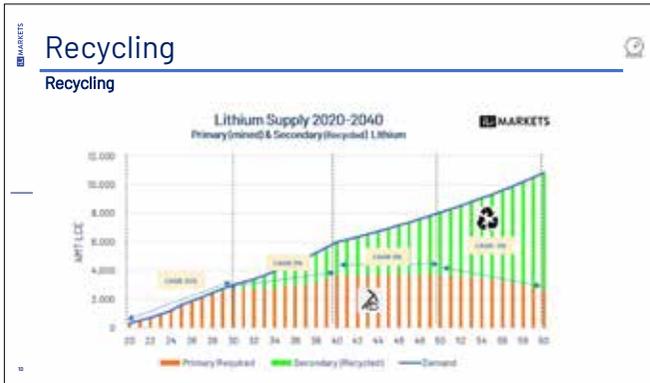


Figura 8

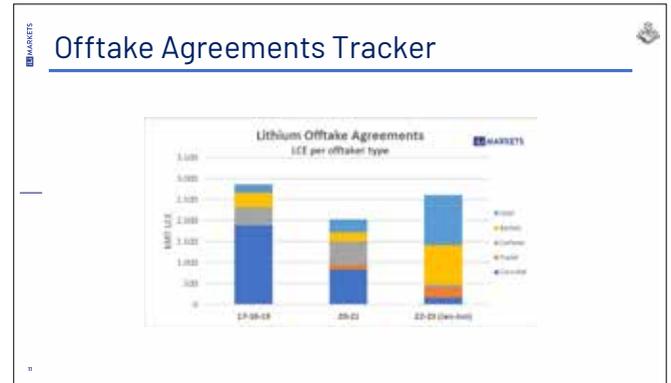


Figura 9

Entre el 2017 y 2019 se hizo pública una serie de contratos de suministro de litio, en forma de concentrado de litio la mayoría, pero también en forma de químico, en total, casi 3.000.000 de toneladas de carbonato de litio equivalente, involucrados en esos contratos, que es una fracción de todo lo que se firma, (como muchas cosas no se hacen públicas). Pero sí se nota que tan sólo el 20% de esos contratos los firmaron fabricantes de autos y baterías.

En los contratos que se han firmado entre el 2022 y el 2023, hasta julio 2023, el 80% de esos contratos el comprador termina siendo el fabricante de autos o fabricante de baterías, es decir, cambió totalmente el foco del fabricante de autos, que nunca en el pasado le interesó meterse en algo tan primitivo como materias primas o químicos o minerales. Y hoy día ven que es estratégico, que esto es un negocio que tienen que asegurar el suministro, eso lo han asegurado firmando contratos de suministro a largo plazo, estando dispuestos a pagar por adelantado por esa compra, esa es un poco la dinámica de lo que está pasando (Figura 9).

Ahora, este mayor involucramiento de la parte final de la batería, que es del fabricante del auto, ha llevado a que los márgenes del fabricante de auto empiezan a presionar al fabricante de batería y antes al fabricante de catódico, para que bajen sus márgenes, para él tener un menor costo y dado que ya aseguró el suministro de litio los tiene con un acordeón. Está presionando y esa es la práctica, es lo que se ha visto acá en los últimos 4 años, los márgenes de los productores de litio han subido, obvio, con los mayores precios, pero los márgenes de los fabricantes de baterías y de cátodos han estado sistemáticamente a la baja.

Traigo a colación esta discusión eterna que tenemos aquí en Latinoamérica acerca del valor agregado. Bueno, en esta industria hoy día y probablemente en los próximos 10 años, la plata la van a hacer, el minero y el fabricante de autos si es que gana plata. Pero todo lo que está entre medio va a ser extremadamente competitivo, va a estar muy presionado por ambos, por el productor de litio en un extremo y por el fabricante de autos en otro y consecuentemente las rentabilidades altas están en la producción de litio y eso es un mensaje para lo que estamos haciendo aquí en Chile y hay que tenerlo presente (Figura 10).



Figura 10

También para tenerlo presente, cualquier cosa que hagamos va a demorar 10 años, no hay ni una posibilidad de llevar un proyecto desde exploración hasta producción en menor tiempo.

Los proyectos que hoy día están empezando a producir en Argentina, son proyectos que partieron hace 15 años, entonces también está el sentido de realidad, lo que hagamos hoy día en Chile no nos va a significar producción de litio en los próximos 8 años, sobre todo considerando todas las complicaciones de permisología que tenemos en este país, hay que ser realista y la producción incremental de Chile probablemente va a ser mínima (Figura 11).

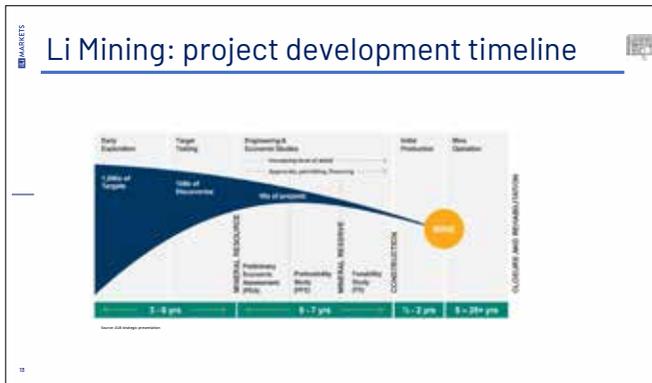


Figura 11

Esto quizás todos lo conocemos, pero lo tenemos que entender ¿Por qué tenemos estas restricciones del litio? ¿Cómo nacen del código de minería del 81? Por razones militares en aquella época, la Unión Soviética, Estados Unidos y Chile, entre otros también, definieron que este mineral era estratégico, y efectivamente era un precursor en la producción de la bomba de hidrógeno, por eso se incorporó en esa época, y países como la Unión Soviética y Estados Unidos tenían stock estratégico de carbonato de hidrógeno de litio.

En los 90, tanto Rusia como Estados Unidos, dijeron que esto ya no es estratégico y lo sacaron de la lista de material estratégico, de su stock estratégico por razones militares, entonces hoy día. Los únicos países que yo sé que tienen esta connotación de estratégicos son Chile y Bolivia, y evidentemente, eso se ha traducido en que Bolivia no produce nada y Chile, es lo que es, gracias al Salar de Atacama, que por lo demás es parte del código minero anterior a esta regulación que básicamente amarró al litio (Figura 12).

Las proyecciones de litio con todo este crecimiento de demanda global, pero también siendo realista con lo que pueda producir Chile, de aquí al 2030, si los ingresos del litio relativo a lo que va a ser el cobre del 2030 probablemente

entonces el cobre va a seguir siendo la principal fuente de exportaciones y Chile no tiene muchas posibilidades de producir o de generar mucho valor de aquí al 2030, básicamente porque producir a partir de cero significa 8 o 10 años para poder estar en producción, y claramente al 2030 ya no llega (Figura 13).



Figura 12



Figura 13

El Salar de Atacama, como lo mencioné, es una propiedad minera que se estableció antes del código del 81, el dueño es Corfo, quien le arrienda a SQM y Albemarle, y estos contratos nacen, algunos en los 80, otros a principio de los 90, el de SQM vence 2030, el de Albemarle vence el 2043 (Figura 14).

Cuando comparamos la carga tributaria que tienen distintos países para la extracción del litio, también tenemos que ver dónde estamos parados como país, y esta tabla muestra un poco cómo están estructuradas las tasas de royalty, por ejemplo.

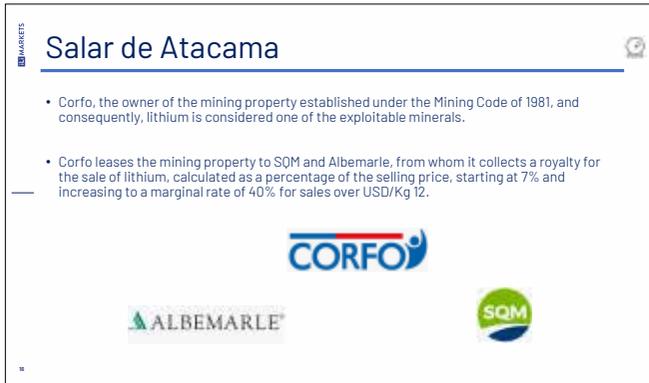


Figura 14

Fíjense lo interesante que es Australia, el mayor productor de litio del mundo, tiene tasas inversamente proporcionales al valor agregado del producto, o vayamos al extremo, cuando los australianos exportan roca, (roca, no concentrado), paga 7,5% royalty, se exporta concentrado que es el 99% de lo que exporta hoy día Australia, pagan un 5% royalty, y si exportas en químicos un 3,75 (químicos es lo que exporta Chile y Argentina hoy día). Si comparamos esa tasa royalty en Argentina hoy día es un 3,5% provincial más un 4,5 de exportación, digamos que 8%.

EL Contrato de Corfo con SQM, Albemarle, lleva en la marginalidad a pagar un 40% de royalty, eso sí lo llevamos a la última línea asumiendo precios de 40 USD, significa qué entre el royalty y la carga tributaria del país, en Australia están pagando 13 USD, eso es 40 como carga tributaria, en Argentina 15, en Chile con el contrato Corfo 22, en Canadá 14. Entonces, claramente la carga tributaria en Chile es mucho más alta y cualquier ventaja de costos desde un punto de vista del inversionista, cualquier ventaja de costos de producción de litio, se va a ver inmediatamente absorbida por esta mayor tasa de impositiva.

Por lo tanto, como inversionista, dice mejor me voy a explorar Argentina, o me voy a explorar a Canadá, o me voy a explorar a Brasil, porque como inversionista mi costo neto va a terminar siendo más bajo (Figura 15).

También quiero explicarle un poco mi mirada de la política nacional del litio.

En la política nacional del litio, el aspecto que rescato, es que se abre la posibilidad de que Codelco negocie una entrada temprana a los proyectos de SQM y Albemarle; en el caso

de Albemarle probablemente no hace mucho sentido, pero sí en el caso de SQM, porque dado que el contrato expira el 2030, esto abre la posibilidad de que si entra antes Codelco, puedan hacer algún acuerdo que, por un lado extienda los plazos para que SQM, que es un gran operador, opere más allá al 2030 y, por otro lado, que aumente la producción. Pero en la producción hoy día SQM está limitada, no por temas de recursos, están limitados por una cuota que quedó fijada en el contrato Corfo / SQM. Entonces yo creo que ese es el aspecto positivo, la posibilidad de llegar a un acuerdo y generar valor para el país.

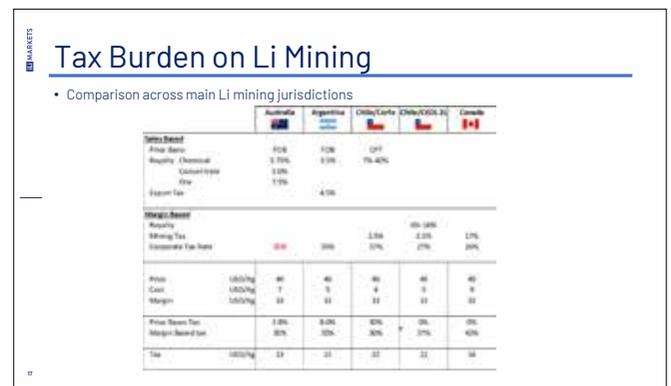


Figura 15

Ahora con respecto a los otros Salares en Chile, esta es mi opinión. No van a producir litio antes de 10 años, si es que, primero, el proceso como estaba descrito hasta ahora, va a decir que el Gobierno va a tener que definir cuáles son los Salares sujetos de exploración y explotación, después va a licitar un Contrato Especial de Operación del Litio (Ceol), para dicho Salar, entonces va a ver que arriesgarse para comprar un Ceol para ir a explorar un Salar, con toda la inversión que eso requiere y los riesgos de una exploración, en que finalmente podrían no encontrar nada.

Después ponen como condición de que va a ser obligatorio el uso de extracción directa de litio, una tecnología que hoy día no está madura, que no funciona a gran escala industrial. Además, reinyectar la salmuera una vez que has extraído el litio, es una cosa que no se hace en ninguna parte del mundo. Entonces, desde un punto de vista del desarrollo tecnológico, ya no solo es el riesgo exploración, sino que también el riesgo tecnológico de la tecnología DLE. Y el riesgo ambiental de la inyección; nosotros no sabemos qué va a pasar cuando inyectemos a presión salmuera dentro de un Salar.

Y finalmente, está también la tasa impositiva, es la misma en Atacama y ya vimos antes que es lejos la más alta del mundo.

Y, por último, el broche de oro, que en mi opinión esto que es considerado estratégico del proyecto del Estado, puede entrar con 51%, pero en ninguna parte dice que el Estado va a contribuir con capital.

Entonces, las condiciones que se han planteado para esto, las encuentro tremendamente poco atractivas, y yo como inversionista prefiero ir a arriesgar el capital y la invertir en otro lado, porque las condiciones aquí para los otros Salares son muy complejas (Figura 16).

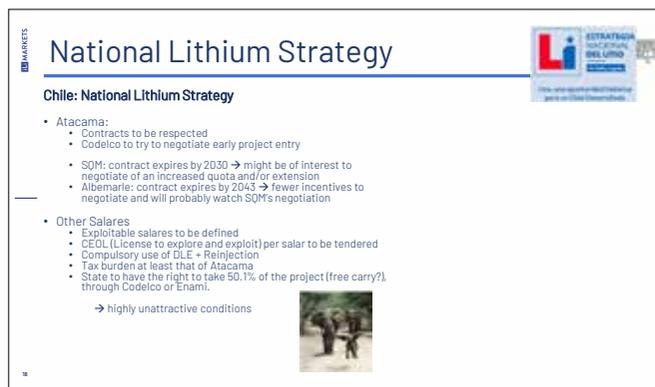


Figura 16

Aquí quiero volver en esta gráfica solo al caso de SQM y Codelco.

En este gráfico en verde se muestra un poco lo que podría ser la producción de SQM durante lo que le queda de vida del contrato, es básicamente llegar a 240.000 toneladas para el 2024 y después del 2030 se acaba el contrato y después del 2031 no produce nada.

Y a partir de ese momento Codelco toma la operación, primero sin el conocimiento y, segundo, sin plantas de refinación, ya que las plantas son de SQM. Va a bajar la producción de litio inicialmente, y después va a tener un periodo en que va a empezar a aprender a recuperarse y eventualmente va a llegar a un límite de producción sustentable que pueda tener el salar de Atacama.

Ahora, lo que vemos como una posibilidad atractiva, es que lleguen a acuerdo Codelco y SQM, y el perfil de producción, entonces pase a ser esa línea roja punteada.

Así, toda esa área que queda abajo son las unidades incrementales que se producen, que genera mucho valor y que nosotros estimamos de un valor de entre 15.000 y 30.000 millones de dólares.

Por eso digo, esta es para mí la parte más positiva de esta política nacional del litio es que, ojalá SQM y Codelco lleguen a un acuerdo y que ojalá entonces para al país estos 15.000 o 30.000 millones de dólares, de valor presente, se generen a través de este acuerdo (Figura 17).

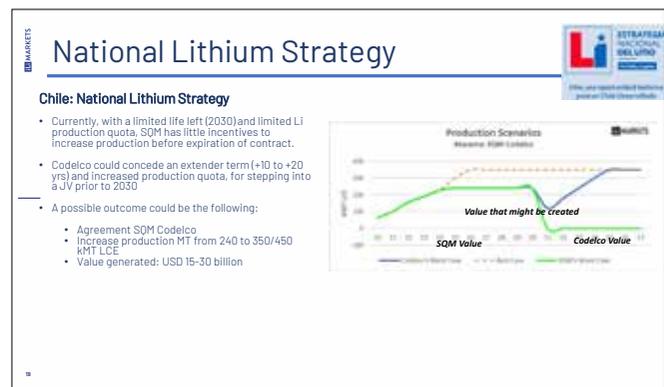


Figura 17

En resumen, el litio de una historia de electro movilidad.

El litio será reciclado múltiples veces, por lo tanto, el súper ciclo de precios del litio nosotros creemos que no va a durar más de 10 años.

Ahora, después de 10 años, no es que el precio vaya a bajar a 5 o 6 USD, como al precio que se va a estabilizar probablemente niveles más cercanos a 20, que va a ser el costo marginal de producción del producto más caro, cuando el mundo esté produciendo 3.000.000 de toneladas.

Desarrollo de proyectos de litio toma tiempo 9 a 15 años, entonces todo lo que se desarrolla en Chile hoy día, probablemente va a partir de cero, digamos y, probablemente, va a entrar en un ciclo productivo, considerando ya estos precios de 20 USD y no, quizás los 40, 50 a los que podríamos haber aspirado.

La categorización del litio como estratégico, es una cuestión que no tiene ningún sentido ni militar, ni económico, y lo único que ha hecho es hacernos perder valor.

Y, finalmente, la legislación chilena que establece el litio como no concesible, nos ha hecho como país perder una oportunidad histórica.

Primero perdimos el liderazgo, y segundo, hacemos una matemática simple, si el año pasado Chile hubiese producido 100.000 toneladas más de litio, produjo casi 250.000 y si hubiera producido 100.000 más, eso hubiesen sido ingresos para Chile de más de 5.000 millones de dólares. Una parte utilidad para los dueños, otra para el Estado, que se hubiera llevado el 60%, 70% de eso. Todo esto por una mala política que tiene un costo enorme para el país, entonces seguir insistiendo en esto de categorizarlo como estratégico, seguir poniéndole trabas al desarrollo, tiene un costo alto para las personas en Chile (Figuras 18 y 19).

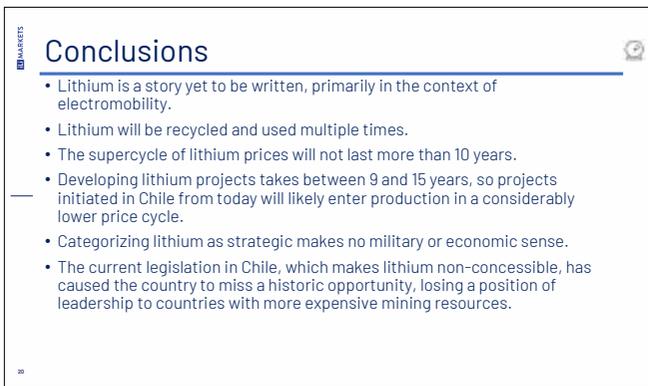


Figura 18

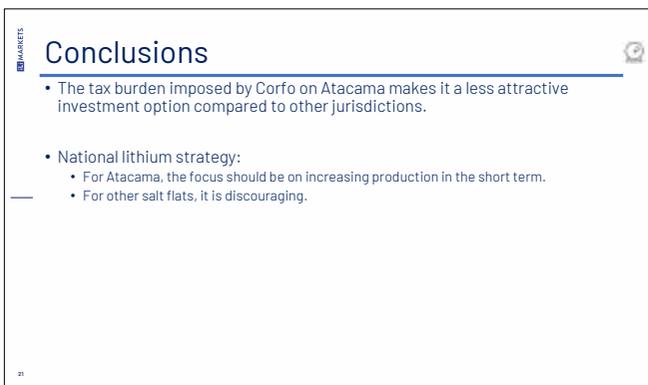


Figura 19

Mi única receta es que los países que lo han hecho realmente bien, como Australia, Argentina, Brasil y Canadá, el denominador común es que el litio es un mineral más, no es nada especial ¿Y qué debe hacer Chile? Es liderar el litio, aunque ya es bastante tarde, porque perdimos una oportunidad enorme de no haber hecho esto hace 15 años, pero hagámoslo ahora y veamos que nos resulta; no quiero ser fatalista, pero a la gran fiesta Chile no llegó.

*Al término de la presentación del Sr. Jiménez se respondió consultas y comentarios de los asistentes. A continuación, reproducimos lo más relevante de estas intervenciones. El Sr. Jorge Pedrals hace de moderador.*

**Sr. Jorge Pedrals.**

—Con Daniel habíamos conversado posibilidades de título, yo había planteado que pusiéramos como título “el litio, una oportunidad perdida”, pero Daniel dijo seamos positivos en la propuesta y hagamos más bien la pregunta de ¿qué vamos a hacer con el litio?

*Ahora si uno quiere resumir muy rápido la presentación que nos acaba de hacer, vemos que nosotros vamos a aumentar la producción por 2 aproximadamente en los próximos años, cuando en realidad la multiplicación más relevante es prácticamente por 10, Argentina está multiplicando por 7 y estoy pensando la cifra 2027, Australia por 3, está partiendo en una cantidad mucho más alta, o sea, nosotros estamos aumentando muy poco.*

*Yo no conocía lo que tú nos comentabas respecto del margen que va a tener la industria, que está entre el que produce y los que fabrican autos, que va a estar un margen muy estresado, porque los productores de autos entraron directamente a esto. Y, finalmente, cuando se une eso a saber que la composición del mercado del litio, entre el litio primario y el litio secundario, va a tener un cambio de estructura significativa después de los próximos 10 años y que nosotros por la trayectoria que nos estamos definiendo, no vamos a poder impactar en los próximos 10 años, eso quiere decir que nosotros vamos a llegar 10 años tarde con los incrementos de producción, esa es la conclusión que yo saco de las cifras que tú nos has dado Daniel.*

*Entonces, evidentemente uno queda con una sensación de alta preocupación, sobre todo por el último gráfico que tú muestras, que de alguna manera se nos estaría escurriendo un aumento significativo y visto desde el punto de vista del Estado, un incremento significativo de Impuesto, si nosotros fuéramos capaces de aumentar en el corto plazo iría por los aumentos de producción de SQM específicamente.*

*Por lo tanto, teniendo presente eso, corrígeme por favor si me equivoco en alguna de las conclusiones, y te voy a leer algunas de las preguntas que se están haciendo acá, de tal manera de que tu puedas fundir esta suerte de resumen que yo hecho, más otras preguntas que han llegado.*

**Sr. Elías Arze.**

*—¿Es cierto que actualmente SQM debe reinyectar el litio que extrae por sobre las cuotas que tiene?, si así fuera, ¿no sería más lógico venderlo todo una vez extraído y ya se hubiesen pagado los costos económicos y ambientales?*

**Sr. Daniel Jiménez.**

—No sé si hoy día SQM está reinyectando litio, lo que si te puedo asegurar es que SQM no produce la cantidad de litio que el Salar de Atacama permitiría en forma sustentable producir, porque la cuota de extracción de aquí al 2030 es limitada y, consecuentemente, van a llegar a la extracción que se les permite llegar hacia fines del 2030. Económicamente y muy probablemente, no tiene sentido invertir en capacidad para después bajar la producción por un tema de cuota. Y eso yo creo que es el potencial que se podría liberar, si es que primero se liberara esa cuota y se extiende el plazo. Ahí le hace sentido al inversionista, en este caso SQM, invertir en expansión de capacidad y producir en vez de 240.000 toneladas, que es lo que está proyectado que llegará a extraer SQM en el 2024, 2025, tal vez pueda llegar a 350.000. Hay hidrogeólogos que me dicen no 450.000, pero si 100.000 toneladas incrementales. Supongamos que los precios van a ser USD 30. Para no ser tan optimistas como los USD 50 del año pasado, pero USD 30, son 3.000 millones de dólares anuales de mayores ingresos, vale decir, utilidades antes impuesto, probablemente no sé, 2.600 millones de dólares, esa sería la plata para repartirse.

**Sr. Jorge Pedrals.**

—*En el fondo lo voy a interpretar con mis palabras no son palabras tuyas, que una de las primeras gestiones que uno debiera hacer aquí, es repetir la negociación que hizo Bitrán con SQM años atrás, incrementar a contar del próximo año la cuota de explotación, más que estar pensando que en el 2030 voy a ser propietario de algo que va a empezar a pasar a contar del 2030.*

**Sr. Daniel Jiménez.**

—Claro, evidentemente, o sea, procurar que SQM o con Codelco, tengan el incentivo para aumentar la producción al máximo en el menor tiempo posible.

Todas estas unidades del litio que produzcamos de aquí al 2030, probablemente van a tener mucho más valor que las que produzcamos del 2030 en adelante, por lo que vimos cuando nos referimos al reciclaje, entonces el valor presente de producir más unidades hoy día, versus mañana más allá del tiempo, es porque van a tener precio mucho mayor.

**Sr. Jorge Pedrals.**

—*Es difícil entender lo que está pasando hoy día con la negociación entre Codelco y SQM, no hemos tenido ninguna noticia desde que se estableció la estrategia nacional del litio. Lo único que supimos es que se habían iniciado unas conversaciones y no hemos tenido noticias de ellas, ¿qué crees que va a salir de dichas conversaciones?, u otra pregunta alternativa podría ser ¿Por qué no tenemos más información respecto de esa negociación? Crees que es posible en los próximos 2 años y medio de gobierno que quedan, que salga algo positivo respecto a esas conversaciones. Esto cuando, además SQM tiene inversiones importantes hechas en Australia hace muy poco tiempo y su último incremento de producción entiendo fue en Australia hace un par de años atrás.*

**Sr. Daniel Jiménez.**

—Nada ha salido a la luz pública, y yo tiendo a pensar y también es lo que quiero pensar, es que eso significa que están avanzando, porque si las negociaciones estuvieran

detenidas, probablemente ya habríamos visto alguien patear la mesa; entonces tengo la esperanza de que esto esté avanzando de buena forma y creo honestamente que, por Chile, sería muy bueno que podamos capturar este valor, ojalá que resulte.

### **Sr. Jorge Pedrals.**

*—Se me viene a la cabeza el otro antecedente en que pusiste hartas dimensiones del negocio, y fue la dimensión del negocio respecto de la tributación que existe en Chile, si existe la exigencia de tener una participación de más de un 50%, en un lugar donde tenemos la tributación más alta dentro de las competencias que hay, cuál es la posibilidad que el resultado de esa conversación efectivamente sea no incrementar fuertemente la producción en el corto plazo, sino más bien el apetito de ser dueño de una empresa que se establezca.*

*Y, además, aprovecho de agregar un par comentarios o preguntas que han hecho.*

*Una apunta al tema medio ambiental, ¿Cómo se evalúa la variable cambio ambiental en el sistema productivo en los salares? y ¿cómo vamos a estar seguros de que hay ciertos equilibrios ecológicos que se mantienen en el salar cuando estemos produciendo?*

### **Sr. Daniel Jiménez.**

—Con respecto primero al tema del 51%, yo distinguiría entre Atacama y todo el resto, porque en Atacama es una operación que está andando, que se conoce proceso productivo, que se conoce geológicamente, se conoce todo, entonces al final efectivamente Corfo es el dueño de este salar y, claro, tú como dueño negocias con el arrendatario en los precios de arriendo, y si eso es un 51% de márgenes, un 80% de margen, un 20% de margen, es materia de negociación y al final es número.

Distinto es cuando tú tienes que salir a desarrollar un proyecto nuevo, imagínate Jorge que te entregaran un salar para explorar, vas a invertir plata en la exploración, vas a invertir eventualmente plata en desarrollo de un proceso, te fuerzan a ocupar una tecnología que no está probada en ninguna parte a gran escala, te obligan a ocupar reinyección

y después, más encima, te obligan a pagar un impuesto equivalente al de Atacama, como mínimo el de Atacama. Pero, además, no tiene cero riesgos, Más encima, queremos el 51%, si es un gran proyecto o estratégico, sin definir lo que es estratégico.

Entonces tu mira esto como inversionistas extranjeros, por ejemplo, y dices, sabes qué, mejor me voy para otro lado, no puedo estar arriesgando esto aquí, porque va ser menos rentable, pero, además, tengo el riesgo que de repente me digan no, esto es estratégico y me quedo con la mitad. Entonces, otro se queda con la mitad, sin decirme que me va a contribuir con capital, entonces es muy mala propuesta por donde se le mire. A mí me ha tocado hablar con varias empresas que están metidas en el negocio o inversionistas y me retan, me dicen, pero como se les ocurre esto a ustedes; oye, no me retes a mí, si esta cuestión es la política que se planteó, no lo estoy proponiendo yo. Y la verdad que es muy mala, y hoy día hay un flujo enorme de capitales fluyendo a Argentina, a Brasil, a Canadá, a Australia, a África, y aquí en Chile estamos mirándonos el ombligo.

### **Sr. Jorge Pedrals.**

*—Tú crees que algunos de estos otros países, Australia, Argentina, están poniendo condiciones aguas abajo del negocio como las que se están tratando de poner en Chile.*

*¿Tú crees que estos países están poniendo restricciones de tal manera de generar el Instituto del litio y otras entidades que pudieran ayudar al desarrollo, tema que abordamos en la presentación pasada, con una presentación de César Hidalgo?, ¿tú crees que otros países en tan haciendo eso?*

### **Sr. Daniel Jiménez.**

—Los países que están creciendo, Australia, Canadá, Argentina, Brasil, Zimbabue, y un sin número de países en África, yo no sé de ninguno que esté haciendo algo de este tipo, en Argentina de repente se escucha que sigue el valor agregado, pero no es un tema, ahí se ve que las autoridades son super pragmáticas.

Ahora, a las personas que les gusta tanto esto, las invito a que inviertan ellos en este negocio, si es tan buen negocio,

si es tan lógico, inviertan, pero la verdad que son negocios de muy bajo margen.

Las baterías en el mundo se producen en China, Japón y Corea; Europa hasta hace poco no producía baterías, en Estados Unidos tampoco. Tesla empezó a producir porque selló una fábrica de Panasonic para sus autos en Estados Unidos, te fijas, esto no es llegar y producir, esto es un trencito en que el vehículo eléctrico demanda batería, entonces movamos fábricas de baterías donde se producen vehículos eléctricos, y después entonces voy a ir un poco más arriba en la escala, buscamos cátodos donde se produzcan baterías, eso es lo que pasa en el mundo y por eso Australia, por ejemplo, el mayor productor de litio en el mundo, produce concentrado solamente, están tratando de producir recién hidróxido litio cosa que Chile produce del 2005, la ideología nos ciega.

Y no olvidemos una cosa, el año pasado barajamos sobre la mesa por lo menos 5.000 millones y este año unos 3.000 millones de dólares, eso es el costo de esta obsesión, del tema estratégico y del valor agregado; esta cuestión en los próximos años nos va a costar no sé 20.000, 30.000 millones de dólares.

### **Sr. Jorge Pedrals.**

*—Me gusta el tema del Estado, lo estamos desarrollando hace tiempo, el rol del Estado, su rol y su eficiencia dentro del Instituto y claramente aquí, lo que más claro le queda a uno, es que con un esfuerzo pequeño (entre comillas), de una negociación, de sentarse en la mesa, de poner condiciones relativamente claras, el Estado podría estar incrementando en 1.000 millones de dólares, en un par de años más su recaudación tributaria, si solo pensara que hay que hacer inversiones o liberar cuotas, quizás liberar la cuota ni si quiera trae aparejada la necesidad de hacer una inversión, quizás eso sería interesante conocer eso.*

*¿Sería tan inmediato como sentarse con SQM para que se liberara una cuota, y con eso lograr una mayor recaudación tributaria, porque las inversiones están y porque hay una restricción en la producción?, esa es la primera pregunta.*

*La segunda pregunta, quizás te voy a llevar a un tema en el cual no estoy seguro si tú sabes, pero ¿tú crees que estas noticias*

*que nos están llegando desde China, de las inversiones futuras de China en fábricas de baterías de litio en Mejillones, es tan impactante como la liberación de la cuota SQM en el corto plazo? Y claramente acá uno esta mencionando el nombre de una empresa, porque bueno es la que está sentada en el salar de Atacama, y es la que está produciendo y es la que está pagando los impuestos millonarios, incluso más altos que los de Codelco en los últimos años.*

### **Sr. Daniel Jiménez.**

—Primera pregunta, es factible pensar en un aumento rápido de producción yo creo que sí, SQM tiene sobre una producción de litio y otra área de potasio, si sacrificase potasio a cambio de producir litio podría en forma muy rápida, producir una cantidad importante quizás un 50% más de concentrado de litio, ese concentrado lo podría perfectamente exportar, a un precio equivalente muy similar al precio que se termina obteniendo por la venta de carbonato de litio o hidróxido de litio, y esto no es nuevo; SQM lo hizo entre el 2006 y 2016, pero después en la negociación Corfo decidió que no necesitamos tener más valor agregado y, consecuentemente, prohibió este aumento, pero eso podría ser factible.

Ahora esto no es mi ámbito ni tampoco tengo tantos detalles de SQM como para entender si esta cosa es así de rápido, pero mi intuición me dice que sí, hay una forma rápida para el Estado de obtener mayor ingreso tributario, yo creo que esta es una forma.

Y después con respecto al valor que puedan tener la generación de valor, que puede tener esta producción en Mejillones que recién se anunció, (iba a ver dos), este tema viene del año 2018, y la verdad que ninguna de las empresas productoras de Cato, japonesas, coreanas, europeas, se interesaron en esto. Básicamente porque producir Cato en Chile, significa tener el litio acá, pero traer el 80% del peso, del resto de la materia prima desde Asia hacia acá, huella carbono muy compleja. ¿Cuál es la ventaja? tener asegurado el suministro de litio, en un mercado en que el litio este apretado, efectivamente eso es un tema de valor, y el precio que va a ser el precio más bajo 10%, 20% no recuerdo bien, más bajo que el precio promedio que vende SQM, pero no es un negocio que haya ha tenido muchos interesados, esa es la verdad.

¿Ahora por qué son los chinos los interesados? bueno porque China depende hoy día del litio, la mayor parte del litio en el mundo se produce con países que están alineados con Estados Unidos, con Europa, entonces China está bastante vulnerable y consecuentemente asegurar suministro de litio es lo que están haciendo hoy día. Por eso China se está metiendo muy fuerte en Argentina, controla probablemente el 90%, 95% de los desarrollos que se están haciendo en África hoy día. Claro China está saliendo en todos lados, y yo personalmente creo que esta política restrictiva del litio que se ha planteado, que para empresas occidentales no son atractivas, para empresas chinas por razones geopolíticas, bueno es la opción que les va quedando y por eso están participando en forma activa.

### **Sr. Jorge Pedrals.**

—Bueno unas de las preocupaciones que se han planteado con respecto de las carreras de Ingeniería en Chile, tienen una malla curricular adecuada como para abordar las actividades del litio, y después a propósito de los 50 años de nacionalización del cobre en Chile, hubo varias conmemoraciones respecto de eso y con independencia de los comentarios o críticas que uno puede hacer de esa medida, recordando un poco lo que se está planteando para el 2030 en adelante. En el 2030 en que la propiedad podría cambiar a mí me rememoraba algunos de los comentarios que surgían de la gente que participó en la nacionalización del cobre, pero yo creo que de todas maneras es importante no perder de vista la curva que tu dibujaste. Vale decir, hay una curva que se está perdiendo dentro de los próximos años y con una velocidad que podríamos capturarla muy rápida que la estamos dejando sobre la mesa, entonces alguien sugiere decir, bueno, están las autoridades lo suficientemente interiorizadas de este detalle, como para que esas decisiones se puedan corregir a tiempo.

¿Tú crees que las autoridades tienen esta claridad con la cual al menos yo estoy quedando?

¿Tú crees que las carreras en Chile están con la orientación adecuada para ser el soporte que va a necesitar esta industria, en la medida que se tomen las decisiones correctas en Chile?

### **Sr. Daniel Jiménez.**

—No tengo relación con las autoridades, tampoco lo he preguntado, así que la verdad que no se si lo tengan claro, pero yo me temo que todas estas discusiones están un poco sesgadas por un tema ideológico, y eso yo creo que es la verdad de lo que pasa y lo que yo digo no les interesa escuchar mi versión.

Con respecto si las universidades están preparadas o no, yo creo que el conocimiento o el entendimiento acerca de la producción de litio por medio de salmueras, esa universidad ha sido históricamente SQM y Albemarle, y son profesionales de estas dos compañías, pero en especial de SQM que están hoy día asesorando el desarrollo de producción del lito de salmuera en otras partes del mundo, particularmente en Argentina, tenemos muchos ex SQM y Albemarle dando vuelta por ahí, pero ahí no están alojados, no están las universidades y obvio porque una industria que esta tan concentrada en el Salar de Atacama, ahí es donde están todos alojados.

Ahora esta pregunta en general apunta hacia la producción de derivado de litio, yo creo que tanto SQM como Albemarle, tienen un nivel de integración aguas abajo, en que son líderes y saben hacerlo muy bien, la pregunta de si se puede ir más abajo, por experiencia puedo decir dos cosas:

En ese más abajo hay toda una línea de químicos de litio, que son extremadamente sofisticados; en mi vida pasada tratamos de participar en ese negocio, pero nos dimos cuenta de que no teníamos las competencias para hacerlo y, básicamente, en los segmentos más de química fina, en que tú necesitas plantas de muy alta calidad, con doctores, sólo con Ph.D, en el equipo de ventas, porque tus contrapartes son puros Ph.D, en un negocio que Albemarle y Live lo hacían muy bien. Bueno ese negocio, en esa época, cuando los chicos eran muy pequeños, era muy interesante pensar en capturar esos márgenes y en que nosotros quedamos imposibilitados, básicamente por competencia. Bueno hoy día, estos mismos 2 actores se están retirando porque ven mucho más rentable concentrarse en producciones de carbonato de litio, hidróxido de litio, entonces ese va a terminar siendo un negocio muy de nicho de empresas chicas.

La otra integración es quizás en las baterías acercándose a la electromovilidad, bueno el paso siguiente es Cátodos, y la verdad es que es un *know how* de producción de cátodos, que está muy concentrado en Corea, Japón y China, que no existe en occidente quizás BDFACS y UMICORE, empresas belgas son las únicas dos. Pero ellas están instaladas con sus operaciones cerca de los lugares de producción de baterías, pensar en hacer eso en Chile, que es lo que están haciendo ahora ByD, y China Change, yo creo que tiene poco valor

económico y poca generación de valor, por lo tanto, el foco tiene que ser extraer unidades de litio los próximos 10 años y en la forma más acelerada posible, ahí es donde vamos a generar valor, ocupemos esa plata para educarnos, para hacer todo lo que queramos, pero no pongamos la carreta delante de los bueyes.

**Fin de la conferencia.**

# FORO “LA ECONOMÍA DE LA COMPLEJIDAD Y LA POLÍTICA NACIONAL DEL LITIO”

*Conferencias de los Señores Jaime Alée, Presidente de ESK Consulting, y César Hidalgo, Director del Center for Collective Learning de la Universidad de Toulouse.*



*Sr. Jaime Alée.*



*Sr. César Hidalgo.*

*El día jueves 3 de agosto de 2023, vía zoom, ante una nutrida concurrencia se realizó el Foro “La Economía de la Complejidad de la Política Nacional del Litio”. Para esta ocasión se contó con la participación del Sr. Jaime Alée, quien expuso el tema: “La Política Nacional del Litio, ¿abre una ventana de oportunidades para el país?”, y con don César Hidalgo, con el tema “Aplicación de la Economía de la Complejidad a la Economía Chilena”.*

*Jaime Alée, es ingeniero civil eléctrico de la Universidad de Chile, ejecutivo de empresas nacionales e internacionales en el campo de las tecnologías de la información, uno de los fundadores del Centro de Innovación del Litio en la Universidad de Chile, actualmente consultor independiente y presidente de ESK Consulting.*

*César Hidalgo, es doctorado en física de la Universidad de Notre Dame y licenciado en física de la Universidad Católica de Chile; es director del Center for Collective Learning de la Universidad de Toulouse y está vinculado a las universidades de Manchester y Harvard, es autor y coautor de los libros, *The Atlas of Economic Complexity*, también de *How Humans Judge machines* y *Why Information Grows*.*

*Jorge Pedrals, actuó como moderador, Ingeniero Civil de Minas de la Universidad de Chile, Magister en Historia, Director Ejecutivo el Instituto de Ingenieros de Chile y Presidente de la Comisión El Estado, su eficiencia, su Rol y los desafíos futuros.*

### Sra. Silvana Cominetti, Presidenta.

—El litio, qué duda cabe, es un tema que es el último tiempo ha cobrado una gran importancia en el país, pero existen razones para la preocupación que ha generado. Por una parte, hay expertos que señalan que ya en el 2030 Chile va a estar produciendo solo el 10% de la demanda mundial, sin considerar el precio que a esa data debería haber bajado. Por otra parte, la Estrategia Nacional de litio, está hoy en día en el foco de la discusión y todo indica que va a tener dificultades para su implementación.

La consecuencia que sigue de ello es que, si Chile no crea las condiciones para que se generen las inversiones necesarias. éstas se irán a otros países como Australia, Argentina, entre otros, perdiendo las oportunidades importantes para los chilenos. Lo expresado es solo parte de la gran problemática que existe en la materia y fue la motivación para que el Directorio del Instituto de Ingenieros de Chile decidiera convocar a este foro para colocar el tema en el centro de la discusión y ver si es posible sacar algunas conclusiones que ayuden a obtener respuestas para enriquecer las posibles soluciones a las dificultades que hoy se enfrentan.

Como siempre, el Instituto se hace cargo de presentar problemas que afecten el desarrollo nacional e intenta que las soluciones que eventualmente propongan nuestros profesionales invitados se enmarquen en el ámbito técnico profesional o se den las condiciones para que en virtud de lo que expresen sus propuestas, se inserten en el marco señalado. Y ello es la aspiración que ha tenido nuestra institución desde el año de su fundación por allá lejos en el 1888.

### Sr. Jorge Pedrals.

—Haré una breve introducción respecto del tema del litio y, para eso voy a aprovechar una iniciativa del Colegio de Ingenieros del año 2022, en la cual preparé el libro: “Los Ingenieros y la Constitución”, que está disponible en las librerías electrónicas y en otros lugares. Este libro es el trabajo que hizo un equipo de distintos profesionales que, entre otros temas, estudió la minería, para hacer una recomendación respecto del tema constitucional.

Haciendo un poco de historia, en el año 1979 se declaró el litio de interés nacional, restringiendo desde esa fecha la posibilidad de constituir pertenencias mineras para la explotación del litio, quedando sólo la Corfo, Enami, Codelco y unos pocos privados, con la posibilidad de explotar el litio en Chile.

Después de 1979, los nuevos interesados en la explotación del litio, podrían participar sólo mediante contratos especiales de operación, que se han tramitado a través de Corfo a lo largo de los años. A la fecha hay dos contratos de arrendamiento en el salar de Atacama: Albermarle y SQM, venciendo el primero el 2043 y el segundo el 2030, existiendo actualmente producción de esas empresas. Ni Codelco y Enami hasta la fecha, después de todos estos años, han avanzado en su explotación.

¿Qué propone el documento del Colegio de Ingenieros?, recomienda remover el litio como sustancia estratégica no susceptible de concesión, incorporándolo como una sustancia concesible a privados y al Estado, con el fin de promover las inversiones necesarias a futuro, los argumentos eran básicamente dos:

1. Por un lado, generar mayor inversión en el sector, la que en realidad no ha ocurrido desde esa fecha y,
2. Adoptar los mismos procedimientos que existen para las concesiones mineras en Chile, que son mucho más robustos y que implican la tramitación de estas concesiones en los tribunales de Justicia, lo cual pone barreras altas a la entrada de la corrupción, un tema de no menor importancia

Sobre el mayor valor agregado a la industria minera en general y, en particular a la industria del litio, muchas cosas se han dicho en Chile, desde no exportar concentrado de cobre, sino que llevar el cobre a un valor agregado de cátodo. Algunos incluso han planteado que deberíamos fabricar parte de componentes de camiones mineros si somos tan importantes en el cobre, y otros dicen, que deberíamos participar en la fabricación de baterías de litio.

Sobre eso es lo que vamos a conversar hoy día con nuestros dos invitados, con Jaime Alée y César Hidalgo.

## Sr. Jaime Alée.

—Primero quiero agradecer al Instituto y particularmente a Silvana Cominetti y a Jorge Pedrals, que me invitaron a participar en esta presentación, sobre la estrategia nacional del litio.

### El discurso y su contexto

Esta portada que ven aquí es básicamente lo que aparece como portada del documento oficial de lo que se denomina estrategia nacional del litio, por parte del Gobierno de Chile. Al principio se le denominaba una “política nacional del litio”, pero después se le cambió el nombre por “estrategia nacional del Litio”. Ello no solo es formal, sino que refleja una intención distinta, normalmente es un mecanismo para conseguir un objetivo. Pero lo que habría detrás de esta definición estratégica es lo que vamos a tratar de desnudar en los próximos minutos (Figura A1).



Figura A1

El resumen el análisis del probablemente muy “retocado cuidadosamente” documento oficial, es el que ustedes ven aquí, con dos “bajadas” importantes, a) Chile tiene una oportunidad histórica, Chile tiene litio, Chile tiene un mejor futuro para la familia que son expresiones de deseo y mensajes de buenas intenciones b) en relación a la colaboración público privada, cuestión muy importante, yo quiero destacar algunas cosas que creo que nos van a dar una pista en lo que se pretende hacer o se pretendía hacer con este trabajo.

Primero, dice que el objetivo es fomentar las riquezas para el país lo cual tiene sentido, pero esta es una estrategia que no

persigue un objetivo concreto, solamente son ideas fuerza, normalmente las estrategias siempre definen un objetivo o meta concreta, siendo la estrategia el camino de cómo se llegará a esa meta. Luego vendrían los planes de acción concretos bajo esta definición.

Segundo, se indica que es necesario incorporar capital, tecnología y agregación de valor, en armonía con las comunidades y el desarrollo de la industria del litio, que será liderado por el Estado e involucrará al sector privado en todo el proceso productivo. Nuevamente expresiones gruesas de deseos e intenciones.

Ese es como el objetivo y claramente, a mi juicio, es bastante dogmático, porque asume una serie de cosas que vamos a ver a continuación con relación al conocimiento o a la capacidad que tiene el Estado para liderar una industria que ya existe, que está operando con bastante éxito a nivel global, y el riesgo que tenemos de que el Estado lo lidere.

Finalmente, se manifiesta que el Estado “aportará una visión estratégica de largo plazo en todo el ciclo productivo”, y habla desde la exploración hasta la agregación de valor, regulaciones, reinversión, etc. Y, por su parte, los privados aportarán el capital, la innovación tecnológica y redes de contacto. Si ustedes ven esos puntos de qué es lo que se pretende, no es a mi juicio una declaración sutil, es bastante obvia; esta es una decisión de tipo político que no tiene un fundamento técnico detrás, porque las intenciones son loables, al final todo esto se hace con nuestro dinero, con nuestros impuestos, pero no se indica cómo lo vamos a hacer. Implícitamente se revela la hipótesis de que el Estado podría hacerlo mejor lo que hoy día no está haciendo bien; esa es la hipótesis que está detrás de esto (Figura A2).



Figura A2

## La historia y la mitología basada en slogans

Les voy a mostrar una serie de frases que probablemente ustedes han escuchado durante estos últimos años. Como se dice que las palabras crean realidades, todas estas frases que se muestran a continuación de una u otra forma han ido creando un contexto de realidades falsas, a mi juicio, alrededor de la palabra litio, y de tanto repetirlas, empezaron a construir una realidad sobre la cual incluso se perciben los vagos fundamentos de esta política del litio o esta estrategia del litio. Al analizar estas frases, se aprecia que más del 95% de estas frases son falsas, simples slogans políticos sin fundamentos, declaradas dogmáticamente y eso es lo que vamos a analizar y como se relaciona con la vaga descripción de la llamada estrategia del litio (Figura A3).

¿LO HAN ESCUCHADO O LEIDO EN ALGUNA PARTE?

1. EL LITIO DEBE SER DE CHILE
2. EL LITIO SUSTITUIRÁ AL COBRE
3. EL LITIO SE EXTRAE EN FORMA PRECARIA Y SIN VALOR AGREGADO
4. CHILE DEBE APROVECHAR LA OPORTUNIDAD DE AGREGAR VALOR AL LITIO
5. EL LITIO DEBE SER EXPLOTADO POR UNA EMPRESA DEL ESTADO ASOCIADA CON UN PRIVADO
6. LA OPORTUNIDAD DEL LITIO A ALTO PRECIO ES DE CORTO PLAZO
7. NO HAY QUE PREOCUPARSE PUES LOS REQUERIMIENTOS DE LITIO SON INMENOS
8. HAY QUE UNIRSE LOS PAISES DEL TRIANGULO DEL LITIO PARA COLABORAR EN ESTE TEMA
9. BOLIVIA FABRICA AUTOS ELECTRICOS Y ARGENTINA BATERIAS
10. CUALQUIERA QUE SE INSTALE EN CHILE DEBE USAR LA TECNOLOGÍA DE EXTRACCION DIRECTA PARA EVITAR LA EVAPORACION DEL AGUA DE LOS SALARES
11. CHILE DEBE USAR EL DINERO DEL LITIO PARA CREAR CIENCIA Y TECNOLOGÍA
12. TESLA VA A INVERTIR EN CHILE
13. LOS CHINOS ESTÁN INTERESADOS EN ASOCIARSE EN CHILE Y APORTAR CON TECNOLOGÍA
14. LOS EXTRANJEROS COMPRAN LITIO Y NOS VENDEN AUTOS ELECTRICOS
15. LAS BATERIAS DE LITIO SERÁN SUSTITUIDAS POR BATERIAS DE SODIO
16. CHILE TIENE AUN MUCHOS SALARES DONDE HAY POTENCIAL
17. QUIEN EXPLORE EN CHILE DEBE FIRMAR UN COMPROMISO DE ASOCIACION FUTURA CON EL ESTADO DE CHILE COMO EVENTUAL SOCIO
18. LA EMPRESA NACIONAL DEL LITIO DEBE TENER PARTICIPACIÓN MAYORITARIA DEL ESTADO

**MITOS, SLOGANS Y DESEOS** Jaime Alée G.

Figura A3

Primero, la frase que se repite bastante y hasta fue un slogan de campaña, el litio debe ser chileno, que Chile tiene que ser el dueño del litio, etcétera.

Deseo decirles que esta frase tiene una intención perversa y malintencionada emocionalmente. Legalmente y escrito literalmente en piedra el Litio es de Chile como lo dijo Jorge Pedrals hace unos minutos; en el Gobierno Militar, se definió excepcionalmente como no concesible por ley, junto a los combustibles como gas y petróleo y materiales nucleares (todo esto último es una frase al aire, pues Chile no posee estos recursos). Por tanto, el Litio es quizás el único recurso minero que Chile sí posee, pero que no es concesible. Es difícil intentar estatizar o nacionalizar lo que ya es de Chile.

En esta época se entregaron pertenencias a Corfo en Atacama y Corfo nunca las explotó, sino que más bien desarrolló empresas, sociedades mixtas, que finalmente terminó arrendándolas a privados con cuotas de explotación que es lo que ocurre hasta el día de hoy, o sea el Estado tuvo la oportunidad durante muchísimos años de hacerse cargo, de que Codelco los explotara etc., pero no lo hizo y fue una decisión del Gobierno arrendarla a privados cosa que no ha cambiado hasta ahora. Esas empresas privadas son las que invirtieron y operan esta explotación en forma muy exitosa.

Hace apenas 6 años, en el Gobierno de la presidenta Bachelet, se renegociaron los contratos de arriendo con los dos incumbentes que son la norteamericana Albemarle y la chilena SQM. Estos nuevos contratos implicaron una fórmula de arriendo proporcional al precio del Litio y aplicada al monto de la venta (no de las utilidades, por las cuales se pagan impuestos adicionales). Además, hay definida adicionalmente proporciones de pago extra en fondos para la ciencia, comunidades, precios preferentes para socios del Estado, etcétera.

Como todos saben, estos contratos han beneficiado al fisco en el año 2022, de una manera extraordinaria; tan extraordinaria, que superó los ingresos de toda la minería del cobre (Figura A4).

EL LITIO DEBE SER DE CHILE

- ES DE CHILE y no concesible por ley, dictada en gobierno militar. Mal se puede estatizar o nacionalizar
- En esa época, se entregaron pertenencias a CORFO en el salar de atacama, las cuales, si bien intentó explotar y creo sociedades mixtas (estado- privadas). Finalmente terminó arrendándolas a privados con cuotas de explotación.
- Hace apenas 6 años, en el gobierno de la presidenta Bachelet, se re-negociaron sendos contratos de arriendo con los incumbentes que implican enormes royalties y entrega de fondos para ciencia, comunidades, precios preferentes para socios del estado, etc.

**MITOS, SLOGANS Y DESEOS** Jaime Alée G.

Figura A4

Otros de los puntos que se mencionan en la Figura 3, son que el litio se extrae en forma precaria y que no hay valor agregado. Ello no es cierto y quiero mencionarles que el litio que produce Chile es un producto final que se llama litio de calidad batería y que tiene un 99,9% de pureza, con

una serie de variedades de sabores, por así decirlo, que se venden a los clientes extranjeros, con distintos componentes, granularidad y un montón de detalles en grandes volúmenes. Este litio altamente refinado, se usa directamente en la fabricación de baterías.

Para producir este material que pasa desde el 5% de concentración a la salida de la explotación, hasta el 99,9%; hay un proceso químico extremadamente sofisticado, para obtener carbonato o hidróxido de litio grado batería, que ha significado grandes inversiones en refinerías. Chile vende toda su producción en este nivel o sea vende directamente a los fabricantes de baterías, a diferencia de Australia, por ejemplo, que vende un porcentaje importante de su producción como concentrado de Litio a China, país que hace la refinería.

China importa litio no refinado en Australia y sus refinerías producen el producto final para sus propios clientes dentro de China. China entonces es realmente parte de la cadena de valor del litio ya que ellos compran el material no refinado, desde Australia principalmente.

En resumen, hay solo 5 países que representan el 97% de la producción de litio para baterías en el mundo que son: Australia, Chile, China, Argentina y Estados Unidos. Donde Argentina y Estados Unidos representan apenas el 5%. Por lo tanto, Chile, China y Australia (combinados como se explicó) son los 3 principales productores de litio calidad batería en el mundo. Llegar a este ranking no es fácil, y por supuesto que, como se menciona majaderamente, si fuera un producto precario y sin valor agregado, habría muchos otros más y no tendríamos esta posición tan exageradamente buena para nuestro país, por lo tanto, yo creo que el litio o las empresas de litio llegan al tope de su línea de producción que es el producto más perfecto posible, lo demás lo vamos a ver a continuación (Figura A5).

Esta una frase muy repetida y es bastante irónica, y voy a dejar en realidad a César Hidalgo para que profundice él con este tema, desde el punto de vista de la evidencia. Yo solo mencionaré un aspecto que contiene un error reiterativo y majadero que refleja desconocimiento industrial o mala intención. Ello es que Chile debe aprovechar la oportunidad para ascender en lo que se denomina “la cadena de valor del litio” y producir, por ejemplo, baterías. Este eslogan que se viene repitiendo ya hace por lo menos 10 años y que incluso ha generado llamativas láminas de CORFO al

respecto, muestra algo que es bastante vendedor de ilusiones, aunque bastante poco serio. Ello es que si uno vende litio debería automáticamente pensar en producir baterías (y eventualmente vehículos eléctricos). Ello podría multiplicar por 8 el valor de las ventas.

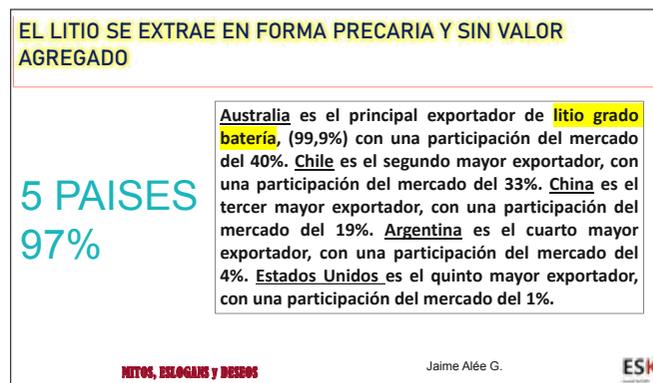


Figura A5

Si bien eso es obvio, vender productos industriales que usan litio implica escalar el nivel de facturación, también implica aumentar proporcionalmente la complejidad y el costo de producirlos, tanto en capital monetario, como capital humano. La cadena de valor tiene que ver con la utilidad y no con el valor del precio del producto.

Además, uno no puede simplemente saltar de producir un insumo que representa apenas el 5% del valor del producto industrial, como una batería, a ser competente en la fabricación del 95% del valor agregado restante. Hay infinitos ejemplos de lo absurdo de esta hipótesis.

Les voy a dar un solo ejemplo que es un poco irónico, pero creo que es bastante decidor, para graficarlo consideremos a Costa de Marfil que como un buen y gráfico ejemplo.

Costa de Marfil es el principal productor mundial de cacao en el mundo. El cacao, como ustedes saben, se usa principalmente para producir chocolate, sin embargo, los países que más chocolate exportan e importan, son los países que se ven en el cuadro de abajo, como Alemania, Bélgica, etc., esos son exportadores de chocolate e importadores de cacao.

Qué diríamos si Costa de Marfil repitiera el slogan chileno de la famosa “cadena de valor” y se dijera que, en vez de producir cacao, podrían producir chocolates finos; de

acuerdo con el modelo chileno, podrían triplicar su facturación. Probablemente lo veríamos como algo absurdo y muy simplón.

Al final, básicamente se resumen en que “no porque yo hago buena sal, voy a hacer buenas ensaladas”. Creo que el dominio de nuestro negocio es el dominio de la minería del litio, hasta el límite de su calidad. La definición de otros dominios tiene que ver con la política industrial del país, ya sea voluntaristamente como Corea o Japón o también Argentina o en base a competencias y ventajas de mercado, como EE UU o México.

Volviendo al litio nosotros tenemos un costo de menos de US\$4.000 y por tanto con precios de US\$10.000 ganamos dinero. Somos altamente productivos y competitivos, por la calidad y la fortuna de tener extraordinarias y ricas reservas, y a mi juicio, lo que debiéramos hacer es concentrarnos en producir más litio. Si queremos entrar a otros negocios, como baterías, no hay problema, pero no debería achacarle a la minería del litio la obligación de pasar a otros negocios.

Ni siquiera es ventaja comparativa el tener litio para entrar al segundo dominio más próximo que es producir material de cátodo. No tenemos ventajas comparativas y si lo queremos hacer, lo haríamos como lo hacen los que están haciendo hoy día sin tener litio, por lo tanto, este paso que parece como súper lógico de que yo voy a pasar de producir litio a producir celdas de batería, no tiene ningún sentido común mirado desde esa perspectiva, quizás si tuviéramos un mercado y mirándolo al revés desde la perspectiva de tener un mercado de baterías y armar una oferta interna, potenciando la industria, independiente del litio podría hacer otra cosa, pero asignarle al litio la obligación de eso, es absurdo.

Bien eso es lo que quería decir respecto de este tema, por lo tanto, este es uno de los famosos slogans que no son ciertos (Figura A6).

Se asume por un año extremadamente exitoso (2022) que el litio sustituirá al cobre en Chile en el futuro, eso es muy típico de nosotros que proyectamos el futuro en base a lo que está ocurriendo en el tiempo real, y no vemos la historia del pasado o los números hacia el futuro las evidencias, las evidencias son las siguientes:



Figura A6

El volumen de ventas del litio a nivel global para el 2030 superará los 3 millones de toneladas, el cobre se espera llegue a 30 millones de toneladas, para empezar, estamos hablando de volúmenes distintos, todavía no llegamos a vender a nivel mundial, no se llega a consumir 1 millón de toneladas de litio, ya el cobre supera las 20, 25 millones de toneladas, el cobre se vende en otros volúmenes, el litio se usa poco, se usa en pequeñas cantidades.

El récord del precio del litio llegó a un promedio de USD 55.000 mil dólares por tonelada del año 2022 el año pasado, sin embargo, se espera un precio de menos de 15.000 al año 2030, eso hay que tenerlo en cuenta.

El cobre se transaría el mismo año 2030, según mis estimaciones alrededor de unos USD 8.000 mil dólares por tonelada.

Si nosotros hacemos un cálculo muy simple, significaría que el año 2030 el litio, a nivel global, representaría un negocio global de unos USD 45 mil millones de dólares contra USD 240 mil millones de dólares del cobre, es decir, el cobre seguirá siendo una gran industria en volúmenes distintos, con complejidades también distintas en la minería de minerales, de materiales, metálico, el litio es no metálico por eso son empresas químicas las que lo producen, y eso significa pasar a una triste realidad.

Las ventas de litio en Chile jamás superaron los US\$900 millones hasta el año pasado, en que saltaron a USD 8.000 mil millones de dólares. Esta cifra no se volverá a lograr hasta muchos años más o quizás nunca más en la historia.

No entiendo por ello el escenario en que está fundada la estrategia cuando se dice Chile tenemos litio vamos a hacer ricos, hay que aprovecharlo y todo lo demás. ¿Qué va a pasar cuando la cifra baje de los USD 1000 mil millones de dólares, como fue el año antepasado?, (en realidad fueron cerca de USD 600 millones de dólares).

Hay que tenerlo en cuenta porque ese es el escenario del futuro (Figura A7).



Figura A7

Siguiendo con mi presentación hay una cantidad de confusiones respecto del litio que se mezclan palabras que quiero aclarar y que también generan dificultades.

Primero hay que distinguir una diferencia notable en lo que son las reservas y los recursos.

Los recursos son materiales, por ejemplo, litio, que se sabe que existe, pero no está cuantificado y tampoco es explotable en términos económicos rentables. Por ejemplo, el mar tiene gran cantidad de recursos de litio, sin embargo, es solamente un recurso, pero hoy día no es explotable porque no dan los números, básicamente no es que técnicamente sea difícil, simplemente no dan los números, es como ocurrió con el petróleo hasta que empezó a explotarse bajo el mar, pero al principio se sacaba solo de perforaciones en la tierra.

Por otro lado, las reservas de litio son recursos cuantificados y que se pueden explotar rentablemente. Existe un referente que es la USG de Estados Unidos que publica recurrentemente los recursos y reservas mineras actualizado año a año.

Este cuadro que muestra en pocas imágenes lo que ocurre a nivel mundial. Para sorpresa nuestra, en el mundo hay solo 8 países que producen litio, 8 países en todo el mundo, pero eso no significa que haya escasez de litio, todo lo que está en forma achurada en este cuadro, son países que tienen recursos, pero no reservas, por ejemplo, Bolivia que acaba de adjudicar una licitación, no se considera que tiene reservas sino solamente recursos. Bolivia no exporta el litio ni produce el litio, no ha producido ni un gramo de litio, mal podríamos armar un triángulo del litio para armar un cartel con un país que no produce litio.

Si ustedes observan la relación entre los recursos y las reservas, Chile es uno de los países cuya proporción de Recursos v/s Reservas es la más alta. Según el cuadro, se observa que Chile tiene del orden de 10 millones de toneladas de recursos, y que casi todas sus reservas son recursos, por eso ocupa un lugar importante en el mundo.

Según el último estudio de la USG se considera que hay 89 millones de toneladas de recursos estimados en el mundo potencialmente disponibles para transformarse en reservas. Sin embargo, lo importante de destacar algo muy relevante: el recurso es para pasado mañana y transformarlo en un producto, la reserva es para mañana y la producción es para hoy.

Eso se alinea con lo que les dije antes, que los precios son de hoy, pero uno tiene que mirar los precios de mañana y de pasado mañana, para entender cómo hacer el negocio en el futuro, para solamente ajustar la temporalidad en nuestro objetivo de país (Figura A8).

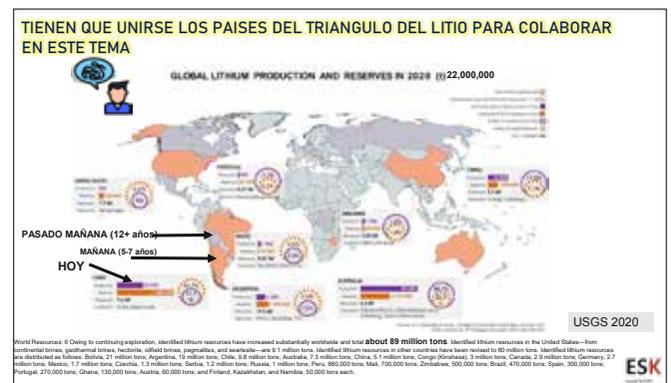


Figura A8

Otro tema que aparece también en la política de litio es que la manoseada nueva tecnología de extracción directa permitirá acelerar la producción. El litio se extrae de los salares a través de un proceso bastante antiguo y aparentemente rústico, que es a través de piscinas de drenaje y secado por radiación solar.

Ello, a nivel de las producciones actuales de miles de toneladas, ha derivado en un proceso bastante sofisticado desde el punto de vista técnico y científico, ha tomado muchos años llegar a la sofisticación de producir el litio, sacar el litio de los salares, a través de una serie de piscinas y por métodos industriales sofisticados ir decantando el material que está en el compuesto de la sal hasta llegar a producir el litio. El proceso dura aproximadamente 1 año, desde que se llena la primera piscina hasta que se extrae finalmente el litio en la última de ellas, es un proceso bastante sofisticado pero que tiene un montón de ciencia y técnicas bastante complejas. Es también un excelente aprovechamiento de la naturaleza de Atacama. Ello es muy rentable económicamente y está muy afinado.

El nuevo método de extracción directa que se pregona implica básicamente obtener la salmuera directamente a través de un proceso de filtrado donde través de filtros se extraiga directamente el litio bajo presión, como un filtro de agua. Como cuando uno prepara una ensalada, por ejemplo, esto es lo que se llama una metodología de extracción directa.

En la política del Litio, esta tecnología sería una condición para operar en Chile, o sea, en Chile se exige operar con esta tecnología, lo cual a mi juicio es un desconocimiento en relación a cómo se deben hacer las cosas en un proyecto de ingeniería; nunca un país debe exigir una tecnología o una marca, solo colocar los bordes ambientales y regulatorios (Figura A9).

(Esta tecnología que suena muy interesante puesto que acortaría los plazos de producción de un nuevo proyecto, aún no está validada y nivel industrial completamente. De hecho, la extracción del salar de Maricunga donde supuestamente operará CODELCO inicialmente está pensado a través de secado por piscinas, lo cual es lógico, pero contradice la esencia de la exigencia técnica del propio documento que resultó en la creación de esta nueva filial de CODELCO. Ello solo reafirma que el documento estratégico se pasó varios pueblos al entrar en tierras desconocidas).

LA TECNOLOGÍA DE EXTRACCION DIRECTA PERMITIRA ACCELERAR LA PRODUCCION Y AYUDA A EVITAR LA EVAPORACIÓN DEL AGUA DE LOS SALARES

Ojalá, por ahora es una hipótesis de costo impredecible  
PERO HAY QUE CONSIDERAR:

- Costo versus evaporación
- Efectos ambientales colaterales (uso de agua)

Nunca un país debe exigir una tecnología o una marca, a lo más debe tener normas ambientales que deben satisfacerse. De lo contrario seremos rodeados de vendedores de picon y palas

MITOS, EXAGIOS Y DEZOS

Jaime Alée G.

ESK

Figura A9

También, se estableció que el litio debe ser explotado por una empresa del Estado asociada con un privado. ¿La razón? Supuestamente ello se referiría a que sería un mejor negocio para el Estado controlar el negocio. Si analizamos este modelo ex post para el pasado 2022, se ve que el fisco obtuvo desde SQM USD4.300 millones de dólares.

En el balance simplificado de SQM, USD 1.300 millones fueron por impuestos y USD 3.000 millones por la renta, lo cual es un resultado extraordinario, donde el Estado no tomó ningún riesgo.

Adaptando la situación a lo que se propone para el futuro en esta misma eventual propiedad minera, y asumiendo que el Estado participa en un 51% y aplicando ese modelo a los resultados del año pasado, el Fisco hubiera obtenido casi lo mismo, pero hubiera recibido principalmente a través de impuestos a las ganancias. Ello es muchísimo más riesgoso y engoroso que una renta de arriendo proporcional a la facturación.

La justificación para cambiar esta cómoda situación no la conozco, salvo voluntarismo o ideología, ya que entrar en una propiedad solo para tener el poder de decisión no tiene una razón, menos aún cuando se juega con el dinero de nuestros impuestos (Figura A10).

Y hay que tener en cuenta que el precio del litio va a caer a menos de USD20 mil dólares en el corto plazo (Figura A11).

Hay también una declaración explícita en la estrategia respecto a que Chile debería aprender de esta minería e invertir en capital científico y humano, sin embargo existe una cuenta bancaria que hoy día tiene más de USD50

millones de dólares, que están siendo mensualmente entregados por las empresas justamente para esto, y que el Estado de Chile no ha sido capaz de usarlo en los últimos años desde que se empezó a ingresar este dinero, incluso el famoso Instituto de Tecnologías Limpias que es con el cual se iba a financiar este dinero, aún no va a comenzar a operar hasta 1 o 2 años más.

de litio, hay mucho litio en el mundo, nos interesa sí la refinería del litio, porque eso es lo que está truncando el mercado y Chile es uno de los principales refinadores del mundo (Figura A13).



Figura A10

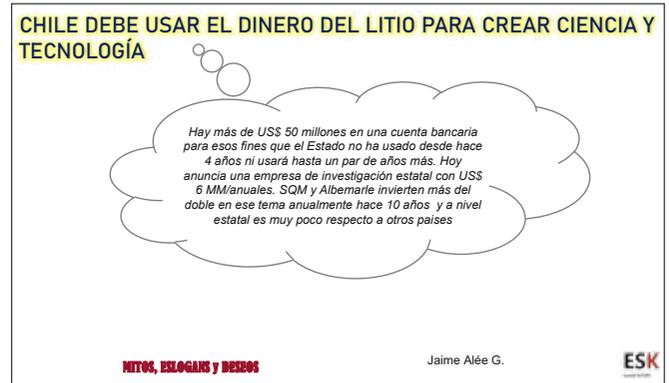


Figura A12



Figura A11



Figura A13

Y, por otro lado, se está diseñando, según la estrategia, la creación de un Instituto del litio, aunque no hay definiciones de que hará ni cuándo lo hará (Figura A12).

Una frase graciosa y recurrente es que Tesla va a invertir en Chile, esto es anecdótico, pero esta es una foto de Elon Musk en Chile con su novia en el año 2017, básicamente carreteando, esto fue el inicio de una serie de especulaciones que duran hasta el día de hoy, donde dicen que Elon Musk va a invertir en Chile y la verdad que la frase de Elon Musk es súper simple y dice: no nos interesa la producción

Por último y para ir cerrando esta presentación, los chinos estarían interesados en asociarse en Chile, aportar con tecnología, para eso solo relato lo que dice la presidenta de BYD Estados Unidos que acaba de firmar un contrato con Chile, para producir material de valor agregado. En una entrevista dice: “estamos buscando oportunidades a nivel mundial desde Santiago, así que en África y Chile también en Argentina; nos gustaría participar en todos los países que tienen reservas litio para reservar el futuro, básicamente está en una posición geopolítica y China no tiene ningún interés en fabricar tecnología o valor agregado en Chile, de hecho, dice claramente que ellos no van a fabricar baterías de celdas de litio en estos países ni siquiera baterías”.

Por lo tanto, las medidas entusiastas del país en recibir inversionistas deberían considerar la geopolítica y no dejarse engatusar por entusiastas presentaciones de power point. Una posición geopolítica de China, que está tomando territorios que son importantes para tener reservas de ellos, y no de terceros países que puedan ser afectados políticamente (Figura A14).

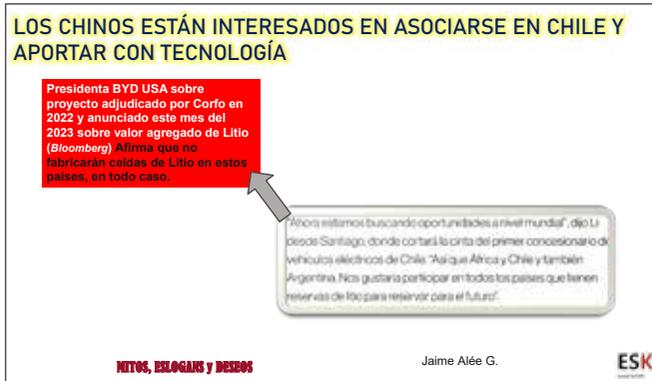


Figura A14

Por otra parte, se dice que el litio va a ser sustituido por baterías de sodio (les doy un link a una columna mía), pero básicamente también es una falsedad, la misma compañía que anunció las baterías de sodio, anunció las baterías de estado sólido de litio, es decir, CATL que es la empresa más grande de baterías del mundo, va a producir baterías de todos los sabores, de todos los tamaños, para quien lo necesite, pero los autos van a seguir usando baterías de litio, sin duda, hasta por lo menos los próximos 10 años, pasando a la siguiente generación de baterías (Figura A15).

El sentido común indica que, si uno quiere hacer una política de litio, básicamente debe ceñirse a lo que se puede hacer hoy día y para efectos del precio, me concentraría en el precio actual.

- Aumentar el plazo del contrato actual para SQM
- Aumentar la cuota a cambio de exigir inversión en crecer rápidamente la operación y la refinería, al doble actual en los próximos 4 años,
- Exigir mejores condiciones medioambientales como parte del nuevo contrato,
- Eventualmente mejorar las condiciones económicas en el margen.

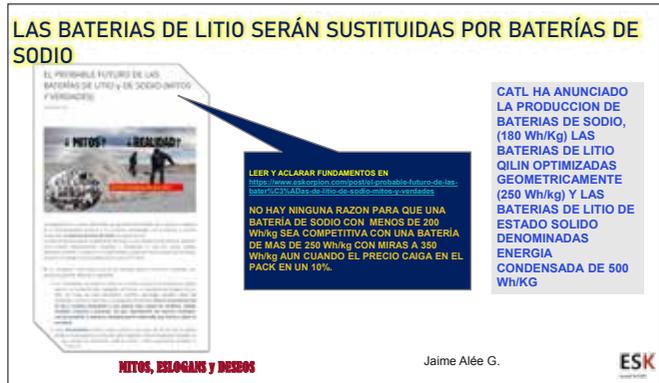


Figura A15

Nada más. Jamás debería el Estado meterse en el negocio y menos asociarse, yo creo que SQM aceptaría esto, ampliaría el contrato y tendríamos inversiones ahora para que en los próximos 4 años podamos duplicar la producción de litio que es lo que realmente necesitamos que hagan con nuestro dinero, repito nuestro dinero y lo usen eficientemente para mejorar la calidad de vida de los chilenos (Figura A16).

Muchas gracias.

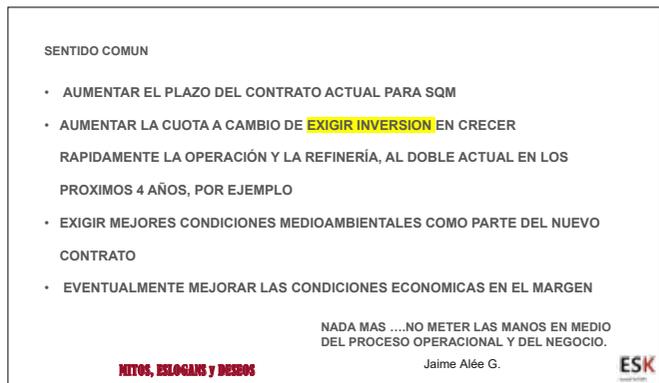


Figura A16

A continuación, con la exposición de don César Hidalgo.

**Sr. César Hidalgo.**

—Muchas gracias Jorge Pedrals, muchas gracias Jaime Alé, para mí esto es muy interesante porque también aprendo mucho. Este mes cumplo 19 años fuera de Chile y entiendo que existe una conversación sobre este tema, pero

realmente no participo de manera tan cercana, entonces esto me ayuda mucho a entender un poco dónde está la conversación, cuáles son los distintos argumentos que se están intercambiando, etc. Por ello, lo que voy a exponer va a ser quizás un poquito más alejado, voy a hablar de la complejidad económica y el litio, no con un conocimiento íntimo de la política, ni de los procesos, sino que desde una perspectiva quizá un poquito más matemática y abstracta (Figura B1).



Figura B1

Estoy partiendo con estos temas de la complejidad económica que, de manera simple son el uso del aprendizaje de máquina o estos métodos de data science, como la teoría de redes, aplicados a data sobre la geografía de las actividades económicas y redes económicas, para poder predecir, entender y explicar las trayectorias de desarrollo.

Entonces lo que tenemos acá es básicamente un cambio metodológico, donde hay una pregunta que es eterna, esta pregunta de entender las dinámicas de desarrollo de los países de las regiones, pero lo que tenemos son cambios tecnológicos a partir de datos más desagregados y de métodos que nos permiten trabajar con esa data más desagregada, para poder entender mejor estas trayectorias (Figura B2).

Pero, ¿por qué necesitamos el aprendizaje de máquinas? La razón por la que necesitamos el aprendizaje de máquinas, es porque los factores de producción y en particular el conocimiento, son muy específicos, son no fungibles, ¿no es cierto? Cuando uno va a la Universidad hay muchas carreras distintas, y de hecho cuando uno se especializa empieza a entender que el mundo del conocimiento puede llegar a ser demasiado específico, en biología, por ejemplo,

el conocimiento puede ser tan específico que hay conferencias enteras dedicadas a un receptor de una cierta proteína, y así. Entonces, este conocimiento que nosotros tenemos del cual se genera el mundo, se genera la economía, por el hecho de ser no fungible no se puede agregar fácilmente, estas partes no son intercambiables, tú no puedes cambiar a un cirujano por un pianista o por un peluquero, todo conocimiento es específico y lo que necesitamos es una matemática que nos permita trabajar con estas partes que no son intercambiables (Figura B3).

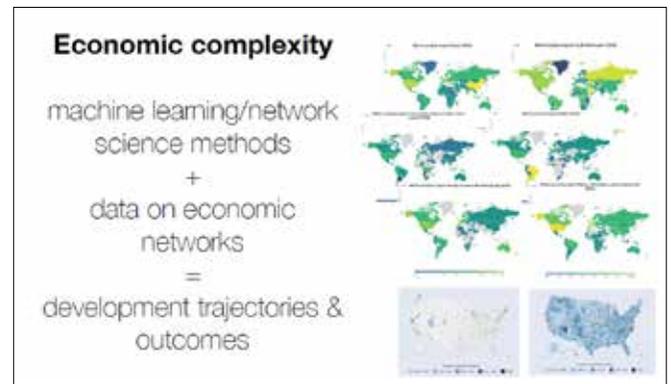


Figura B2

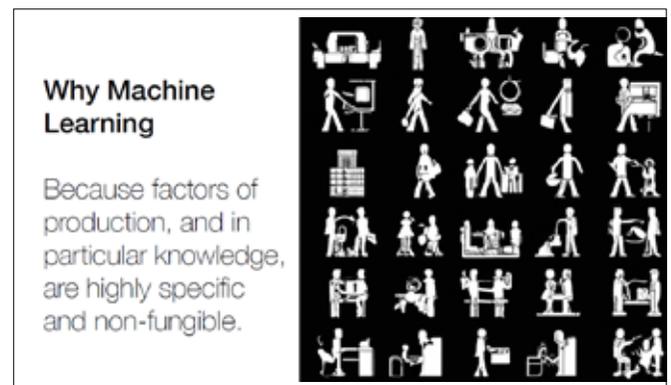


Figura B3

Y esto básicamente lo que está ocurriendo durante los últimos 10 años, entonces se está usando ChatGPT, que es una tecnología que permite generar texto (Figura B4).

La razón por la que esta tecnología puede generar texto, es porque tiene una manera de predecir las palabras que siguen a continuación de una cierta frase u oración (Figura B5).



Figura B4

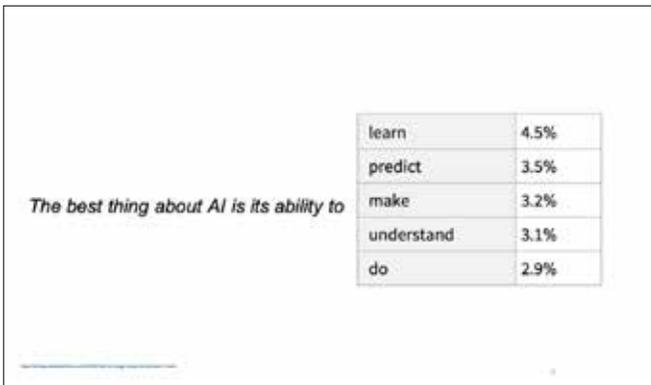


Figura B5

Esta tecnología funciona, porque toma una representación del mundo que no es una representación agregada, entonces ChatGPT se dedicará a asignar las palabras a estas distintas categorías, se acuerdan de ese análisis morfosintáctico que uno hacía en la escuela, a los verbos, los adjetivos, etc., básicamente podríamos generar oraciones que serían gramáticamente correctas, pero que no tendría sentido, porque juntar un sustantivo con un verbo y con un adjetivo, en general no va a tener mucho sentido, las palabras tienen un significado que va más allá de estas categorías agregadas (Figura B6).

Y lo que hacen estos algoritmos de aprendizaje de máquina, es que desarrollan representaciones donde la identidad de estos elementos no se pierde, no tenemos agregación, las palabras no son solo un verbo o un sustantivo o un adjetivo, sino que tienen una representación un espacio de historial, donde preserva su identidad y eso nos permite capturar de forma matemática lo que llamamos significado en una oración. Si yo cambio la palabra perro por la palabra Dios

es una oración muy distinta, pero realmente cambié solo un sustantivo por otro, con una representación más detallada, soy capaz de capturar esos cambios de significado (Figura B7).

Verbs	Nouns	Adjectives	Adverbs
accuse	accusation	accusing	accusingly
argue	argument	arguable	arguably
characterize	character	characteristic	characteristically
condition	condition	conditional	conditionally
darken	dark, darkness	dark, darkened	darkly
destroy	destruction	destructive	destructively
drink	drink, drunkenness	drunk, drunken	drunkenly

Figura B6

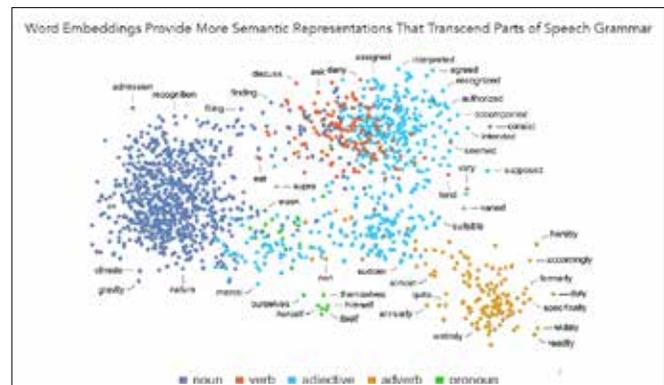


Figura B7

Este algoritmo también funciona, porque sabe cómo conectar estas palabras, como prestarles atención a ciertas palabras en una oración, para entender el significado de las otras y este es parte de los grandes avances que nos ayudaron a desarrollar estos modelos (Figura B8).

¿Por qué es tan interesante esto? porque realmente éste es un problema que matemáticamente es muy difícil; no es un problema trivial. Si nosotros tomáramos un diccionario de 10 mil palabras, lo podemos poner en un vector de 10 mil filas y eso es bastante simple, pero ahora imagínate que queremos empezar no solo a aprender palabras, sino que queremos ver pares de palabras, qué palabras concurren con otra, bueno ahí tenemos 10 mil por 10 mil y eso ya son 100 millones de pares y un poquito más grande. Si queremos

hacer tríos de palabras, si queremos hacer grupos de cuatro palabras, 5 palabras, cuando llegamos a 20 palabras que no es una oración extremadamente larga, tenemos 10 a 80 combinaciones posibles, eso es más que la cantidad de partículas en el universo similar en tamaño (Figura B9).



Figura B8

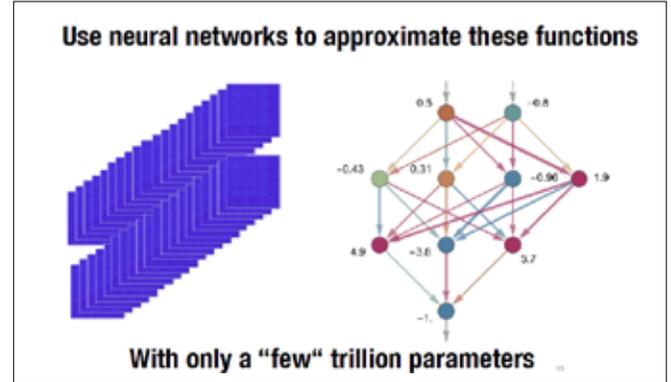


Figura B10

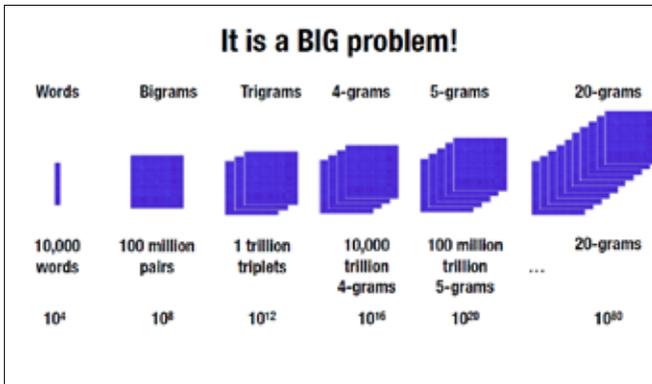


Figura B9

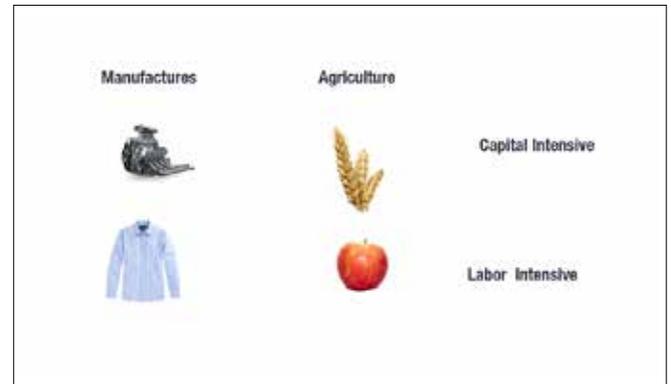


Figura B11

Entonces, lo que esto tiene de gracia es que básicamente los matemáticos y los ingenieros de la computación, han descubierto la manera de aproximar estas funciones que nunca podríamos aproximar de forma bruta, usando esta red neuronal, aproximar una función que realmente, si uno la expandiera completamente, sería más grande que lo que uno podría almacenar con todos los átomos del universo (Figura B10).

Y en economía tenemos un problema más o menos similar. Por muchos años hemos tomado descripciones de la economía que se basan en agregaciones, donde perdemos la identidad de los elementos, tenemos manufactura, tenemos

agricultura, tenemos productos que son intensivos en capital o intensivo en el trabajo, pero estas agregaciones son como los verbos, como los sustantivos, son cosas a las que estas cosas se pueden agregar, pero no son de lo que realmente están hechas, no tienen el significado (Figura B11).

La idea es que básicamente, así como podemos contar el número de veces que una palabra concurre en una oración o un párrafo o en un texto, podemos también contar cómo las actividades económicas concurren en las distintas geografías para generar representaciones que preservan ese significado, y esto es básicamente la complejidad económica que es la aplicación de estas ideas que nos ayudan a generar, por ejemplo, el lenguaje, en un contexto de aprendizaje de máquina aplicado al texto, al desarrollo económico donde en vez de tener párrafos tenemos economías y en vez de tener palabras tenemos quizás productos, industrias, tecnologías etc. (Figura B12).

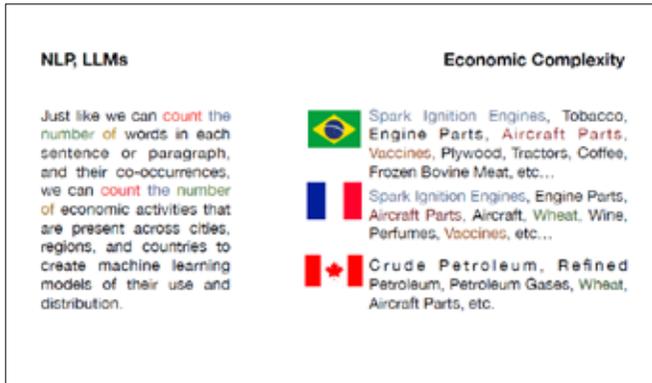


Figura B12

Tenemos estas representaciones mucho más detalladas donde cada producto, cada industria, cada tecnología, tiene una representación única y en un contexto sobre las otras tecnologías, así como en el uso de palabras sabemos que el té y el café son similares, porque concurren con la palabra tomar o desayuno, podemos saber quizás dos productos son similares, porque tienen algo que concurrir en las economías (Figura B13).

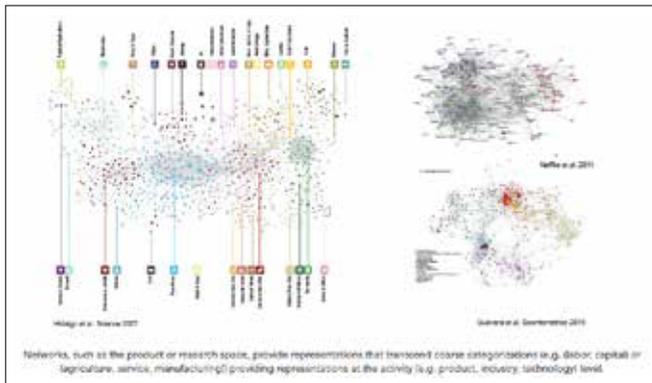


Figura B13

Dos métodos principales en esta área del conocimiento, uno es el relatedness o la afinidad como me gusta traducir en español y lo otro son los índices de complejidad (Figura B14).

La afinidad es básicamente una medida de la distancia entre el conocimiento que existe en una economía y es esta actividad económica, qué tan lejos está Chile del litio o qué tan lejos está Chile de las baterías de litio o qué tan lejos está Chile de los automóviles eléctricos etc. Y se basa en el uso de sistemas de recomendación similares a los que Netflix

o Amazon usa para recomendar libros o para recomendar películas (Figura B15).

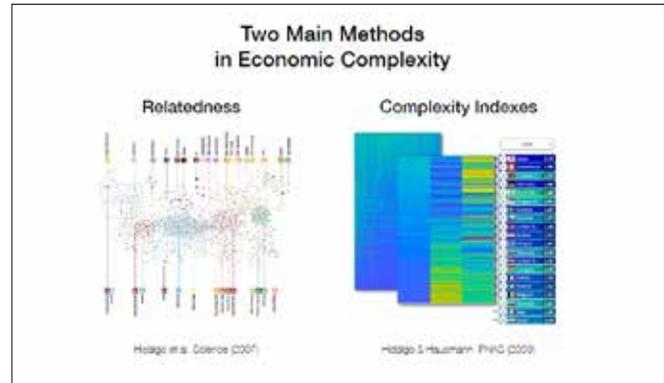


Figura B14

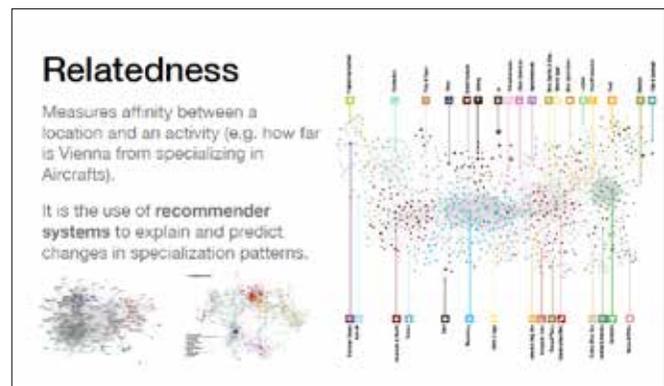


Figura B15

Este es un principio que es bastante general, durante los últimos 10 años esto se ha demostrado como un principio válido, para un gran número de actividades distintas, para productos, para industrias, para publicaciones, para patentes, y también hay un gran número de escalas geográficas, entonces esto no es solo para los países, sino que es para las regiones, para las ciudades etc., entonces es un principio general de cómo se desarrollan las economías (Figura B16).

La otra idea es la complejidad económica, este es el uso de métodos que reducen la dimensionalidad de la estructura productiva, para generar estas medidas de sofisticación de las economías o de los productos, y que están validadas porque básicamente son medidas que nos ayudan a predecir o explicar variables macroeconómicas importantes, como diferencias en el crecimiento económico, diferencias

en los niveles de desigualdad entre los países y diferencias en las emisiones, ahí pongo alguna de las referencias, pero realmente hay docenas y docenas de referencias, que han validado este indicador (Figura B17).

Este es un mapa donde todos estos productos y si es que el color es más amarillo, más cálido, estos son productos que, aunque Chile no haga, tienen mayor probabilidad de hacer, y si los colores son más oscuros, son productos donde Chile tendría menor probabilidad de entrar, son más difíciles de entrar (Figuras B19 y B20).

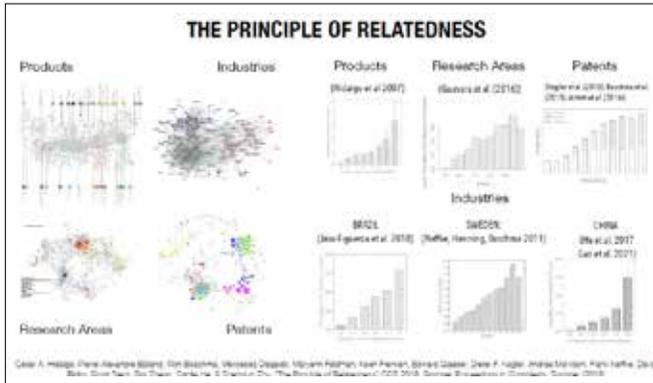


Figura B16

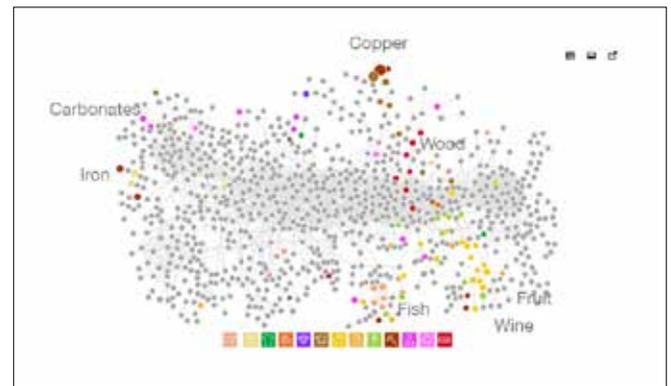


Figura B18

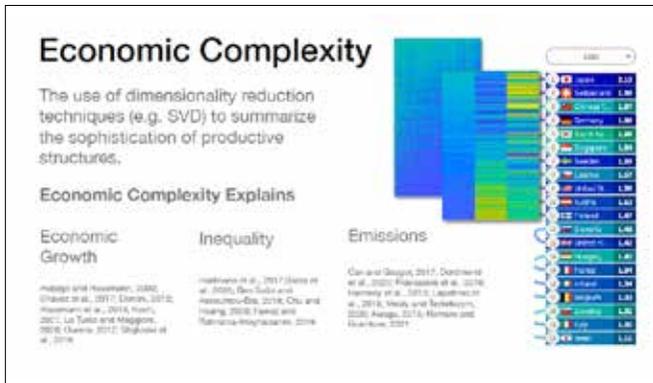


Figura B17

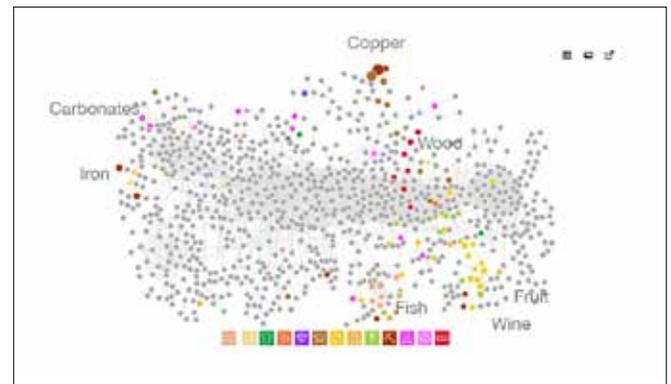


Figura B19

¿Dónde está Chile en esta representación? Acá tenemos el espacio producto y tenemos en colores los productos en que Chile está especializado en el año 2021, vemos allá arriba un clúster de cobre, después vemos en rojo, todos los productos forestales, ahí quizás estaría la novena región, la octava región, después tenemos la parte con la fruta y con el vino, abajo en amarillo, y en verde, tenemos el clúster de pesca y después al lado izquierdo de la pantalla, hay una parte de carbonatos que está un poquito más conectada a la industria química y también está la parte de mineral de hierro (Figura B18).

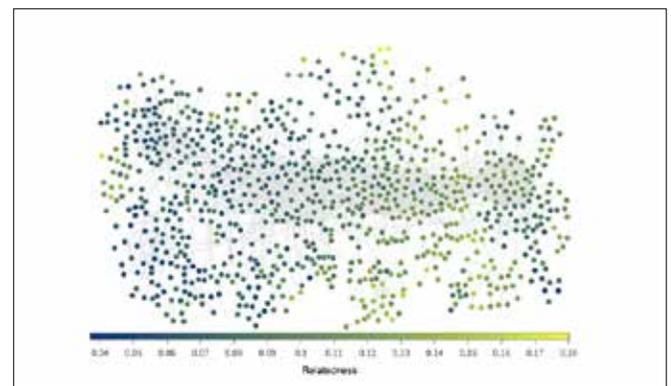


Figura B20

Podemos pasar de esta representación donde vemos la especialización; el país está especializado o no en una actividad, a una representación donde mostramos la afinidad.



Entonces, ¿cómo llevamos estas ideas a un contexto de estrategias? esto es un paper que salió esta semana, sobre las implicaciones de la complejidad económica; lo que hacemos acá es que tratamos de poner estas ideas en un marco de cuatro preguntas, son las 4 W en inglés, *what, when, where and when*, pero en español eso sería, el qué, el cuándo, el dónde y el quién (Figura B24).



Figura B24

El qué es lo que hemos estado viendo hasta ahora, es básicamente adónde vamos a apuntar, cuáles son las industrias o actividades económicas, que nos gustaría desarrollar en el futuro o en que nos vamos a querer especializar y lo que te proveen estos diagramas de afinidad y complejidad, es que nos muestra que hay distintos países, que están en situaciones bastante distintas. En la columna izquierda tienen a Angola y es un país donde todos los productos que le quedan cerca son productos de baja complejidad, pero en la columna derecha tienen a Singapur, que es un país donde los productos que le quedan cerca son todos de alta complejidad, entonces, lo que esto nos ayuda a entender, no es lo que deberíamos hacer, sino que dónde estamos parados y para poder hacer estrategia hay que saber un poco cuál es el mapa y hacia dónde sopla el viento (Figura B25).

Y un poco esa es la metáfora que me gusta usar acá, que de cierta manera estos métodos no te están diciendo qué hacer, sino que te están diciendo básicamente qué tan difícil es hacer algo o no, pero si tú quieres ir a favor del viento o quieres ir en contra del viento, es algo que realmente es una decisión normativa que es distinta a la inercia que te muestran estas alternativas; por lo tanto, uno se puede empezar a preguntar en qué momento vamos a ir navegando con el viento a favor, el viento en contra y si queremos ir con el

viento en contra, porque muchas veces tenemos que ir a un lugar que no es al que llegaríamos naturalmente, cómo lo hacemos y acá es donde entran las otras 3 W (Figura B26).

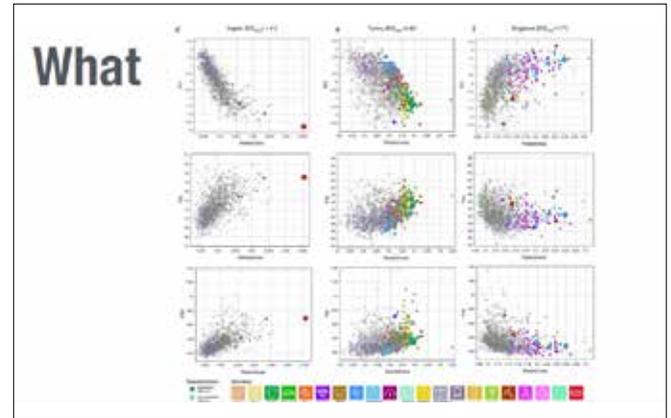


Figura B25

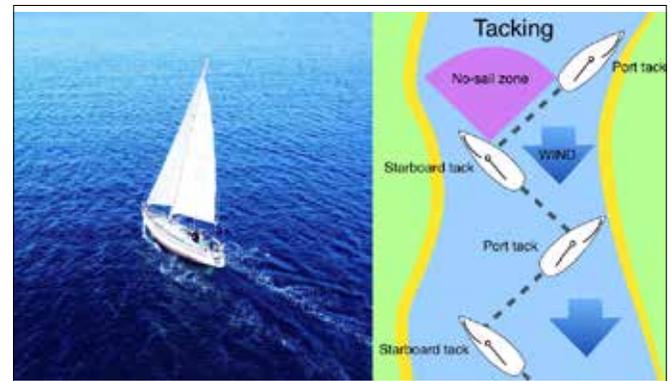


Figura B26

La siguiente W es el Cuándo, uno tiene un país o una economía que va pasando por un proceso de desarrollo y uno se pregunta, ¿tengo que siempre concentrarme en lo que ya sé hacer o en las actividades afines? o ¿en algunos momentos me conviene tratar de desafiar la afinidad y entrar a actividades que son menos afines?, hay algún argumento matemático para esto y la verdad es que sí, nosotros demostramos en el 2018, que entrar solo actividades afines matemáticamente es su óptimo, entonces voy a tratar de contarle esta historia con una figurita.

Imagínense que acá esta red muy simple es el espacio de productos del mundo, donde hay un país que está especializado en el escenario rojo y ahora tiene que ver como entrar

a otras actividades, y la probabilidad de que sean exitosos depende de esta afinidad, por ejemplo de esa actividad que están en rosados ahí, es una actividad que tiene una afinidad  $1/3$ , porque hay uno de los tres productos relacionados a ella, que ya existe en esta economía, la actividad central tiene una afinidad mucho menor de 1 dividido en 10, porque básicamente está relacionada a muchas actividades de las cuales solo una, es una actividad a la cual esta economía ha entrado (Figura B27).

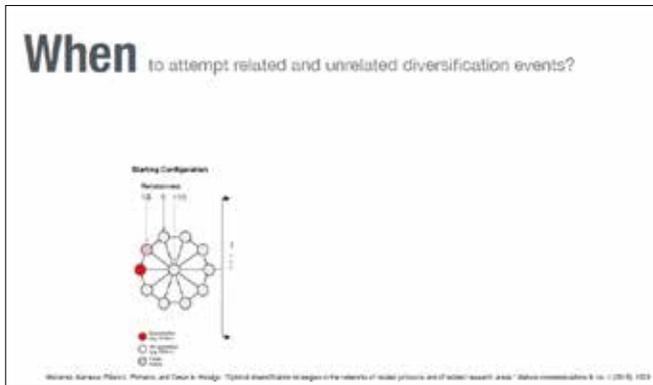


Figura B27

Podemos tomar distintos caminos, podemos tratar de maximizar la afinidad a cada paso y eso, es decir, vamos a tomar un camino por arriba donde vamos a irnos a la segura siempre, y por el camino de abajo en vez de darnos a la segura siempre, vamos a tratar de hacer algo un poquito más estratégico que es minimizar el tiempo total que nos llevaría a diversificarnos. Y, en el primer paso, básicamente tenemos la misma solución, saltamos al nodo siguiente, ahora tenemos dos productos en la economía y tenemos que elegir nuevamente si es que vamos al siguiente producto que queda en el borde o vamos al producto central, ahora al final el producto central cambió, creció, ya no es 1 sobre 10, sino que 1 sobre 5 (Figura B28).

Cuando ya hace eso de nuevo, cuando ya llegas a saltar al tercer producto, la afinidad de ese nuevo central ahora pasa a ser 3 sobre 10, es menor que la del siguiente nodo en la circunferencia, 3 sobre 10 es menor que  $1/3$  pero no es tanto menor que  $1/3$  (Figura B29).

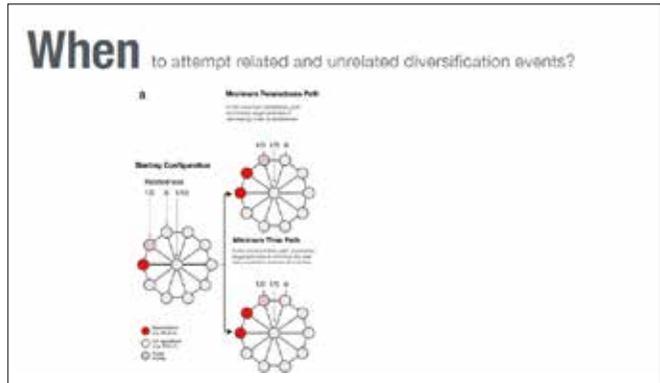


Figura B28

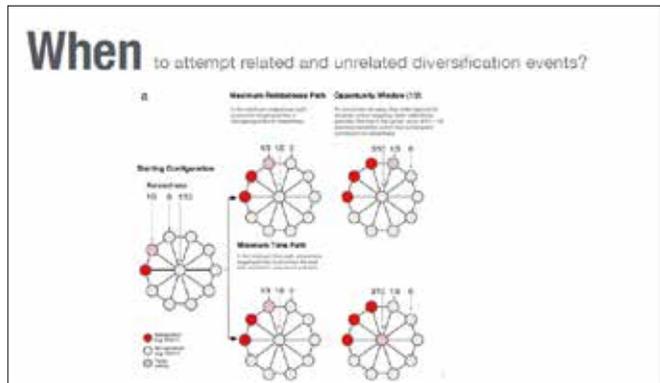


Figura B29

Por eso si uno maximiza la afinidad; si es que uno se va a la segura en el camino de arriba, lo que va a ocurrir es que uno va a saltar al siguiente nodo, que queda en el borde, pero no va a incrementar la probabilidad de entrar en todos los otros nodos en el futuro; entonces, si es que uno va por el camino de abajo, uno corre un riesgo un poco mayor, está entrando a un producto que tiene menor afinidad, tiene menor probabilidad de éxito, pero si uno es exitoso en este salto, lo que ocurriría acá en este modelo, es que uno se desacelere en un momento, pero esa desaceleración va a generar capacidades que van a acelerar a la economía en el futuro, porque ahora van a ver el spillover que no existe cuando uno va por el camino de arriba (Figura B30).

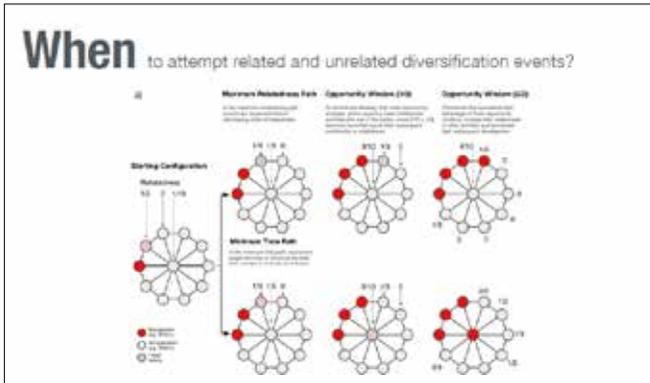


Figura B30

Y esto implica, que cuando tenemos una economía que va cambiando su nivel de complejidad, hay un problema de portafolio; donde tenemos un portafolio de inversión y esa inversión tiene que considerar actividades relacionadas, y actividades no relacionadas, vamos a irnos a la segura en algunas cosas, pero de repente vamos a tomar riesgos y la cantidad de riesgos que tenemos que tomar no es uniforme a través del proceso de desarrollo, sino que en máximo a un nivel de complejidad mediano o más o menos alto, y eso uno lo puede ir viendo de manera empírica o también usando modelos simplificados como el que mostré antes.

Cuando estamos pensando ahora en la diversificación y el desarrollo de Chile, la pregunta no es solo si tenemos que entrar a actividades relacionadas o no, sino que dónde estamos en el proceso de desarrollo y qué tanto riesgo debemos tomar, dado nuestro nivel de desarrollo actual (Figura B31).

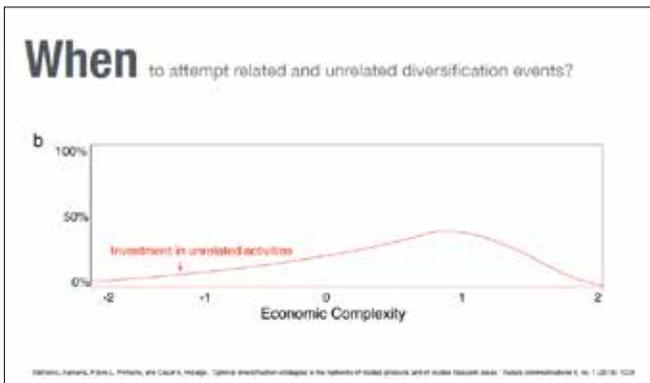


Figura B31

La siguiente W es el Dónde, porque al final el conocimiento en general viene de alguna parte, nosotros en Chile no somos un país que haya estado en el borde de la creación del conocimiento; en Chile yo no sé, si hoy hay muchos esfuerzos para replicar los superconductores, que supuestamente han descubierto en Corea, pero sí hay esfuerzos para reproducir eso en China, en Estados Unidos, en Corea, y por ende el conocimiento que nosotros adquirimos llega muchas veces de alguna parte, y eso es algo que está muy documentado en la literatura económica, de que el conocimiento es algo que se esparce geográficamente, se esparce a través de las redes sociales, es algo que está condicionado bastante por la geografía (Figura B32).



Figura B32

Cuando vemos la complejidad económica en el tiempo, acá en el año 98 y en el año 2021 y nos concentramos en México, vemos que en México en el año 98 por ejemplo, no tenía una complejidad económica tan alta, pero México es vecino de Estados Unidos está integrado a esa cadena de valor y esa complejidad económica fue creciendo en el tiempo (Figura B33).

Y veamos esta transformación económica de México, México fue transformando su economía en parte, porque tiene esa fortuna geográfica de estar ubicado al costado de Estados Unidos, Camerún no tiene esa fortuna geográfica, porque los vecinos no tienen esa capacidad productiva que Estados Unidos tiene. En Europa del este y en Europa occidental hay una historia más o menos similar, yo estoy ahora en Budapest hoy día y acá también tiene una industria basada en el automóvil, lo mismo en Eslovaquia que está muy integrada al sector automotriz de Alemania (Figura B34).

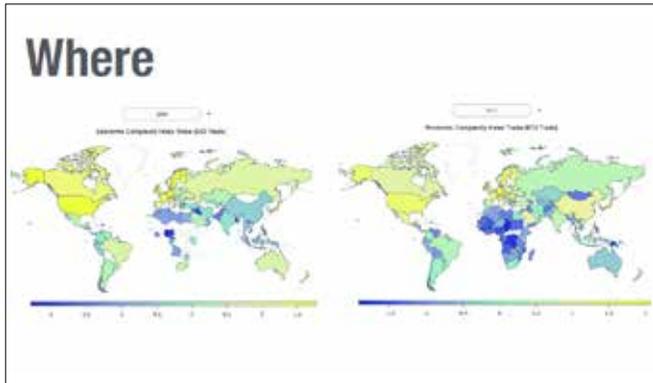


Figura B33

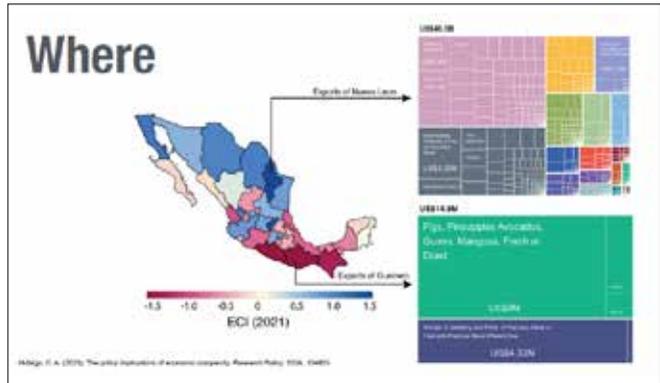


Figura B35

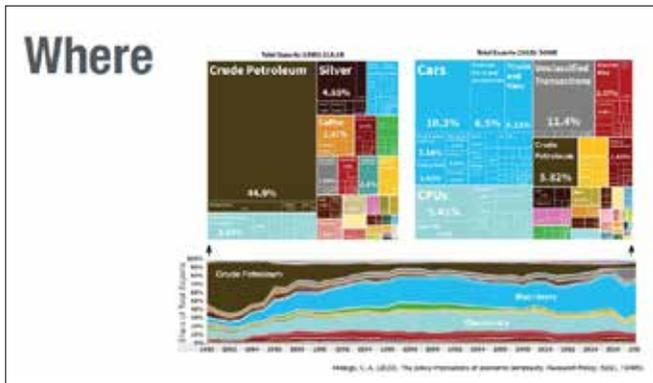


Figura B34

De hecho en México nosotros vemos esto de manera bastante clara, cuando vemos la complejidad económica por Estado, acá tenemos la complejidad económica de los Estados mexicanos y vemos que el norte de México, que está cerca de Estados Unidos, es donde todo este conocimiento se ha desparramado y el que tiene una actividad económica sofisticada, tiene un índice de complejidad económica alto en comparación incluso quizás a otros países del mundo, y en el sur, Estados como Guerrero, tienen una complejidad económica muy baja, y una economía que no tiene por así decirlo las capacidades que existen en Nuevo León o en Monterrey.

Nuevo León y Monterrey, algo que quizás no sorprende, fue elegido para desarrollar una planta automotriz Tesla y cuando nosotros vimos los datos de México, nos salía que Nuevo León era el mejor lugar para esa planta, simplemente porque ya el sector automotriz en Nuevo León está muy desarrollado en el sector eléctrico (Figura B35).

Ahora uno podrá decir que el espacio es algo que no se puede doblar, es algo imposible; pero realmente el espacio sí cambia en el tiempo, cuando cambian las tecnologías de transportes, las tecnologías de comunicación y es algo que nosotros también hemos estudiado en el pasado, con un ejemplo basado en el desarrollo de los trenes de alta velocidad en China, donde el desarrollo de los trenes de alta velocidad ayuda a este proceso de difusión de conocimiento y aprendizaje, es decir, que el espacio físico no es algo fijo, porque realmente lo que importa son los tiempos de viaje, que sí cambian a medida que se va transformando la tecnología (Figura B36).

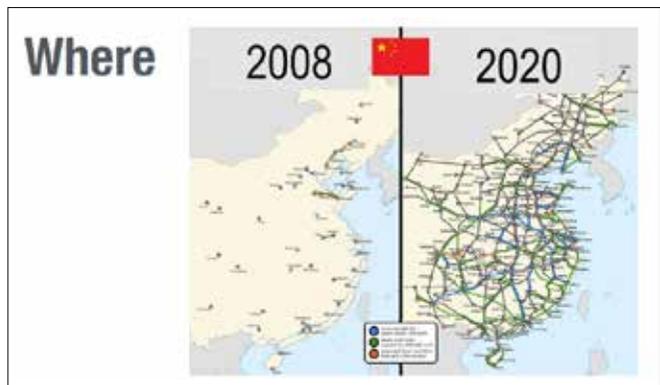


Figura B36

Finalmente tenemos el Quién, muy brevemente, esto es sobre los agentes que ayudan a desarrollar estas actividades, y lo que está muy bien documentado en la literatura, es la idea de que en general los extranjeros son los mejores agentes para hacer diversificación no relacionada, diversificación de la firma (Figura B37).



Figura B37

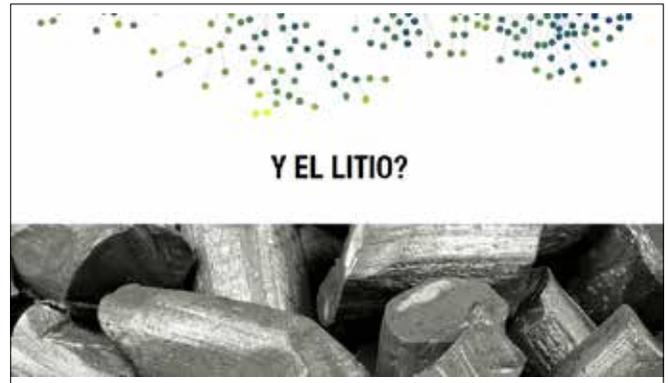


Figura B39

Este es un ejemplo de un paper de Ernest Miguelez y de Andrea Morrison, básicamente tenemos la diversificación en el espacio de tecnologías usando información de patentes, vemos por ejemplo, la segunda columna de la tabla regresión que la afinidad importa mucho, que es el principio del relatedness, pero vemos después que dos filas más abajo, hay un término de interacción entre relatedness y si es que el inventor es un inmigrante, índice coeficiente negativo, lo que no quiere decir que los inmigrantes en este caso, son capaces de saltar más lejos que los locales, los locales son muy buenos en mantener las ventajas comparativas que existen, pero los inmigrantes traen conocimientos que ayudan a desafiar este principio del relacionamiento, principio de la afinidad, los inmigrantes de hecho nos ayudan a ir como en contra del viento, cuando estamos navegando usando la metáfora anterior (Figura B38).

Aquí tenemos los exportadores e importadores de litio esto es para el año 2021, como sabemos y nos contó Jaime Alée, Chile es un gran exportador de litio en este caso tenemos los carbonatos (Figura B40).

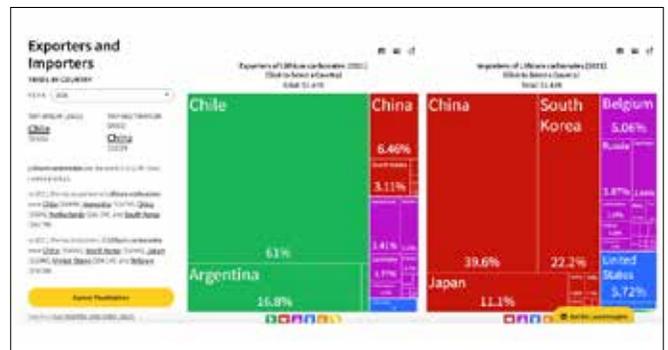


Figura B40

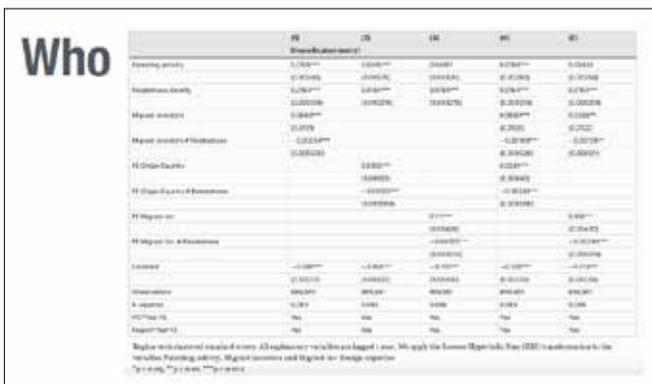


Figura B38

Cuando vemos a data más reciente, ahora tenemos una serie de tiempo que llega hasta abril del 2023, vemos que en el 2022 se dispararon las exportaciones, exportaciones que quizás eran de \$100 millones al mes, durante el año 2021 superaron los \$1.000 millones en algún momento durante abril del 2022, pero ahora ya van cayendo están llegando a un nivel que no es ese del peak, sino que algo intermedio (Figura B41).

Pero, aun así, si el litio si lo comparamos, por ejemplo, ahora con el cobre, puse en línea los gráficos cosa de que el eje Y coincida, y es ciertamente mucho más pequeño incluso en ese pico, solo alcanzaba a rozar el valor de las exportaciones del cobre (Figura B42).

Para terminar, el litio y Chile (Figura B39).

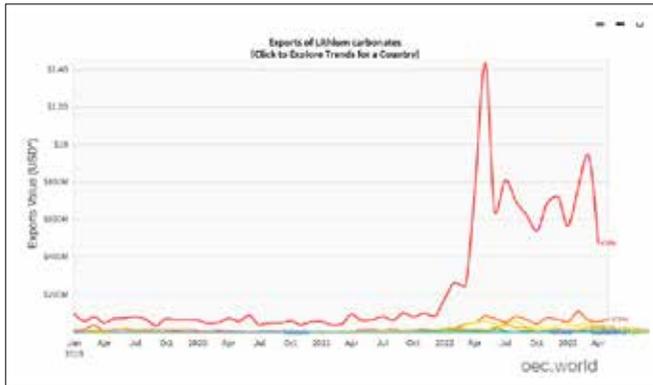


Figura B41

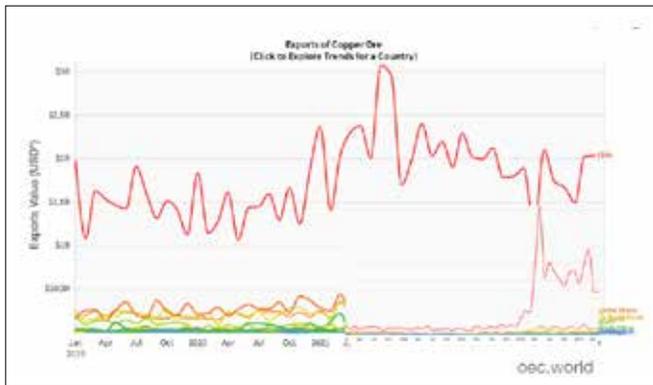


Figura B42

Y si vemos las baterías, el cobre también queda chico, acá las líneas rojas no es Chile, sino que es China, que ha ido creciendo mucho en ese mercado, tanto la exportación de baterías, como en la exportación de los vehículos (Figura B43).

Estos son los exportadores de baterías, es un mapa muy distinto al de los exportadores de litio, tenemos: China, Corea del Sur, Japón, Polonia, Alemania, Hungría, Malasia, Estados Unidos, la República Checa etc. (Figura B44).

Entonces ¿qué tan lejos le quedan las baterías de litio a Chile? Bueno le quedan bastante lejos, este un mapa de afinidad y complejidad para las baterías, y claro que tenemos países como China que tiene una gran afinidad, después tenemos los países quizás como: Taiwán, Tailandia, Suecia, Dinamarca, Hungría, etc., que tienen la posibilidad de entrar a este mercado. Y Chile, sería un país al que desarrollar las baterías le sería difícil, ahora esto no quiere decir de que Chile no tenga que seguir intentando desarrollar actividades de mayor valor agregado o diversificar su economía, pero lo

que quiere decir es que hay que pensar de una manera más estratégica y no tan inocente. No quiere decir que el litio lleva a las baterías, porque básicamente el conocimiento de la batería y el conocimiento del litio quedan en partes distintas de este espacio de productos, entonces hay una desconexión acá, a pesar de que la intención se entiende y es positiva (Figura B45).

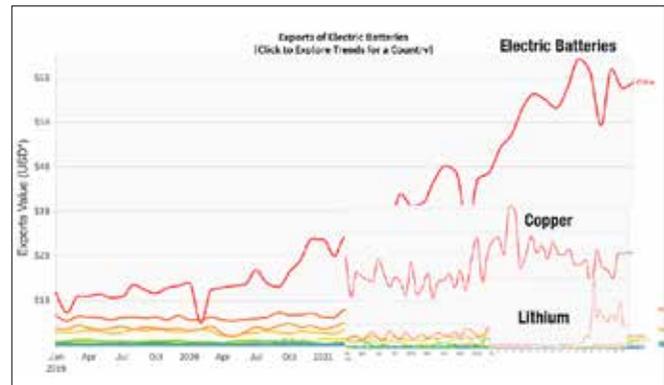


Figura B43



Figura B44

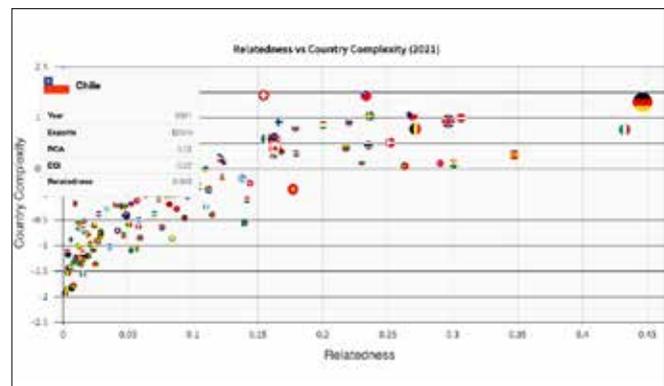


Figura B45

Les iba a contar un poco que es lo nuevo en esta área, quizás brevemente, lo único que les cuento es que estoy en índice de complejidad económica, lo hemos estado tratando de mejorar hay un *paper* reciente con dos de mis estudiantes Viktor Stojkoski y Philipp Koch (Figura B46).



Figura B46

Uno de los problemas que estos índices tienen, es que tienden a favorecer economías integradas a las cadenas de valores de vecinos sofisticados (Figura B47).

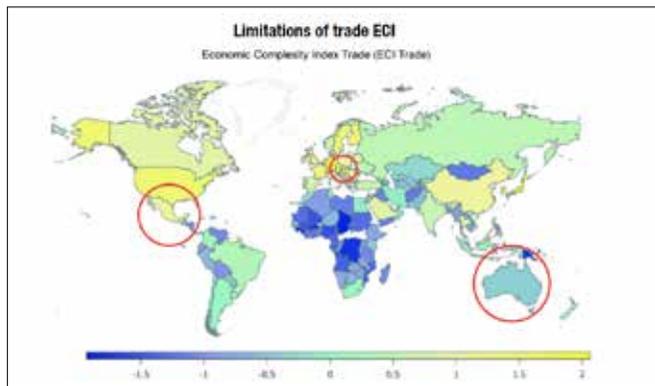


Figura B47

Y lo que hicimos fue expandir este índice más allá de la data de Comercio, a incluir data de patentes a incluir data de paper investigación, y eso nos ayuda a desarrollar índices que corrigen estos sesgos (Figuras B48 a B50).

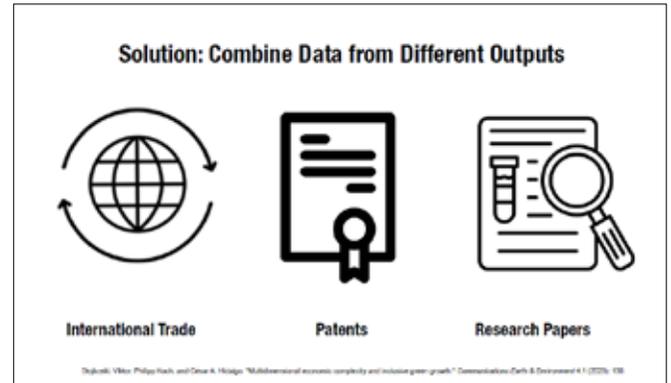


Figura B48

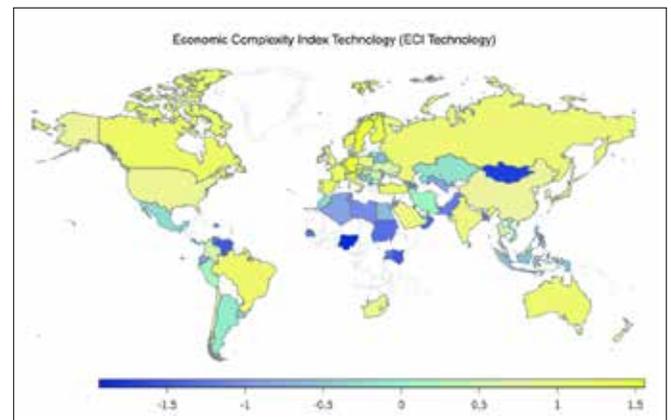


Figura B49

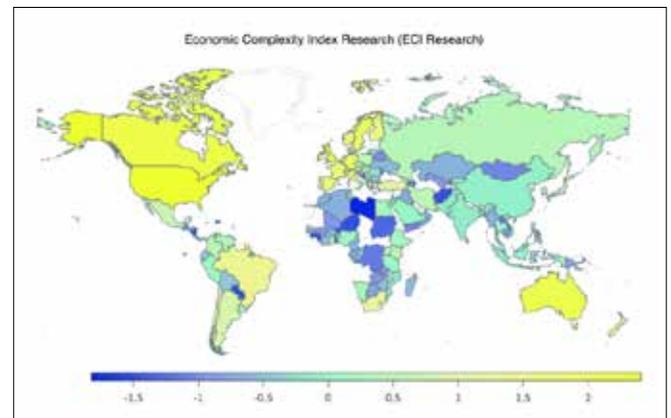


Figura B50

Entonces, por ejemplo, un país como Australia y Nueva Zelanda, no les va muy bien en el índice de complejidad económica basada en productos, porque las exportaciones que ellos se especializan, son exportaciones de países que quedan muy lejos de los mercados globales. A países como México y la República Checa les va muy bien, pero cuando consideramos la tecnología tenemos el sesgo opuesto, cuando estiramos la investigación tenemos el sesgo opuesto y el resultado es cuando ahora hacemos un índice de complejidad económica multidimensional, combinamos comercio, tecnología y también investigación (Figura B51).

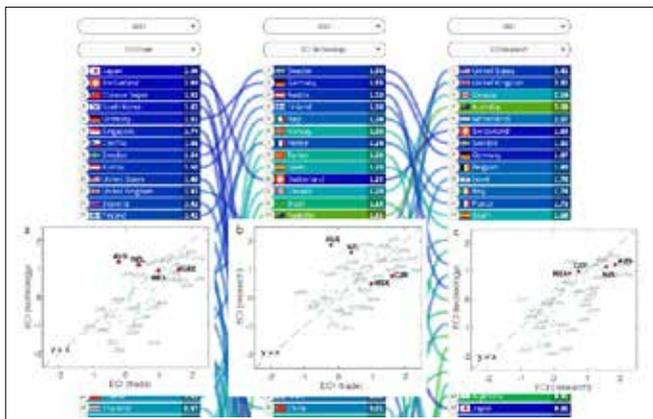


Figura B51

Tenemos mejores predicciones y mejor manera de explicar el crecimiento económico, la desigualdad y las emisiones, por lo que seguimos avanzando en esta tecnología (Figura B52).

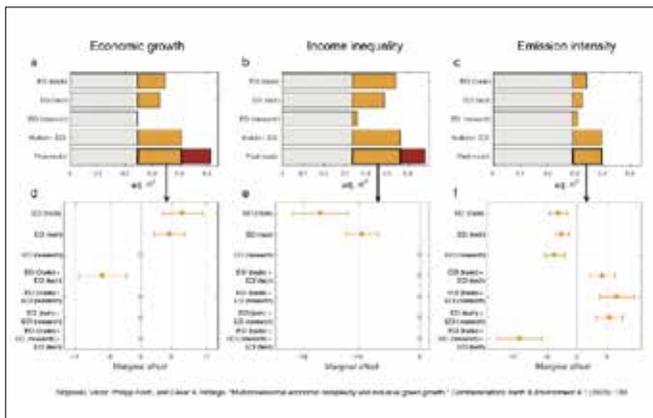


Figura B52

La complejidad económica es el uso del aprendizaje de máquina para entender las trayectorias de desarrollo (Figura B53).

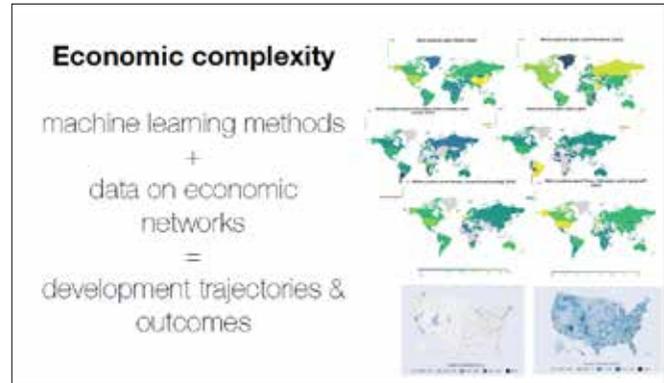


Figura B53

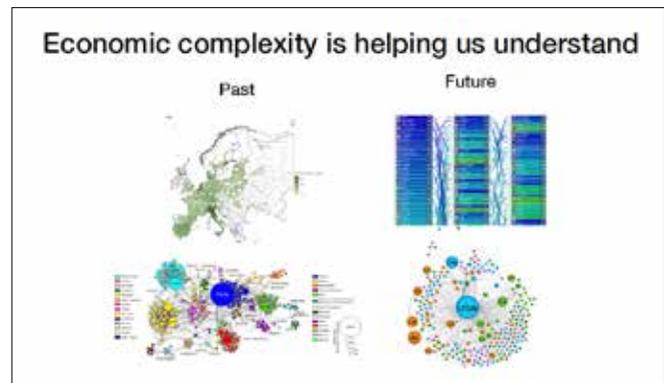


Figura B54

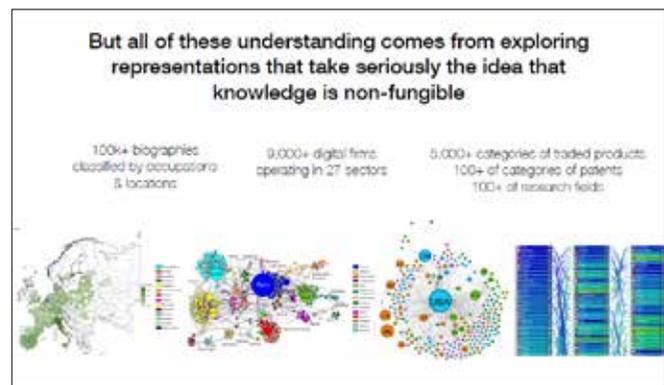


Figura B55

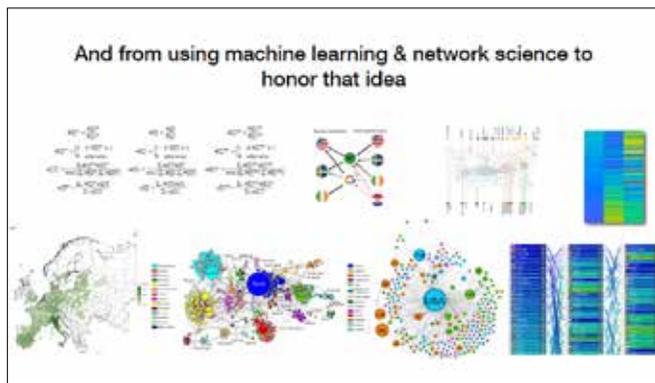


Figura B56

Nueva York tendrá el pasado, Nueva York tendrá el futuro, siempre y cuando nos tomemos en serio la idea de que la identidad o elementos involucrados en el análisis no puede ser ignorada (Figuras B54 a B56).

Muchas gracias.

*Al término de las presentaciones se respondieron consultas y comentarios de los asistentes. A continuación, reproducimos lo más relevante de estas intervenciones. El Sr. Jorge Pedrals hace de moderador.*

### **Sr. Jorge Pedrals.**

—Una consulta que tiene que ver con el tema que define la política nacional del litio, respecto de los sistemas de extracción del litio. La Sra. Sally Bendersky pregunta: ¿Cómo conjugar la extracción del litio por evaporación con el tema medio ambiental?

Otra pregunta que el encuentro bien interesante y yo voy a avanzar un poquitito en la respuesta, el Sr. Juan Rayo, nos da el ejemplo del cobre, en que triplicamos, cuaduplicamos, la producción de cobre desde 1971, 1972 en adelante ¿por qué no pensar lo mismo con el litio?

Aprovecho de decir, que quizás si el litio no hubiera sido definido como estratégico y se hubiera dejado como concebible, quizás habría tenido la misma evolución que el cobre; el cobre no fue estratégico y se desarrolló, el litio fue definido estratégico y no se desarrolló hasta el día de hoy, estando las

mismas empresas, Enami, Codelco, vinculadas a la propiedad del litio desde esa fecha.

Esas dos preguntas, la de Sally Bendersky y Juan Rayo, respecto ¿qué pasó, que no pasó lo mismo con el cobre que con el litio?

### **Sr. Jaime Alée.**

—Con respecto a la pregunta de la Sra. Sally Bendersky, creo que es posible conjugar la extracción con el medio ambiente, partiendo de ciertas premisas y también con relación a lo que significa la minería. Por definición, la minería es una industria que ataca la naturaleza, nadie me puede decir que la dinamita que se colocaba en el hoyo de Chuquicamata, y que era parte de un espectáculo en que uno se situaba en una terraza para mirar una tremenda explosión de medio día, para seguir aumentando la búsqueda de cobre, no es destructiva. Por lo tanto, estamos extrayendo un producto que no es renovable, es escaso, por lo tanto, la minería por definición, genera problemas con el medio ambiente, el problema no es no hacerlo, el problema es cuáles son los límites y condiciones de bordes que coloca el Estado para que sea tolerable, aceptando que va a haber daño.

Y en este caso, la responsabilidad del Estado justamente es definir que quienes pueden hacer la explotación son los que cumplen las normativas, y las normativas pueden ser muy rígidas o poco rígidas. Y la extracción de litio, hoy día tiene algunos problemas obviamente de medio ambiente, pero está dentro del nivel de tolerancia que es aceptada en el mundo y por lo tanto es legal hacerlo.

Y en relación al tema del desarrollo de la industria del litio, la verdad es que el litio no se ha desarrollado, principalmente porque el Estado, que era el dueño, nunca se preocupó de él. Hasta no hace más de 10 años, prácticamente el Estado no recibía casi ningún beneficio de la explotación de los arriendos. Había contratos absolutamente diversos, además la explotación del litio no partió por una decisión política, sino que partió porque supuestamente el litio iba a ser utilizado para la fusión nuclear, en los años de la guerra fría y se escuchó esta noticia. Y yo lo sé de primera fuente, de personas que estuvieron en el momento en que se definió esto, y sé que fue una llamada telefónica del Director del Instituto de Energía Nuclear en Chile, que llamó a última hora y dijo incluyan el litio también, porque saben que es bueno colocarlo como

*estratégico, porque hoy día se está pensando en usar en la fusión nuclear, y lo colocaron y quedo en esta condición que lo amarró durante todos estos años.*

*Por otro lado, el litio siempre era un material barato y fácil de vender, hasta que aparecieron los autos eléctricos. Pero Chile no lo ha hecho tan mal, no se olviden que Chile tiene una de las 3 empresas más grandes de litio del mundo, lo cual debiera ser un orgullo para nosotros, reconocida al nivel global y somos el segundo productor más grande de litio en el mundo, lo cual por lejos es un orgullo lo que se ha hecho, el problema no es eso, es cómo aprovecharlo, ¿en qué podríamos ser potencialmente buenos para desarrollar?*

*Creo que hay bondades sobre la industria del litio, que podrían aprovecharse, incluso en otros países y el conocimiento que se ha desarrollado acá, no se olviden que, por ejemplo, SQM es socio también en Australia, de una exploración de litio de otro tipo y también tiene una empresa en China en la parte de refinería, hay industrias interesantes asociadas a esto.*

### **Sr. Jorge Pedrals.**

*—En síntesis, es como del perro del hortelano, cuidamos tanto el litio al declararlo como estratégico, que no se desarrolló, entonces si uno quisiera hacer una analogía con la industria del cobre, que era un poco la recomendación que, hacia el Colegio de Ingenieros, hagámosla una sustancia concesible, de tal manera que los privados puedan ingresar con todas las regulaciones ambientales, técnicas, económicas, de royalty, etc., de tal manera que se sumen nuevas fuerzas a empujar esta industria.*

*Ahí enlace con una pregunta que le quiero hacer a César Hidalgo. A mí me gusta mucho el tema de la complejidad; por eso escribí un libro que se llama, “Sociedad y Complejidad”, y una forma de abordar la complejidad es tratar de simplificarla, entonces voy a tratar de simplificar una pregunta que dice: Bueno y vamos a seguir picando piedras, la minería es mucho más que picapiedras, por la industria del litio. Jaime Alée no tuvo tiempo de desarrollarla, pero todo el desarrollo químico que existe y los procesos, es muy muy grande y la industria del cobre también.*

*Entonces, a mí me queda muy claro que uno puede tener mapas y puede generar mapas o potenciales trayectorias,*

*con todos estos puntos, entonces mi pregunta tiene relación también, con que en Chile en los últimos dos o tres años nos hemos visto a través de los diarios, estamos leyendo mucho sobre la política nacional del litio, la política nacional del hidrogeno verde y estamos definiendo políticas nacionales respecto del hidrogeno verde, que también se ha hablado de que va a reemplazar el cobre en el futuro. Entonces, ¿cómo logramos motivar o generar reacciones entre la sociedad chilena y los empresarios, para canalizar en nuestra sociedad?; una trayectoria que no solo se apoye en ese tipo de mapas, sino que también se apoye en las capacidades de las personas.*

*Los inmigrantes desafían más las reglas, vienen con otras ideas y son capaces de mirar cosas que nosotros no estamos viendo; los locales vamos donde el vecino y usamos los mismos modos de siempre, entonces ¿cómo crees tú, que una sociedad como la chilena, que está con profundas discusiones, entre ellas la constitucional, puede encontrar esa trayectoria potencial que tenemos como país? También dijiste que el dónde no es intrascendente o sea ser vecino de México evidentemente genera oportunidades muy distintas o ser vecino de China o de Corea, entonces cómo canalizamos desde el punto de vista de la sociedad, de las personas esta discusión.*

### **Sr. César Hidalgo.**

*—Es una pregunta con muchas partes, una quizás para abrir la conversación es que estoy muy de acuerdo en lo que dijo Jaime Alée, excepto por una cosa, y es sobre el argumento de la ganancia. Estoy de acuerdo en que si una industria como la del litio como, por ejemplo, puede tener un margen muy bueno, la utilidad o la ganancia en general no es todo lo que se busca en el emprendimiento o en la empresa, porque muchas veces uno puede tener un sector donde el margen es menor, pero los salarios son mayores, o la intensidad del conocimiento es mayor, ahí hay un cierto beneficio que ocurre dentro de esa empresa, dentro de esa comunidad de personas que participan, que va más allá de esa utilidad que da el margen. Entonces, en ese contexto lo que me parece razonable es desafiar al empresariado chileno, que busque esas actividades que tengan ese otro tipo de retorno. En Estados Unidos, muchos de los empresarios no compiten por el margen, compiten por el crecimiento, compiten por tener liderazgo con una cierta tecnología, compiten por una cierta reputación en un cierto espacio, que va más allá de tener una empresa con un alto margen*

y si uno se va al extremo de los márgenes, Amazon estaría perdiendo plata toda su vida, porque el negocio ha sido hacer crecer la empresa y no generar un margen. Entonces eso de usar el margen como argumento es algo que siempre y solo en Chile se ve y es un argumento que va muy en contra de tomar riesgos, porque reduce mucho la dimensionalidad de lo que es en la actividad empresarial.

Doy otro ejemplo, más allá del margen que es la pregunta. Si uno se pone un gorro, así como bien pragmático de economista: ¿por qué hay restaurantes en el mundo, si los restaurantes son un pésimo negocio? Uno no debería tener un restorán porque nunca va a ganar mil X, no va a tener nunca ese multiplicador en el restorán porque es un servicio. Pero bueno, hay gente que quizás le gusta levantarse todos los días y que la gente a la que le sirvió el plato le guste cierto contacto, hay un cierto aspecto de humanidad, como que todo no puede ser solo ambicioso, sino que puede ser solo social o ambicioso desde el punto de vista de un liderazgo tecnológico o de competencias dentro de la sociedad misma, que va más allá del margen y que se busca también a través de la actividad económica.

Para mi esa parte creo que es importante, porque hay mucho que quizás podríamos hacer en este espacio.

Ahora con eso contesto la segunda parte de la pregunta, que es cuando nosotros desarrollamos toda estas técnicas y tecnologías, lo que estamos viendo es una visión muy agregada de un mapa, que está resumiendo flujo de conocimiento que ya ocurrieron y que de cierta manera se expresa, en esta data, pero ese flujo de conocimiento en general es catalizado muchas veces por personas, y acá en Europa me ha tocado vivir bastante eso, porque tanto en Francia como en Hungría, en que tengo mis dos laboratorios ahora, parte del rol importante que cumplo, es de que les ayuda a atraer a personas extranjeras, porque a ellos les cuesta mucho atraer personas extranjeras. Aquí en Hungría hemos contratado ahora gente de Macedonia, de Italia, de China, que vienen a trabajar porque básicamente están metidos en el tema en que yo lo estoy y quieren trabajar en un laboratorio bajo mi dirección y eso en la universidad les ha costado mucho cuando abría postulaciones así, porque no solo en las universidades prestigiosas como Harvard o MIT, la gente postula.

Entonces, por un lado, tenemos estas cosas en que hay que dividir e identificar e ir apostando en que van a generar una estela alrededor de ellos, que nos va a llevar a estos nuevos espacios. Pero quizás no deberíamos preocuparnos de invertir y seguir. Somos una sociedad muy conservadora de inversión y lo entiendo, si uno tiene la posibilidad de ganarse el 11% asegurado, por qué hacer otra cosa, pero creo que hay muchas sociedades que han descubierto que hay razones para hacer otras cosas que no sean el 11% asegurado.

### **Sr. Jorge Pedrals.**

—Quiero anunciar que vamos hacer otro foro, que se va a centrar en el tema más bien tecnológicos de la producción del litio, y con eso yo creo que vamos a responder varias de las preguntas que quedaron pendientes aquí, veremos dónde están las conexiones que se pueden desarrollar, si faltaron actores y dinamismo.

*Les dejo un par de minutos a los expositores para que puedan cerrar la presentación.*

### **Sr. Jaime Alée.**

—Quiero aprovechar de despedirme y también responder la deferencia que tiene César Hidalgo conmigo respecto al tema de la cadena de valor.

*Soy un gran admirador de la innovación tecnológica e innovación industrial, de hecho, fui el director del Centro de Innovación de la Universidad de Chile y de Open Beauchef, fui el creador y el director durante muchos años y tuve una aceleradora, y nosotros mediamos los proyectos de innovación agregando una variable, no solo en margen por supuesto, sino que también la complejidad.*

*La complejidad del producto significa básicamente lo que agrega, es una barrera de entrada para la competencia, o sea, cuando uno hace cohetes sabe que no va a poder competir mucho porque es muy complejo, por lo tanto, no es un tema de precio, sino que empieza a ser un problema de conocimiento y valor del producto.*

*Fui emprendedor complejo, tuve la primera compañía de Internet en Chile, y también fundé la primera compañía de baterías en Chile, donde desarrollábamos unos módulos de baterías; creo mucho en la complejidad; es parte de mi esencia como ingeniero, pero la palabra cadena de valor la uso en términos muy estrictos desde el punto de vista de la tecnología.*

*Creo que no existe pasar de producir litio a producir baterías, no existe el concepto cadena de valor, como una escalera en que uno va paso a paso, por lo tanto, avanzo del litio a la batería y aumento el valor.*

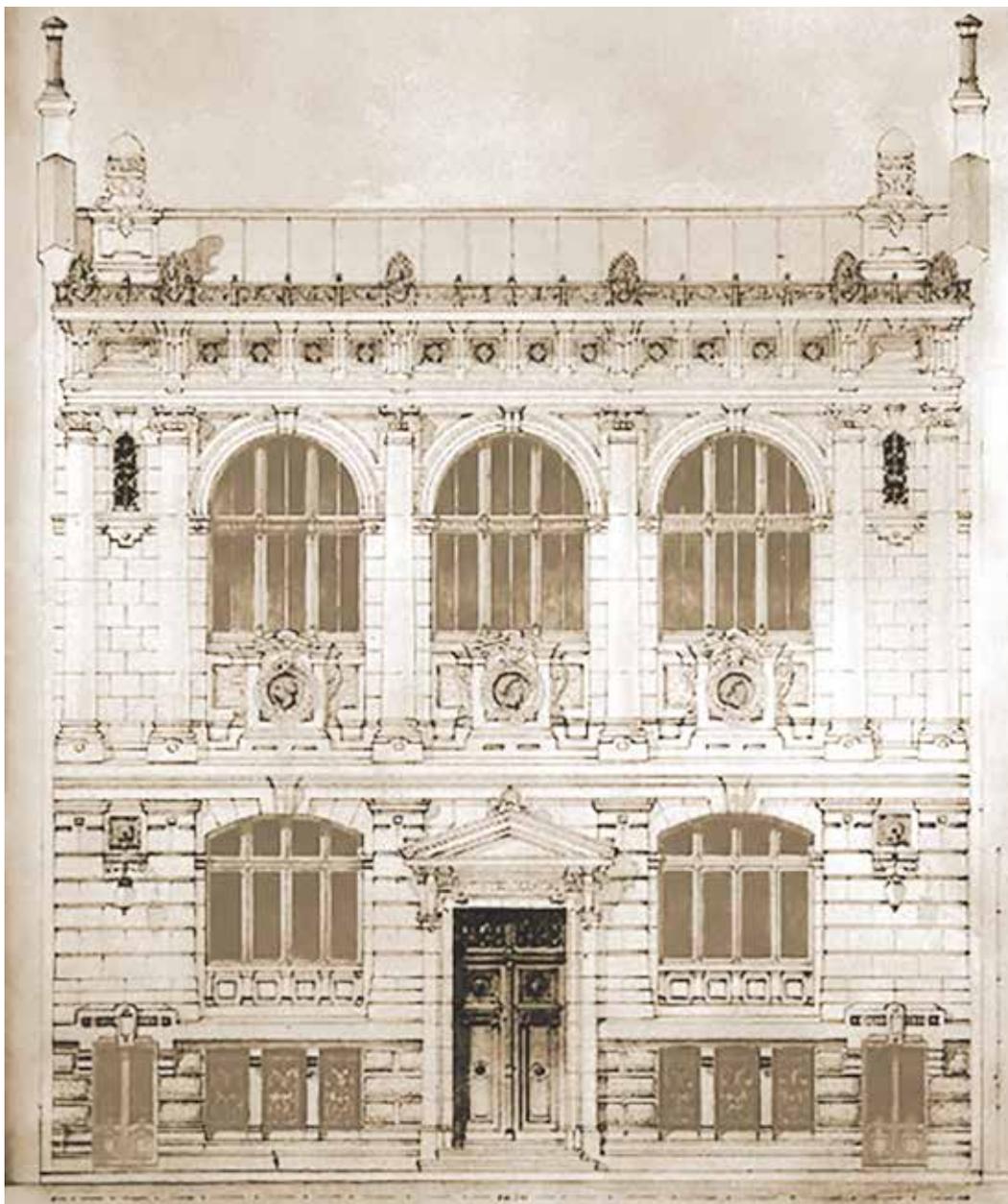
*La verdad que tu aumentas la complejidad y eso probablemente te va hacer entrar a otro mercado, mucho más sofisticado, con mejores sueldos, donde los productos van a ser más caros, y probablemente vas a entrar a un mundo donde mucho menos gente va a poder competir contigo, como sí va ocurrir con el litio en los próximos años, cuando aparezcan 40 países más que van a producir litio.*

**Sr. César Hidalgo.**

—Muy de acuerdo con Jaime Alée, gracias por compartir tu experiencia, tu historia; se nota que tienes mucho orgullo de todos esos emprendimientos y todos esos procesos. Estoy de acuerdo contigo con el litio en que no hay una cadena de valores, un salto discontinuo desde el litio a la batería, de hecho, la cadena de valor de la batería viene por otro lado, en Hungría están apostando a las baterías eléctricas para vehículos, porque tienen el sector automotriz y de partes muy desarrollados, entonces van por ese lado, tienen el mineral, pero eso lo van a importar, pero sí lo que tienen, son muchas personas, con muchos años de experiencia, trabajando, construyendo partes para la MWW, para Audi, para BOCH, etcétera.

**Fin de la Conferencia.**

# ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS



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

En esta ocasión se presenta un extracto de la entrevista realizada al Ingeniero Juan Carlos de la Llera Martín. Esta entrevista, como las que se hagan en el futuro, serán objeto de una publicación especial.

## JUAN CARLOS DE LA LLERA MARTIN

*Notable académico, formador de ingenieros y líder en aislación sísmica de estructuras*

Cuando Juan Carlos estudiaba en el colegio, siempre tuvo la inquietud de ser ingeniero, ya que disfrutaba mucho los ramos de matemáticas y física. Nos cuenta que no tuvo mentores para elegir una carrera ya que nadie en su familia era ingeniero, sin embargo, desde joven se fue interesando por el tema del cálculo de las estructuras. Nunca tuvo dudas sobre la decisión de estudiar ingeniería en la Universidad Católica, por su indudable calidad académica y su orientación espiritual. Tuvo muchos profesores destacados que aportaron a su formación profesional, y recuerda como los más importantes, en Chile a Rafael Riddell y en Estados Unidos al famoso profesor Anil Chopra. Su otro mentor y amigo fue el profesor Carl Lüders con quien el año 2003 fundaron la empresa Sirve S.A. Le gustaban mucho todos aquellos ramos en que sentía que aprendía mucho como Mecánica Racional, Dinámica Racional, Mecánica de Fluidos, y por supuesto los de estructuras, como Elementos Finitos y Elasticidad. Todo lo que sabe de Dinámica y Análisis Estructural ha sido fundamental en su vida como académico, y de Diseño en Hormigón Armado y Acero, en su vida profesional.

Cuando joven fue un destacado tenista, y se dedicó por algo más de un año a ese deporte profesionalmente, pero con mucha pena debió abandonarlo mientras estudiaba ingeniería, por las exigencias propias de la carrera. Nos dice que, si algo cambiaría en su vida, sería no haber dejado el tenis, ya que recuerda como memorable todo lo que le enseñó el tenis como disciplina.

Luego de recibirse de Ingeniero Estructural en la Universidad Católica, viajó a Estados Unidos donde completó sus estudios con un Magister y un Doctorado en la Universidad de California, en Berkeley.

Sus primeros pasos en el mundo de la ingeniería fueron calculando pequeñas estructuras y luego desarrollando software de análisis. En su doctorado en Estados Unidos avanzó mucho en las técnicas de aislamiento sísmico y disipación de energía, que dieron origen a la empresa Sirve S.A. Es muy destacable toda su investigación en el comportamiento sísmico no-lineal de estructuras y el desarrollo de diversas tecnologías de protección sísmica. También su participación en varios proyectos durante su vida profesional, como por



ejemplo en la clínica San Carlos, el Hospital Militar, la torre Titanium, el Paso los Libertadores, el muelle Coronel, los hospitales nuevos de Antofagasta, El Salvador, Marga-Marga y Félix Bulnes, el Seascape en Auckland, Nueva Zelanda, el nuevo aeropuerto de Lima y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes en Colombia. Sostiene que su mayor aporte a la ingeniería ha sido desarrollar conocimiento y tecnologías en el ámbito de la protección sísmica y llevarlos a la práctica a través de proyectos.

El año 2003 recibió del Instituto de Ingenieros de Chile, junto a otros colegas, el “Premio Ramón Salas Edwards” por el trabajo de investigación “Un modelo integrado de evaluación de riesgos para estructuras ubicadas en zonas sísmicas”. El mismo Instituto lo premió el año 2021 con el “Premio Raúl Devés Julián” por su importante aporte a la enseñanza de la ingeniería en nuestro país.

Como anécdota recuerda cuando le propuso aislar sísmicamente el Hospital Militar al Ex Comandante en Jefe del Ejército General Juan Emilio Cheyre. Se reunió con él, planteó la idea, y no hubo una respuesta inmediata. Luego de unos días el General lo llamó y le dijo que se había tomado la decisión de diseñar con aislación sísmica el hospital. Juan Carlos no podía creerlo, era el momento de implementar la tecnología que habían venido desarrollando en Chile

por varios años con Carl Lüders, fue la gran oportunidad que estaban esperando.

Ha creado una gran red de contactos con muchos ingenieros en Chile y otros países, generando vínculos profesionales y de amistad, como también con sus muchos exestudiantes que hoy son muy destacados profesionales en Chile y el exterior. Los principales desafíos que ha tenido que enfrentar en su vida personal y profesional fue la de convencer a mandantes de usar la tecnología que habían desarrollado en Chile. Señala que fue duro, fueron muchos años sin éxito, pero finalmente nos dice orgulloso, en el año 2010 la protección sísmica en Chile se mostró hacia el mundo como un reconocido caso de éxito. Comenta que nuestro país produce grandes ingenieros e ingenieras, al mejor nivel mundial, por eso es clave resguardar la calidad de su educación. En esa línea nos informa que Ingeniería Civil en la UC este año aparecerá en un lugar muy destacado a nivel mundial en el ranking QS.

Cree que su mayor aporte en la academia fue su gestión como decano de la Facultad de Ingeniería de la UC por 12 años, donde tuvo resultados muy gratificantes para él como persona y para toda la comunidad de esa casa de estudios. La creación de un programa que incentivaba el Talento y la Inclusión, así como el cambio curricular realizado, entre muchos otros proyectos, le enorgullecen. Su aporte en la enseñanza son 37 años de docencia en los cursos de análisis y dinámica estructural, y sistemas de protección sísmica.

Juan Carlos opina que la ingeniería es una forma de pensar, que va más allá del conocimiento específico de cada uno, que tiene limitaciones, pero se constituye en un gran activo en la vida profesional. Es un convencido que el cuidado integral de las personas en el proceso de aprendizaje, el deberse a la comunidad y la preocupación por nuestro país son lo que debe inspirar a cualquier institución académica que busque proyectarse en el futuro.

Le pedimos que se defina en dos palabras y nos dice: “muy creativo y emprendedor”.

Considera que su mayor talento es analítico y de abstracción del pensamiento, pero agrega con humildad, que está lejos de algunas mentes privilegiadas que ha conocido en su vida. Estudia y aprende cada día, es un amante del conocimiento, lee mucho, trata de entender y conectar cosas todo el tiempo, desde lo cotidiano a lo técnico y lo espiritual.

Quiere compartir con los demás que en la vida no hay atajos, sólo esfuerzo, que hay que amar lo que uno es y hace, y de esa forma puede ser feliz. Que el bien común es mucho más importante que el bien individual, y que no somos nada en este universo, por lo que debemos ser siempre muy humildes. Para él los valores más importantes son el respeto, la confianza, la lealtad, la amistad, la ética, el esfuerzo, la tolerancia, la democracia y la verdad. Trata de comportarse en todo lo que hace, como le gustaría que otros se comporten con él. Le gustaría ser recordado por haberle dado la oportunidad y apoyo a personas que jamás pensaron que podían ser ingenieros e ingenieras UC, y lo hicieron juntos. Y por haber hecho el bien.

Ha sido testigo de cómo la ingeniería ha evolucionado de manera gigante en el tiempo. En su disciplina, la Ingeniería Sísmica y la Sismología han cambiado una enormidad en 40 años, el conocimiento de hoy es simplemente órdenes de magnitud superior a lo que había en 1985 cuando se recibió. Hacia el futuro ve a la ingeniería como algo fundamental, como una disciplina que va seguir cambiando el mundo y creando mundos, pero que debe hacerlo con gran cuidado y respeto por las personas. Sostiene que la ingeniería es algo maravilloso, una herramienta demasiado poderosa, pero que conlleva una enorme responsabilidad.

A las nuevas generaciones les aconsejaría que amen la ingeniería, que no hay nada más entretenido que imaginar, diseñar, implementar y gestionar los sistemas que el mundo puede utilizar, para lograr una mejor calidad de vida para todos. Es una disciplina que no le pone límites a la imaginación, pero que debe servir a las personas y no al revés.



# RICARDO NICOLAU DEL ROURE GARCÍA DE CASTRO

Premio Infraestructura 2023  
Colegio de Ingenieros de Chile A.G.



*Sr. Ricardo Nicolau del Roure.*

*El pasado 4 de enero de 2024, en las dependencias del Colegio de Ingenieros de Chile, se entregó el premio “Infraestructura año 2023”, a nuestro querido y distinguido socio, director y expresidente don Ricardo Nicolau del Roure. Felicitamos muy sinceramente a Ricardo, por este merecido galardón.*

*Este premio se entrega desde 2003 y se otorga anualmente al ingeniero colegiado que más se haya destacado en razón de servicios prestados al país a través de ideas, estudios, proyectos u obras realizadas, que se destaquen por haber contribuido en forma importante a la construcción y desarrollo de la infraestructura nacional, a su conservación o a su explotación y a la investigación y enseñanza que tiendan al desarrollo de la infraestructura nacional.*

*Ricardo Nicolau del Roure es Ingeniero Civil Estructural de la Universidad de Chile y Ph.D y M.Sc de la University of Texas at Austin, EEUU. Posee gran experiencia en dirección y gerenciamiento de estudios y proyectos interdisciplinarios en el ámbito de obras de infraestructura, industriales y mineras. Es reconocido especialista en ingeniería estructural y diseño sísmico. Ha desarrollado investigación y docencia superior tanto en universidades chilenas como en el extranjero.*

*A continuación, el discurso realizado por el Sr. Nicolau del Roure, en la ceremonia.*

## Sr. Ricardo Nicolau del Roure.

—Presidente del Colegio de Ingenieros, don Hernán de Solminihaç, Presidenta del Instituto de Ingenieros de Chile, doña Silvana Cominetti, Presidente de la Comisión de Infraestructura del Colegio de Ingenieros, Sr. Mauricio Castillo. Otras Autoridades presentes. Estimados colegas y amigos.

Me siento muy honrado al recibir, en este acto, el Premio “Infraestructura”, que tradicionalmente, desde el año 2003, otorga el Colegio de Ingenieros de Chile.

Muchas gracias al Colegio, su Directorio y la Comisión de Infraestructura por esta distinción.

Después de recibir el llamado del Presidente del Colegio de Ingenieros, que me comunicaba la decisión del Directorio del Colegio, me quedé reflexionando sobre el significado que tiene este galardón, y consideré que lo justo sería compartirlo, al menos simbólicamente, con los numerosos ingenieros con los cuales trabajé estrechamente por largos períodos, desarrollando y construyendo proyectos de infraestructura, de la más variada índole.

Y en ese grupo incluyo, tanto a los ingenieros del equipo propio, como también a los de la contraparte.

Este pensamiento fluye de manera natural, porque el desarrollo de proyectos es siempre un trabajo de equipos, y de personas. Y cuando los equipos funcionan y las personas se relacionan bien, normalmente los proyectos culminan exitosamente.

Por estas consideraciones, me permito hacer partícipes de este reconocimiento a todos los colegas con los cuales trabajé, codo a codo, en proyectos de carreteras, puentes, aeropuertos, obras hidráulicas, en el Metro, en Merval, en Codelco y otras grandes empresas mineras y de energía.

Ahora bien, el desarrollo de Infraestructura es probablemente la más antigua y relevante ocupación de la ingeniería civil, incluyendo en este concepto, en el pasado, tanto a la infraestructura civil, como la militar y la religiosa.

Sin duda que hoy las infraestructuras continúan siendo la principal ocupación de la ingeniería civil, aunque con

el tiempo y el natural progreso de la sociedad, se la han adicionado otras disciplinas y así en el presente se habla de:

La Infraestructura Basal: la que nos sostiene, entregando recursos hídricos, energía, y telecomunicaciones.

La Infraestructura de Conectividad y Logística: con carreteras, autopistas, aeropuertos, puertos, Metro y FFCC.

La Infraestructura Sanitaria y Social: con hospitales, educación, deportiva y Judicial.

Como es posible apreciar, el concepto de infraestructura hoy es muy amplio y engloba tanto las estructuras físicas como las organizacionales, que en conjunto permiten el adecuado funcionamiento de la sociedad.

Por esta razón, el Foro Económico Mundial ha determinado que los dos pilares fundamentales, que sustentan el potencial de desarrollo económico y social, y la competitividad de un país, son:

Primero, las instituciones y, luego, la infraestructura.

Y la pregunta que nace es: ¿y cómo lo estamos haciendo en Chile?

Veamos.

El Foro Económico Mundial ha definido un Índice, denominado de Índice de Competitividad, el cual mide una serie de variables y parámetros; la eficiencia del Gobierno y el Estado, y el funcionamiento de la infraestructura, entre otros 20 factores y más de 300 criterios.

Bajo este indicador, Chile ha estado perdiendo terreno desde el año 2006, cuando llegó a ocupar el lugar 35 entre 151 países. Hoy estamos en el lugar 45 y en los últimos 5 años hemos descendido 4 posiciones en infraestructura.

¿Qué ha pasado?

Las políticas de desarrollo de infraestructura, por la naturaleza misma de los proyectos, son de largo plazo, requieren buena planificación y continuidad. En ese sentido hay conciencia y se cuenta con estudios e informes de entes gubernamentales y otros estudios periódicos de instituciones especializadas,

como el Consejo de Políticas de Infraestructura (CPI) y la Cámara Chilena de la Construcción (CChC), que sugieren políticas de desarrollo, determinan las necesidades y proponen prioridades para avanzar en el desarrollo y mejoramiento de nuestra infraestructura.

Sin embargo, tenemos dos problemas relevantes:

El primero es la inversión anual que realiza el país en infraestructura, con un 2,5% del PIB promedio, que no es suficiente para cubrir las crecientes necesidades, ni para avanzar en cerrar las brechas que existen.

Según estimaciones del CPI sería necesario incrementar la inversión, al menos, a un 3,5 del PIB. Y la Cámara Chilena de la Construcción, tiene estimaciones algo mayores.

Y el segundo problema que se advierte, es la urgente necesidad de mejorar la productividad y eficiencia en la ejecución de los proyectos mismos.

Para el primer problema, existe espacio aún para aprovechar los aportes que pueden hacer para aumentar la inversión, los mecanismos de Asociación Público Privado y las Concesiones. Y en cuanto al segundo, se requiere algo de voluntad y determinación, para copiar y adaptar al medio local, lo que hacen los países que avanzan más rápido que nosotros.

Con relación a la productividad y eficiencia en la ejecución de los proyectos, existe el convencimiento que los sistemas de contratación de obra pública requieren una actualización, que los hagan más acordes a los tiempos y realidades del presente. Sin duda que no es un paso fácil, pero es imperioso abordarlo. Las ideas y fundamentos básicos para realizarlo, están. Falta la decisión.

Para cerrar, unos breves comentarios en relación a los “sobrecostos” y mayores plazos, que constituyen los nubarrones que oscurecen el horizonte de los proyectos de infraestructura (y de otros también).

La realidad internacional muestra que, en general, los proyectos de infraestructura pública experimentan sobrecostos y/o extensiones de los plazos previstos para su construcción. Es casi una constante, aunque por lo general están relativamente acotados.

En el país, según el informe de la Comisión Nacional de Evaluación y Productividad del año 2020, la incidencia sería algo mayor

¿Cuál es el antídoto para mantener bajo control estas amenazas?

Simple, pero exige disciplina;

Seguir estrictamente las reglas y recomendaciones de las “buenas prácticas”, para la correcta ejecución de proyectos, tanto en las fases pre-inversionales como inversionales.

No saltarse etapas necesarias, asignar o contratar equipos competentes y experimentados, destinar los recursos necesarios, con plazos razonables. No ahorrar en estudios ni en las ingenierías. Definir estrategias de contratación adecuadas, que promuevan la competencia y la innovación. Utilizar precalificaciones y sistemas de licitación apropiados, con una correcta asignación de los riesgos.

En el país hay buenas y malas experiencias, tanto en el ámbito público como en el privado. Es necesario aprender de las Lecciones Aprendidas.

Para concluir, el agradecimiento a mis padres, quienes se sacrificaron y esmeraron para darnos, la mejor educación posible para enfrentar la vida.

Y a Alejandra, mi señora, y a mis hijos, reconocerles y agradecerles su paciencia y comprensión, por todas mis ausencias, por estar trabajando en algún proyecto.

Muchas gracias.

ISSN 0716 - 2340



**ANALES  
DEL INSTITUTO  
DE INGENIEROS DE CHILE**

**Vol. 136, N° 1 - ABRIL 2024**

*“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. 136, N° 1, abril de 2024**

### **Contenido**

**APLICACIÓN DE ESCORIA DE COBRE RESIDUAL (ECR) PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELO EN LA CIUDAD DE PUNTA ARENAS.**

Pág. 1

Bastían Silva, Berta Vivar y Jorge Villarroel.

**EVALUACIÓN COMPARATIVA MEDIANTE DISEÑO BASADO EN EL DESEMPEÑO DE UN EDIFICIO ESTRUCTURADO EN BASE A MUROS.**

Pág. 10

Juan Carlos Vielma-Quintero, Jorge Carvallo y Juan Carlos Vielma.

**ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO CON EMPUJE INCREMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE DESEMPEÑO DE UNA EDIFICACIÓN TÍPICA HABITACIONAL DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO.**

Pág. 20

Ricardo Aguayo Ortega, Jorge Carvallo Walbaum y Juan Carlos Vielma Pérez.

Editor

**Raúl Uribe Sawada**, Instituto de Ingenieros de Chile.

Comité Editorial

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

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

**Hernán Alcayaga S.**, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID)

**Pablo Oróstegui T.**, Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE)

**Camila Balbontín T.**, Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte (SOCHITRAN)

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

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

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

# APLICACIÓN DE ESCORIA DE COBRE RESIDUAL (ECR) PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELO EN LA CIUDAD DE PUNTA ARENAS

Bastían Silva<sup>1</sup>, Berta Vivar<sup>2</sup>, Jorge Villarroel<sup>3</sup>

## RESUMEN

*Esta investigación de trabajo de título tiene como meta principal llevar a cabo un análisis exhaustivo sobre la aplicabilidad, en términos de densidad y capacidad de soporte, de la escoria de cobre residual en diversas capas que componen el pavimento en la ciudad de Punta Arenas.*

*La metodología empleada fue teórico-práctica, llevando a cabo pruebas con el propósito de analizar las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los suelos compuestos.*

*El conjunto de ensayos comprendió un total de diez pruebas, divididas en cinco para determinar la relación humedad/densidad del suelo y otras cinco para evaluar la capacidad de soporte de este. De estos diez ensayos, dos se realizaron en la condición completamente natural del suelo, mientras que los ocho restantes incluyeron la introducción de reemplazos de escoria de cobre residual en diversos porcentajes. La hipótesis planteada es la mejora de la capacidad de soporte del suelo compuesto.*

*Por último, se procederá a examinar los resultados derivados de los ensayos, proporcionando diversas evaluaciones, comparativas y, además, ofreciendo recomendaciones sobre la viabilidad del empleo de este residuo en la estabilización de los suelos de la ciudad.*

---

<sup>1</sup> Ingeniero Constructor, Universidad De Magallanes. Departamento De Ingeniería En Construcción, Universidad De Magallanes, Chile. E-Mail: Basilva@Umag.Cl

<sup>2</sup> Ingeniera Civil, Universidad Austral de Chile. Departamento de Ingeniería en Construcción, Universidad de Magallanes, Chile. E-mail: berta.vivar@umag.cl

<sup>3</sup> Doctor en Ingeniería Civil, Universidad de Coimbra, Ingeniero Constructor, Universidad de Magallanes. Departamento de Ingeniería en Construcción, Universidad de Magallanes, Chile. E-mail: jorge.villarroel@umag.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la industria de la construcción, uno de los desafíos más significativos, proviene de los suelos cohesivos, los cuales presentan limitaciones en su capacidad de soporte por sus características mineralógicas naturales. Estos inconvenientes se traducen en problemas como defectos en la calidad de carreteras y pavimentos urbanos. A largo plazo, esto conlleva a un aumento en los costos de mantenimiento, amenazando la durabilidad de estas estructuras. Además, la necesidad de extraer grandes cantidades de material grueso de pozos o canteras para reemplazar el suelo cohesivo resulta en altos costos económicos y tiene un impacto ambiental significativo.

La búsqueda de conseguir un suelo estable no es un requisito exclusivo de la construcción contemporánea. Un claro indicio de que la estabilización de suelos tiene raíces históricas se evidencia en el uso ancestral de materiales puzolánicos mezclados con cal para preservar la integridad del Coliseo Romano. Esta construcción perdura en condiciones óptimas hasta la actualidad, destacando la efectividad de estas prácticas antiguas en la ingeniería del suelo.

A medida que el tiempo avanza, las técnicas de estabilización han experimentado un progreso notable. En este desarrollo, se incluyen prácticas como la compactación y el drenaje, así como la combinación de suelos con diversos aditivos, como la cal, cenizas volantes, puzolanas, entre otros. Por lo tanto, se infiere que la estabilización de un suelo puede llevarse a cabo mediante procesos tanto mecánicos como químicos.

En este punto es donde la incorporación de materiales como contribución al mejoramiento del suelo ha posibilitado fortalecer sus propiedades. Además, este enfoque se traduce en una reducción de los costos económicos y en beneficios para el medio ambiente, especialmente cuando los materiales de contribución son residuos.

Como es de conocimiento, la industria de la construcción figura entre los sectores más contaminantes a nivel global. Es por esta razón que, de diversas maneras, se procura mejorar la calidad del suelo mediante la utilización de un residuo conocido como escoria de cobre residual.

En la Región de Magallanes y Antártica Chilena, el suelo mayoritariamente se compone de partículas

finas como limo y arcillas, y es de naturaleza cohesiva. Esto se debe al impacto de la última glaciación máxima (UGM) [1], que ha influido en el comportamiento del suelo en términos de flujo, estrés aplicado y contenido de humedad [2].

Por lo general, es el suelo natural sobre el cual se asienta toda la estructura del pavimento, es decir, no constituye parte integral de la estructura en sí misma. No obstante, la capacidad de soporte de la subrasante es un factor fundamental que incide directamente en la elección de los espesores totales de las capas del pavimento [3].

La formación de la escoria de cobre surge a partir de los óxidos presentes tanto en la carga inicial del horno como aquellos generados durante la fase pirometalúrgica [4].

En Chile, se producen 2,2 toneladas de escoria por cada tonelada de cobre extraído, lo que resulta en una producción anual de 4,5 millones de toneladas a nivel nacional [5].

En nuestro país, existen depósitos de escoria de cobre que datan aproximadamente 200 años atrás. Estos depósitos ocupan extensiones considerables de tierra y en muchas ocasiones reducen áreas cultivables, generando un impacto adverso en el entorno ambiental debido a la posible liberación natural de metales pesados y a la alta alteración visual del paisaje. Por esta razón, es necesario encontrar un propósito para este material que se produce en gran cantidad y con facilidad en diversos puntos de nuestro país, incluso en la ciudad en la que residimos, Punta Arenas.

## 2. MATERIALES

### 2.1. SUELOS

El árido es cualquier material granular, como arena, grava, piedra triturada o escoria, que se utiliza como componente principal en la fabricación de hormigón, mortero, asfalto y otros productos de construcción. Se utilizan para proporcionar resistencia y durabilidad al hormigón y al mortero, así como para crear una superficie resistente en carreteras y pavimentos [6]. Para la realización de los ensayos de este trabajo de título el árido entregado por el proveedor fue el material seleccionado, que es un tipo particular de material elegido y empleado de manera deliberada en la edificación de distintas capas o estratos dentro de

proyectos de ingeniería civil o construcción. La selección de este material se basa en sus propiedades y características específicas que lo hacen apto para cumplir con requisitos particulares en proyecto dado [7].

En la Figura 1 se muestra la extracción del material de una cantera con fines de ensayo implica la selección de un área que sea representativa. La limpieza de la superficie para eliminar contaminantes.

La toma de muestras en varios puntos y profundidades. El etiquetado preciso de las muestras y su preparación de acuerdo con los requisitos del ensayo correspondiente. Las muestras deben ser transportadas y almacenadas de manera adecuada para evitar la contaminación y dirigida con precaución para evitar la compactación.

La extracción del material fue de aproximadamente 280 kilogramos. La muestra de suelo se encuentra sin estabilizado y fue tratada en el laboratorio.



Fig. 2.1: Extracción del material.

## 2.2. ESTABILIZADOR QUÍMICO.

La Escoria de Cobre Residual (ECR): es un subproducto que se genera en el proceso de fundición y refinación del cobre. Se forma cuando los minerales de cobre se someten a altas temperaturas en hornos de fundición para separar el cobre de otros minerales y elementos no deseados [8].



Fig. 2.2: Escoria de Cobre Granallada en Laboratorio.

Durante este proceso, se generan impurezas y desechos que se solidifican y se convierten en la escoria de cobre. En la Figura 3.1. se puede observar la escoria de cobre granallada utilizada para este trabajo de título

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 PRIMERA PARTE

#### 3.1.1 Ensayos de laboratorio

Consiste primeramente en categorizar el suelo, objeto de estudio, de acuerdo con las normativas actuales en Chile. Para llevar a cabo la caracterización de este suelo, se requiere la realización de una serie de pruebas de laboratorio.

##### 3.1.1.1 Granulometría del material

El ensayo de granulometría se llevó a cabo de acuerdo con las pautas establecidas en el Manual de Carreteras Volumen N°8, que detalla las especificaciones, métodos de muestreo y procedimientos de control a seguir.

Este ensayo es empleado para analizar la distribución de tamaños de partículas en una muestra de suelo o agregado. Su principal objetivo es la identificación y cuantificación de las distintas fracciones de partículas contenidas en la muestra según su tamaño, lo que resulta fundamental para comprender la composición del material.

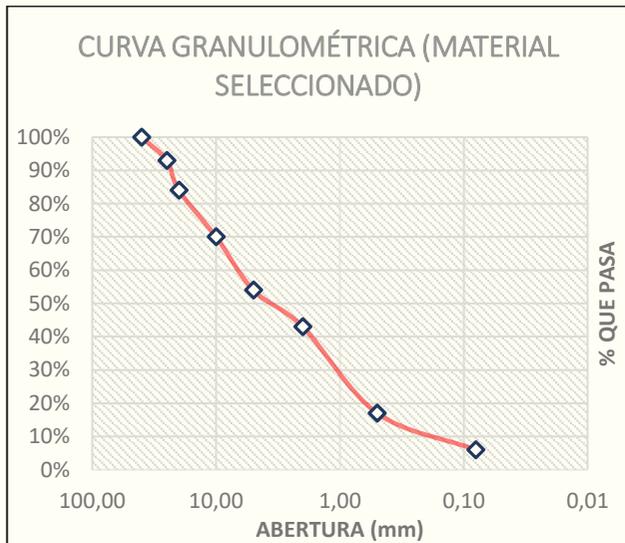


Fig. 3.1: Curva Granulométrica (Material Seleccionado).

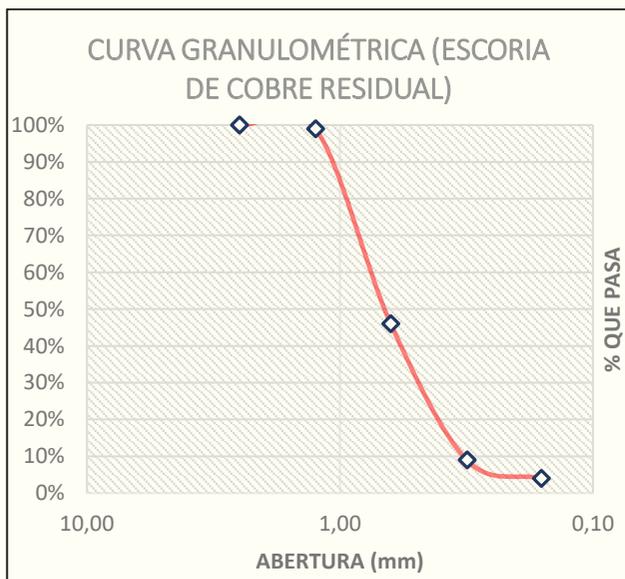


Fig. 3.2: Curva Granulométrica (Escoria de Cobre Residual).

### 3.1.1.2 Determinación de humedad

La humedad de ambos materiales se determinó siguiendo las directrices especificadas en la Norma Chilena 1515, que fue modificada en 1979 y proporciona los procedimientos para calcular la humedad de un material.

La determinación de humedad en el contexto de la compactación es fundamental para regular la densidad, uniformidad y eficacia en proyectos de construcción. Esto asegura que se alcance la densidad óptima requerida, garantiza la uniformidad en el proceso de compactación, optimiza la utilización de los materiales y asegura el cumplimiento de las especificaciones del proyecto.

### 3.1.1.3 Límites de Consistencia

Los límites de consistencia se establecen de acuerdo con las pautas establecidas en la Norma Chilena 1517 Parte 1, modificada en 1979, para determinar el límite líquido [9], y en la Norma Chilena 1517 Parte 2, también modificada en 1979, para determinar el límite plástico [10]. Estas normas proporcionan los procedimientos para la medición de estos límites.

La determinación de los límites de consistencia, que involucra tanto el límite líquido como el límite plástico, desempeñan un aspecto fundamental en la ingeniería de suelos. Este proceso es esencial para entender y clasificar el comportamiento de los suelos en términos de su plasticidad, estimar la capacidad de carga del suelo en el diseño de cimentaciones y estructuras; y proporcionar información crítica sobre las propiedades y el rendimiento de los suelos.

### 3.1.1.4 Coeficiente de Uniformidad y de Curvatura

El coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura son dos parámetros empleados para evaluar la granulometría de un suelo, es decir, cómo están distribuidos los tamaños de partículas en una muestra de suelo. El coeficiente de curvatura, conocido como CC, proporciona información sobre cuán uniforme es esta distribución, mientras que el coeficiente de uniformidad, o CU, indica la amplitud de los tamaños de partículas presentes en la muestra.

En la geotecnia, estos coeficientes son fundamentales para anticipar el comportamiento de un suelo en términos de compactación, permeabilidad y capacidad de carga, ya que la manera en que se distribuyen las partículas puede influir significativamente en estas propiedades claves. Este enfoque lleva a una descripción más exacta del material y se emplea en el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS).

### 3.1.1.5 Clasificación “Unified Soil Classification System” (USCS)

Es un sistema estandarizado empleado en el campo de la ingeniería geotécnica y las ciencias de la tierra. Su finalidad es categorizar y describir los suelos tomando en cuenta sus propiedades físicas y características de ingeniería. Este sistema organiza los suelos en distintas categorías según su tamaño de partículas (granulometría), su plasticidad (capacidad de deformarse) y la presencia de otros materiales, como grava o arcilla.

### **3.1.1.6 Clasificación “American Association Standards Highway Transportation Officials” (AASHTO)**

La clasificación AASHTO es un sistema de agrupación de suelos desarrollado por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transporte. En América del Norte, especialmente en Estados Unidos y Canadá, la clasificación AASHTO se emplea para categorizar y caracterizar los suelos según sus propiedades físicas y de ingeniería. Aunque comparte similitudes con el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS) al considerar factores como el tamaño de partículas y la plasticidad, la clasificación AASHTO utiliza una serie específica de términos y notaciones para describir los suelos.

### **3.1.1.7 Proctor**

El ensayo de Proctor se llevó a cabo de acuerdo con las pautas establecidas en la Norma Chilena 1534 Parte 2, modificada en 1979, que describe las relaciones entre la humedad y la densidad, específicamente en la Parte 2 que se enfoca en los métodos de compactación utilizando un pisón de 4,5 kilogramos y una altura de caída de 460 milímetros [10].

El ensayo de proctor modificado es una evaluación de laboratorio que se emplea para identificar la densidad máxima y el nivel óptimo de humedad de un suelo cuando se compacta siguiendo condiciones particulares. Este procedimiento resulta fundamental en la ingeniería geotécnica para determinar la aptitud de compactación de un suelo y para establecer criterios de diseño en proyectos de construcción de carreteras, represas, cimentaciones y diversas estructuras.

### **3.1.1.8 Densidad de partículas sólidas**

El proceso para realizar el ensayo se llevó a cabo de acuerdo con las pautas establecidas en la Norma Chilena 1532, modificada en 1980, que describe la determinación de la densidad de partículas sólidas.

El ensayo de determinación de partículas sólidas es un procedimiento de laboratorio diseñado para calcular la densidad de las partículas sólidas presentes en una muestra de suelo. Este ensayo tiene como objetivo medir cuánto espacio ocupan estas partículas sólidas en relación con su peso.

### **3.1.1.9 “California Bearing Ratio” (CBR)**

El proceso para realizar el ensayo se llevó a cabo de acuerdo con las pautas establecidas en la Norma Chilena 1852, modificada en 1981, que se refiere a la determinación de la razón de soporte de suelos compactados en el entorno de laboratorio [11].

El ensayo CBR implica la evaluación de la capacidad de un suelo para resistir cargas y penetración en condiciones controladas. Este procedimiento se utiliza para obtener datos cruciales sobre la capacidad de soporte de un suelo y su comportamiento en aplicaciones de ingeniería civil, como el diseño de pavimentos y cimentaciones.

## **3.2 SEGUNDA PARTE**

Consiste en establecer la proporción adecuada de sustitución del agregado por partículas de escoria de cobre residual, con la finalidad de llevar a cabo los ensayos de análisis soportante, correspondientes, utilizando dichas partículas recicladas.

### **3.2.1 Recolección de escoria de cobre residual**

En la Región de Magallanes y Antártica Chilena, específicamente en el astillero ASMAR ubicado en la comuna de Punta Arenas, opera una empresa chilena que se dedica a brindar una amplia gama de servicios que incluyen mantenimiento, construcción y reparación de embarcaciones; tanto civiles como militares. Uno de los procesos es generar un subproducto en forma de residuos de escoria de cobre, el cual asciende a aproximadamente 400 toneladas al año.

### **3.2.2 Definición de proporcionalidad**

Para efectuar una comparación adecuada entre las sustituciones de ambos materiales, es recomendable llevar a cabo ambas sustituciones utilizando un tamaño granular idéntico para ambos materiales.

Dado que se trata de dos materiales significativamente diferentes y obtenidos de formas muy distintas (el material seleccionado extraído de la Planta de Áridos de Concremag y la escoria de cobre residual resultante de un proceso de limpieza efectuado por ASMAR), la distribución del tamaño de partículas experimentará una variación considerable.

Tabla 3.1: Resumen de porcentajes de reemplazos.

Material	Ensayo N°	Porcentaje de reemplazo	Porcentaje de reemplazo
		Tamaño granular tamiz N°40 (0,5 mm)	Masa total de los ensayos
Escoria de Cobre Residual	1	30%	8,75%
	2	40%	11,67%
	3	50%	14,59%
	4	60%	17,50%

Fuente: propia.

### 3.2.3 Ensayos de laboratorio

#### 3.2.3.1 Realización de pruebas Proctor

Cómo se explicó anteriormente, el ensayo Proctor se emplea para establecer la densidad seca óptima de un suelo y la humedad requerida para alcanzarla. Este procedimiento se aplica para analizar la compactación y la capacidad de carga de un suelo, con el propósito de asegurar que dicho suelo cuente con la resistencia y densidad adecuada para soportar las cargas previstas.

El objetivo de esta sección es llevar a cabo los ensayos Proctor necesarios, utilizando principalmente el suelo tal como se encuentre en la naturaleza y las cantidades especificadas de escoria de cobre residual.

#### 3.2.3.2 Realización de pruebas CBR

La siguiente sección del capítulo tiene como finalidad realizar los ensayos CBR requeridos; empleando principalmente el suelo en su estado natural y las cantidades específicas de escoria de cobre residual según se indique. El propósito central es llevar a cabo evaluaciones precisas de la capacidad de carga del suelo en su condición natural y cómo esta capacidad se ve afectada por la adición de escoria de cobre residual.

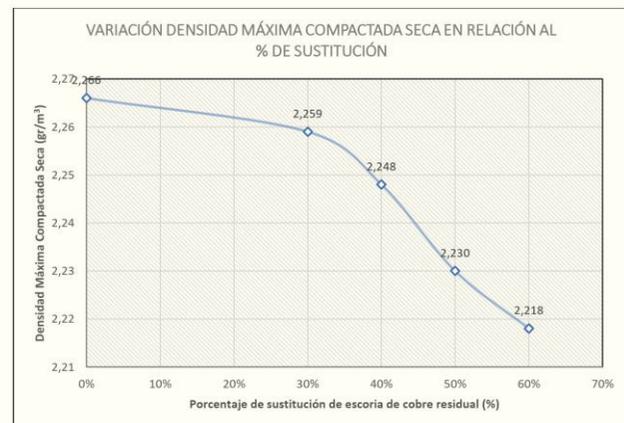
Como es conocido, la densidad seca se refiere al peso de las partículas sólidas en relación con el volumen, lo que indica la cantidad de partículas sólidas presentes en un determinado volumen. En consecuencia, una mayor densidad seca implica un menor volumen de poros y, por ende, una menor deformación ante una carga externa [12]. Esto puede explicarse principalmente por el hecho de que la escoria de cobre residual, al tener una densidad ligeramente menor que la del material del suelo natural, requiere un volumen mayor de suelo natural mezclado con escoria de cobre para obtener el mismo peso de partículas sólidas utilizado en el ensayo de suelo en su estado natural [13].

## 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de esta sección consiste en examinar los resultados de los ensayos de laboratorio aplicados en las mezclas de la subrasante en su estado original y cuando se sustituye por escoria de cobre residual. Este análisis se efectuó al comparar los resultados obtenidos de la subrasante granular en su estado natural con aquellos obtenidos al reemplazar la escoria de cobre residual en diversas proporciones.

### 4.1 Evaluación de pruebas Proctor

Se evidencia una disminución gradual de la densidad máxima compactada seca, con incrementos en el porcentaje de sustitución, refleja un patrón. A medida que aumenta la proporción de escoria de cobre residual, se observa una reducción en la densidad máxima compactada seca. Este hallazgo indica que la sustitución tiene un impacto gradual en la compacidad del suelo, lo que influye en la resistencia y capacidad de carga de la subrasante.

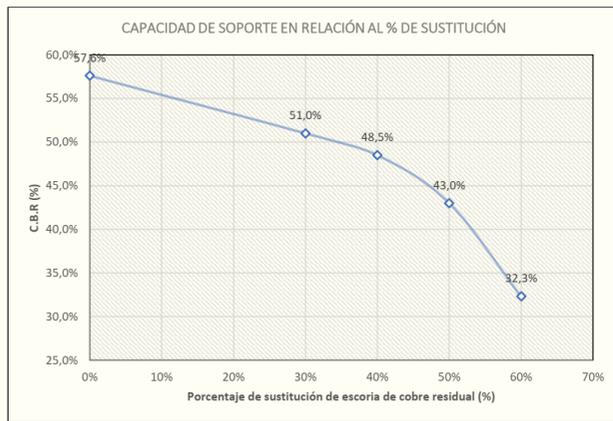


Fuente: propia.

Fig. 4.1: Variación de la densidad máxima compactada seca en relación con el porcentaje de sustitución

### 4.2 EVALUACIÓN DE PRUEBAS CBR

Se observa una disminución progresiva en la capacidad de soporte a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de escoria de cobre residual. La capacidad de soporte sin sustitución es del 57,6%, pero disminuye a 51,0%, 48,5%, 43,0% y 32,3% con 30%, 40%, 50% y 60% de sustitución, respectivamente. Esta tendencia sugiere que la introducción de la escoria de cobre residual tiene un impacto negativo en la resistencia y estabilidad del suelo.



Fuente: propia.

Fig. 4.2: Variación de la capacidad de soporte en relación con el porcentaje de sustitución

### 4.3 EVALUACIÓN CON RESPECTO AL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.

Resulta fundamental evaluar la capacidad de soporte de cada uno de los porcentajes de sustitución para determinar en qué capa del pavimento se pueden aplicar, manteniéndose en conformidad con las normativas vigentes. Es por esta razón que se llevó a cabo una investigación detallada del Capítulo N°1 del SERVIU, titulado “Diseño Estructural de Pavimentos” [14].

Esto permite concluir que los espesores proporcionados por el SERVIU para una subbase o mejoramiento son apropiados para las diferentes sustituciones con escoria de cobre residual, ya que se encuentran dentro de la banda granulométrica y se comprueba que la granulometría es adecuada para resistir la energía de compactación, asegurando de esta manera la capacidad de soporte.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los hallazgos de esta investigación se comunican a través de datos y representaciones gráficas. En la Figura 3.1, se evidencia una reducción gradual en la densidad máxima compactada seca (DMCS) a medida que aumenta el porcentaje de sustitución con escoria de cobre residual, alcanzando una disminución total del 2,12%. En términos prácticos, significa que hay una mejor cantidad de partículas se suelo compactadas en un espacio determinado, lo que tiene implicaciones en una menor resistencia, una menor capacidad de carga, una mayor porosidad (más espacios vacíos) y pérdida de estabilidad.

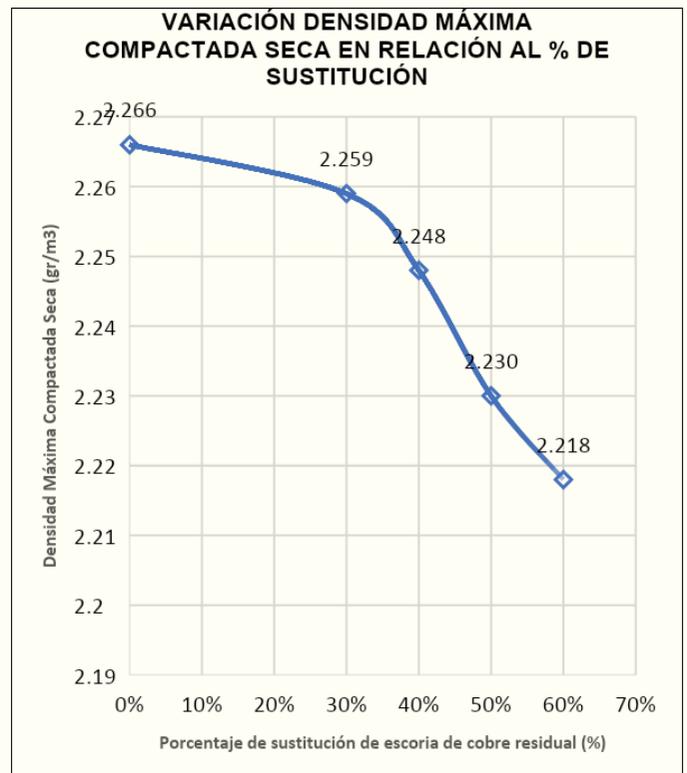


Fig. 4.3: Variación de la densidad máxima compactada seca en relación con el porcentaje de sustitución

En la Figura 3.2. muestra una disminución progresiva en la capacidad de soporte a medida que se incrementa la proporción de escoria de cobre residual, registrando una disminución total del 43,92%. Esta situación se explica por las características inherentes del suelo, donde la sustitución con escoria de cobre residual, siendo menos densa que el suelo natural objeto de estudio, incide principalmente en la densidad de los suelos granulares. La compactación de la mezcla resulta en una menor cantidad de contactos, reduciendo así la densidad y, consecuentemente, disminuyendo la capacidad de soporte.



Fig. 5.1: Variación de la capacidad de soporte en relación con el porcentaje de sustitución

En el ámbito de diseño estructural de pavimentos urbanos, la corriente predominante a nivel global actualmente se inclina hacia el empleo de metodologías mecanicistas, las cuales han demostrado ser más precisas en la predicción del comportamiento de este tipo de pavimentos.

Por lo tanto, resulta fundamental evaluar la capacidad de soporte de cada uno de los porcentajes de sustitución para determinar en qué capa del pavimento se pueden aplicar, manteniéndose en conformidad con las normativas vigentes. Es por esta razón que se llevó a cabo una investigación detallada del Capítulo N°1 del SERVIU, titulado “Diseño Estructural de Pavimentos”.

El Servicio de Vivienda y Urbanización (SERVIU) ha creado guías de diseño destinadas a tráfico inferiores a 1x10<sup>6</sup> ejes equivalentes (EE). Estas guías han sido elaboradas considerando las características más significativas de los pavimentos urbanos en las diferentes regiones del país y son aplicables siempre que las obras de pavimentación respectivas se llevan a cabo cumpliendo estrictamente con las Especificaciones Técnicas del SERVIU.

## 6. CONCLUSIÓN

En conclusión, los resultados obtenidos al sustituir la escoria de cobre residual en el suelo natural revelan un impacto significativo en las propiedades geotécnicas del material. La disminución gradual de la densidad máxima compactada seca, con una reducción máxima del 2,12%, indica una mayor porosidad y ligereza en el suelo al incorporar mayores porcentajes de escoria de cobre. Asimismo, la capacidad de soporte experimenta una disminución progresiva, siendo más notoria, con una baja del 42,8%, al sustituir entre el 30% y el 60% con escoria de cobre residual.

Sin embargo, al considerar la aplicación de estos suelos mejorados en pavimentos, se observa que todos los porcentajes de sustitución cumplen con los requisitos establecidos por la guía del SERVIU para mejorar o constituir la subbase granular de un pavimento, al superar el umbral del 20%. Esto sugiere que estos suelos modificados pueden ser empleados con éxito en diversos tipos de vías.

En cuanto al pavimento asfáltico, los resultados son positivos, ya que los porcentajes de sustitución cumplen con los estándares del SERVIU. Sin embargo, en el pavimento de hormigón, los porcentajes por sí solos no alcanzan el requisito mínimo del 60% de capacidad de soporte exigido por el SERVIU. No obstante, destaca la posibilidad de agregar un geotextil, logrando los requisitos para la utilización de pavimentos de hormigón.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Vásquez. Ana, “Suelos de fundación de la ciudad de Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena,” Memoria de Título, Mg. en Ciencias de la Ingeniería, Depto. de Ing. Civil, Univ. de Chile, Santiago, Chile, Abril. 2012.
- [2] Villarroel. Jorge, “Characterisation of stress-strain behaviour of a chemically stabilised soft soil reinforced with fibres under monotonic and cyclic loadings,” Ph.D Thesis, Univ. de Coimbra, Coimbra, Julio, 2022.
- [3] Economía y Finanzas. Ministerio, “Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras,” Snip. Rev. vol. 1, pp. 12, 2015.

- [4] Diaz-Rosero, Yessica; González-Salcedo, Luis; Diaz-Rosero, Jherson. (2020) Caracterización de escoria de cobre secundaria y evaluación de su actividad puzolánica. Accessed agoust 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23850/22565035.2696>
- [5] Cendoya, Patricio. “Revista Chilena de Ingeniería,” Snip. Rev, vol. 17, pp. 85-94, 2009.
- [6] Romero, F. (2011) ¿Qué son los áridos? Accessed september 2023. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20100916084544/http://www.gremiarids.com/CAT/arids.ph>
- [7] Domínguez, P. (2021) Suelo seleccionado: qué es, principales usos y características. Accessed september 2023. [Online]. Available: <https://www.hnossalguero.com/suelo-seleccionado-usos-caracteristicas/>
- [8] Sanchez, B. (2020) Granalla de Acero Ecológica. Accessed september 2023. [Online]. Available: <https://comercialchile.cl/producto/granalla-ecologica/>
- [9] INN. (1979). Mecánica de suelos – Limites de Consistencia – Parte 2: determinación del límite plástico. Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- [10] INN. (1979). Mecánica de suelos – Limites de Consistencia – Parte 1: determinación del límite líquido. Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- [11] INN. (1981). Mecánica de suelos - Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio. Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- [12] S. Kofi. A Laboratory Investigation into the Effect of Water Content on the CBR of a Subgrade soil. Ghana: Kwame Nkrumah University of Science and Technology
- [13] Carter, Michael and Bentley, Stephen. (1991). “Soil properties and Their Correlations”. vol. 2, pp. 138-149, 2016.
- [14] “Diseño Estructural de Pavimentos”. [Online]. Available: <http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/doc/M-PALL/mpall3docs/Cap%201%20Diseno%20Estructural%20de%20Pavimentos.pdf>

# EVALUACION COMPARATIVA MEDIANTE DISEÑO BASADO EN EL DESEMPEÑO DE UN EDIFICIO ESTRUCTURADO EN BASE A MUROS.

Juan Carlos Vielma-Quintero<sup>1</sup>, Jorge Carvallo<sup>2</sup>, Juan Carlos Vielma<sup>3</sup>

## RESUMEN

*El diseño basado en el desempeño ha sido cada vez más utilizado en la práctica debido a mejoras computacionales, la sofisticación y difusión de métodos de análisis no lineales, y al desarrollo de programas comerciales que facilitan su aplicación. Podemos evaluar el efecto no lineal de eventos sísmicos de gran magnitud en el comportamiento estructural de un edificio, verificar diseños preliminares basados en métodos basados en fuerzas, validar regulaciones de diseño estándar, determinar deformaciones y calcular aceleraciones que pueden traducirse en parámetros de daño estructural y pérdidas económicas, entre otras funciones. Documentos guía han presentado metodologías para establecer requisitos, criterios de evaluación, métodos de análisis, etc., cada uno con diferentes objetivos. En este artículo, se aplica uno de los métodos, conocido como el procedimiento alternativo de ACHISINA, a una estructura en base a muros diseñada según las normas chilenas actuales. Se aborda la modelización de la estructura resistente a los terremotos del edificio, la preparación de registros sísmicos y los aspectos que limitan la aplicación rigurosa del método en un marco de análisis no elástico. Los resultados obtenidos en los respectivos análisis para evaluar el desempeño estructural se comparan con los criterios de desempeño correspondientes delineados en el procedimiento de ACHISINA.*

---

<sup>1</sup> Ing. Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso/Carvallo y asociados LTDA, [juan.vielma.q@mail.pucv.cl](mailto:juan.vielma.q@mail.pucv.cl)

<sup>2</sup> MSc, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso/Carvallo y asociados LTDA, [jorge.carvallo@pucv.cl](mailto:jorge.carvallo@pucv.cl)

<sup>3</sup> PhD, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. [juan.vielma@pucv.cl](mailto:juan.vielma@pucv.cl)

## 1. Introducción

El diseño basado en desempeño surgió de la necesidad de los proyectistas estructurales de racionalizar las prescripciones de las normas, que fueron desarrollados de forma empírica o por juicios de expertos, y prescindir de estas en el diseño al demostrar un comportamiento equivalente o superior a los alcances de estas normas [1] [2]. Esto sirviendo como la herramienta que permita validar diseños arquitectónicos que son inviables por norma, acomodar el uso de nuevos materiales y/o sistemas estructurales innovadores, y eximirse de los límites prescriptivos de las normativas que rigen métodos tradicionales, como por ejemplo la altura máxima permitida de un edificio [3] [4] [5]. Asimismo, se unió a esto la necesidad de los tomadores de decisiones de cuantificar el beneficio de invertir en una estructura sismorresistente superior, analizando a partir de su desempeño los daños y pérdidas que podría sufrir en eventos durante su vida útil [6] [7] [8] [9] [10]. De igual manera, está la preocupación de la sociedad acerca de la seguridad y confiabilidad del diseño frente a los sismos fuertes, buscando en sí el resguardo de vida de los ocupantes, el continuo funcionamiento de servicios esenciales y asegurar la contención en las instalaciones que manejan elementos peligrosos, entre varias otras funciones específicas [7] [11] [12] [13].

Es por esto, que las publicaciones más recientes buscaron regularizar y estandarizar la implementación del método, buscando integrar además los resultados de nuevas investigaciones y concesiones de criterios, y explorando el uso de análisis más complejos posibles ahora con la mejora de capacidad de procesamiento computacional. Particularmente, las guías y procedimientos utilizados ampliamente en la actualidad se pueden destacar el ASCE 7-16[14], ASCE/SEI 41-17[15], TBI [16], LATBSDC [17] y FEMA P-58 [18].

En cambio, la norma de diseño sismorresistente en Chile se caracteriza por requerir solamente el uso de análisis lineal elástico, siendo prevaeciente el uso del método de espectro de respuesta. El uso del análisis no-lineal estático con empuje incremental (Pushover) no es prescrito por las normas, pero son usualmente utilizados para apoyar las revisiones de edificios altos habitacionales. Por otro lado, los análisis tiempo historia no-lineal raramente son utilizados, siendo principalmente empleados para verificar la respuesta sísmica a edificios con disipación suplementaria. Sin embargo, Aun con

validaciones empíricas del nivel de desempeño esperado por eventos sísmicos recientes, surgió la necesidad de establecer un método de análisis formalizado para validar el diseño chileno explícitamente [19]. Por lo tanto, se desarrolló a consenso un documento conteniendo el procedimiento del diseño basado en desempeño por ACHISINA [20], con el propósito de ser discutido y evaluado y posteriormente ser utilizado como estándar en el futuro.

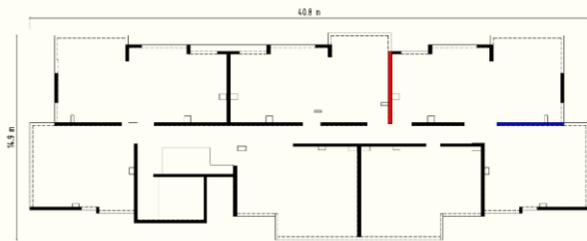
Bajo este contexto, se presentará en el siguiente artículo, el marco metodológico empleado para evaluar el desempeño de un edificio estructurado en base a muros mediante análisis no-lineal, bajo el procedimiento estipulado en el documento de ACHISINA.

## 2. Metodología

Un paso importante para el desarrollo de la metodología es la modelación no-lineal de la estructura, debido a que la calidad de resultados depende que este represente al comportamiento que exhibirá frente a las solicitaciones impuestas. En la siguiente sección se describirán las características relevantes del edificio bajo estudio, seguido de la definición de los materiales según su parámetros y modelos constitutivos, finalizando con las consideraciones para llevar el cabo el modelamiento de cada uno de los elementos y otros aspectos de importancia, para así obtener el modelo computacional creado para el análisis. De forma análoga, se explicará el procedimiento de obtención y modificación de los registros sísmicos a emplear dentro del análisis no lineal tiempo-historia, y los criterios de aceptación según el procedimiento delineado en el documento de ACHISINA.

### 2.1 Descripción del edificio

El edificio analizado consiste en una torre de departamentos con uso habitacional, ubicado en la localidad de Reñaca en la comuna de Viña del Mar. Está materializado en hormigón armado, presentando 14 pisos y dos niveles de subterráneos, sumando con esto una altura total de 37 metros desde el nivel de terreno. Respecto a su emplazamiento, el edificio se encuentra fundado en suelo tipo C y está localizado en zona sísmica 3 (Aceleración efectiva  $A_0=0.4g$ ), y con una categoría de ocupación II, todo según las clasificaciones contenidas en la norma NCh433.



**Fig. 1** - Estructuración en planta, marcado en líneas negras los muros y en líneas claras las vigas.

La estructuración del edificio, según la Fig. 1, sigue la práctica chilena de usar muros especiales con geometrías complejas y vigas de acople. Respecto a sus dimensiones y materiales utilizados, los espesores y grados de hormigón de muro varían por piso y dirección, en la cual se puede resumir en la Tabla 1.

El diseño estructural fue realizado mediante un análisis modal espectral según las prescripciones de la norma NCh433, y siguiendo el código de diseño ACI 318-08 [21] con las modificaciones del decreto supremo n°60. Se resume los resultados de este análisis en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Durante este procedimiento, se realizó el detallamiento de la armadura de muros y vigas, empleando acero grado A630-420H. Por otro lado, no exigido actualmente por las normativas, durante este proceso se consideraron los principios de diseño por capacidad en los muros, que no fueron incluidos hasta la edición del año 2019 del código ACI318 [22].

**Tabla 1** - Espesores y grados de hormigón de muros, para diseño inicial y rediseño.

Piso	Diseño inicial			Rediseño		
	Hormigón (MPa)	Espesor X (cm)	Espesor Y (cm)	Hormigón (MPa)	Espesor X (cm)	Espesor Y (cm)
8 a 14	25	20	20	35	20	25
7	25	20	20	35	20	30
5 a 6	30	20	20	35	20	30
4	30	20	25	35	20	30
3	35	20	25	35	20	30
1 a 2	35	20	30	35	20	30

## 2.2 Modelamiento estructural

La modelización no lineal de la estructura sismorresistente del edificio bajo estudio se realizó utilizando las herramientas proporcionadas por los productos de software Seismostruct [23] y Seismobuild

[24], siguiendo las recomendaciones y directrices presentadas en su documentación. La siguiente sección presenta cómo los programas modelan los elementos estructurales y su base teórica, así como las consideraciones utilizadas para el desarrollo del modelo analítico.

**Tabla 2** – Resultados de análisis modal espectral

Parámetro	Dirección X	Dirección Y
Periodo Fundamental [s]	0.86	1.41
Factor de reducción de respuesta $R^*$	8.26	9.39
Corte basal elástico $Q_{(R=1)}$ [Tonf]	2950.25	1880.69
Corte basal máximo inelástico $Q_{max}$ [Tonf]	1274.86	1274.86
Corte basal mínimo inelástico $Q_{min}$ [Tonf]	607.08	607.08
Corte basal inelástico reducido $Q_{(R^*)}$ [Tonf]	357.06	200.36
Corte basal inelástico de diseño $Q_{diseño}$ [Tonf]	607.08	607.08
Factor de reducción de respuesta ajustado $R^{**}$	4.86	3.10
Aceleración espectral inelástico $S_a$ [m/seg <sup>2</sup> ]	6.23	3.20
Desplazamiento espectral inelástico $S_{de}$ [m]	0.1211	0.2199
Desplazamiento ultimo de techo $\delta_u$ [m]	0.1574	0.2859

En primer lugar, en el proceso de modelado, se considera la no linealidad geométrica teniendo en cuenta grandes desplazamientos y rotaciones, así como deformaciones independientes de cuerda del elemento (efectos P-Delta). En segundo lugar, se considera la no-linealidad del material a partir de la distribución completa de la inelasticidad en el elemento, a diferencia de la práctica usual de usar modelos en donde se concentran la plasticidad en puntos concretos. Esto tiene la ventaja de no requerir una calibración empírica del comportamiento real o ideal del elemento bajo condiciones de carga idealizadas, como sucede con los modelos de plasticidad concentrada. Se utiliza un modelo basado en fibras para

representar el comportamiento de la sección transversal del elemento, donde cada fibra se asocia con una relación uniaxial esfuerzo-deformación, y el estado del elemento se obtiene a partir de la integración de la respuesta uniaxial no lineal esfuerzo-deformación de cada fibra individual en la que se subdivide la sección (el número de fibras depende de las dimensiones de la sección transversal de cada miembro estructural).

Dentro de las propiedades de los materiales a utilizar, para el hormigón, se utiliza como curva constitutiva el modelo no-lineal de Mander et al. [25] para el hormigón de grado G25. Los parámetros que definen el modelo constitutivo se encuentran resumidos en la Tabla 3, para los grados de hormigón empleados en el modelo. Para el acero de la armadura de refuerzo longitudinal y transversal, se emplea el modelo constitutivo de Menegotto y Pinto [26], para el acero de grado A630-420H. Los parámetros que definen esta se resume en la

Tabla 4.

**Tabla 3.** Parámetros de modelo constitutivo de Mander et al, hormigón G25, G30 y G35

Parámetro	Hormigón G25	Hormigón G30	Hormigón G35
Resistencia a la compresión (MPa)	33.00	38.00	43.00
Límite inferior de la resistencia (MPa)	25.00	30.00	35.00
Resistencia a la tensión (MPa)	2.60	2.90	3.20
Módulo de elasticidad (MPa)	26999.00	28973.00	30820.00
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	24.00	24.00	24.00

**Tabla 4.** Parámetros de modelo constitutivo Menegotto y Pinto, acero grado A630-420H

Parámetro	Valor
Módulo de elasticidad, $E$ (MPa)	200000.00
Resistencia a la fluencia, $F_y$ (MPa)	490.00
Deformación de fractura/pandeo ( $A_{dim}$ )	1.00
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	78.00

### 2.3 Modificación de registros sísmicos

Los registros sísmicos se seleccionan de acuerdo con los requisitos del documento ACHISINA, que establece que se deben utilizar como mínimo 3 pares de registros horizontales (reales o artificiales) con características congruentes (origen, tipo de suelo, magnitud, entre otros) en relación con los eventos que controlan la sismicidad de diseño en la región. Para lograr esto, se eligieron los registros chilenos obtenidos de la base de datos del CESMD [27] con el fin de obtener varios pares de registros mayores a 7; se utilizó el valor promedio del parámetro de interés evaluado en los criterios de aceptación.

Además, estos registros sísmicos deben ser modificados de manera que el promedio de los espectros combinados de desplazamiento mediante SRSS de todos los pares no sea inferior a 1.17 veces el espectro de desplazamiento elástico de NCh433, considerando  $\beta=5\%$ , entre los períodos de 0.50T y 1.25T, donde T corresponde a los períodos principales. Sin embargo, a pesar de esta indicación, los acelerogramas se han adaptado para un rango de períodos entre 0.05 segundos y 4.00 segundos. Esta consideración es pertinente, ya que incorpora las demandas sísmicas para el rango de períodos cortos, que corresponden a modos de vibración superiores. La contribución de estos modos de vibración superiores se vuelve decisiva en edificios de cierta altura. Para controlar eficazmente el costo computacional de los análisis, se recortan los registros utilizando el criterio de duración significativa de los registros, definido por la intensidad de Arias [28].

Finalmente, el procedimiento de emparejamiento espectral se utiliza para modificar los registros corregidos de manera que los espectros combinados de desplazamiento no sean inferiores al espectro de desplazamiento definido en los requisitos del documento ACHISINA. Este proceso se facilita mediante el programa Seismomatch [29], en el cual un grupo de registros puede ser emparejado en función de un registro de aceleración objetivo. Sin embargo, debido a que el documento requiere ajustarse el espectro de desplazamiento, se decide utilizar el espectro de aceleración resultante de la integración de esta. A partir de todo este procedimiento, se pueden obtener los registros modificados para ser utilizados en el estado límite de servicio, correspondiendo al sismo de diseño (SD) en el documento de ACHISINA. Para el sismo máximo considerando (SMC), la norma permite utilizar

los registros utilizados como sismo de diseño, pero aumentado en sus aceleraciones en un 30%.

## 2.4 Criterios de aceptación

Para evaluar el nivel de desempeño del edificio el procedimiento contenido en el documento de ACHISINA incluye criterios de desempeño para ambos estados límites, haciendo la verificación a nivel global y por los elementos que componen la estructura. Para el caso de estudio, es de interés conocer los criterios de desempeño para los muros y las vigas de acople controlados por deformación, en donde el nivel de desempeño de servicio presenta los siguientes límites:

**Tabla 5.** Criterios de aceptación según manual de ACHISINA.

Tipo	Criterio	Ocupación Inmediata	Deformación adicional
Local	Acortamiento unitario en el hormigón confinado	0.008	0.015
	Acortamiento unitario en el hormigón no confinado	0.003	0.003
	Alargamiento unitario en el acero de refuerzo	0.030	0.050
	Rotación plástica en viga de acople	0.01	Sin límite si no compromete estabilidad
Global	Edificios con elementos no estructurales frágiles	0.005	Sin límite
	Edificios con elementos no estructurales dúctiles	0.007	Sin límite

Para evaluar el desempeño global, se miden los desplazamientos en los centros de masa de cada nivel. Sin embargo, para el desempeño local, es necesario discretizar las deformaciones por el tipo de material.

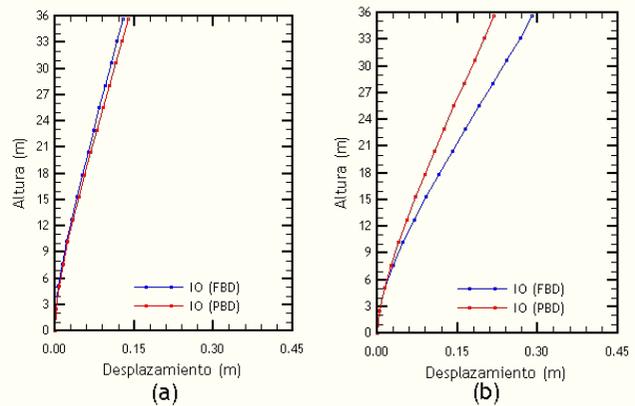
## 3. Resultados y análisis

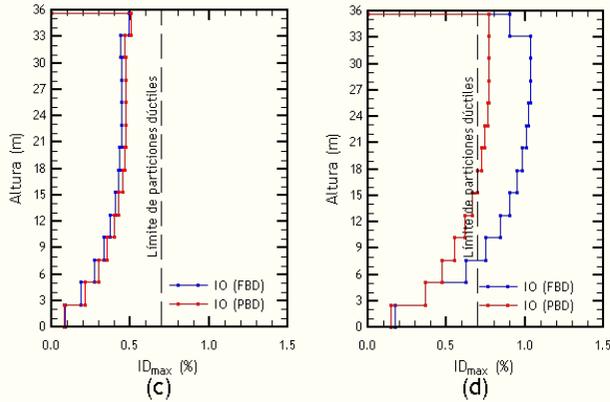
En esta sección, se presentan los resultados obtenidos utilizando el marco metodológico delineado en el capítulo anterior para su desarrollo. También se discuten los criterios de desempeño que rigen la evaluación de la estructura estudiada. Dentro del alcance de este artículo, resulta impráctico realizar una evaluación exhaustiva de cada elemento debido al gran número de elementos que componen la estructura. Por lo tanto, se ha decidido incluir en su lugar los resultados de un muro característico marcada rojo en el plano, como se muestra en la Fig. 1. Este fue elegido porque es uno de los elementos que presentan una de las relaciones demanda-capacidad más exigentes observadas en los análisis realizados.

Por otro lado, debido a que el comportamiento exhibido por la estructura del edificio no cumple tanto para los criterios de desempeño globales y locales, como se revisara en esta sección a continuación, se dio la necesidad de hacer un rediseño para dar su cumplimiento. En esto se incluye aumentar la dimensiones y el grado de hormigón que compone los muros, como se resumen en la Tabla 1, al igual que modificar su detalle de armadura, principalmente fuera de la sección crítica (pisos 3-14).

### 3.1 Estado límite de ocupación inmediata

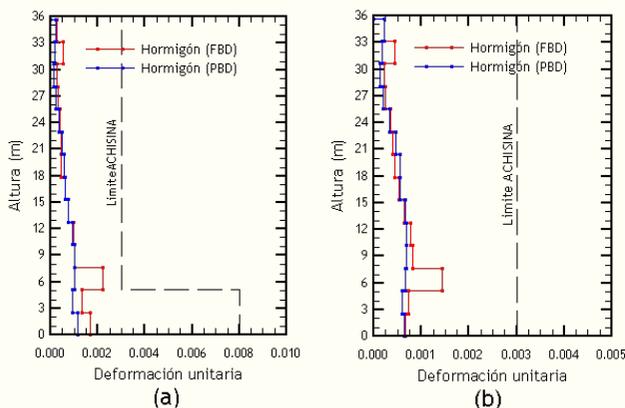
En primer lugar, se ilustra en la Fig. 2a y Fig. 2b el desplazamiento máximo medidos para el centro de masa de cada nivel, seguido de las derivas de entrepiso en la Fig. 2c y Fig. 2d, mostrando los valores promedio para cada dirección ortogonal de la estructura.





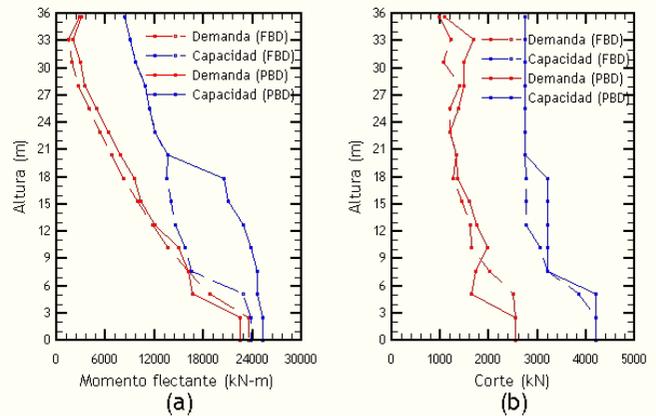
**Fig. 2** - Comparación de desplazamiento y derivas de entpiso de diseño Original vs Rediseño. (a) Desplazamiento en X (b) Desplazamiento en Y (c) Deriva en X (d) Deriva en Y

Respecto al rediseño, en la dirección X, se puede apreciar un ligero incremento del desplazamiento máximo incurrido, lo cual puede ser razonado por un aumento flexibilidad por el aumento masa total del edificio sin haber aumentado su rigidez respecto al modelo anterior. Respecto a la dirección Y, se puede apreciar una sustancial mejora en el comportamiento, reduciendo en general hasta un 30% el desplazamiento máximo, y superando el límite de particiones dúctiles hasta un máximo de 0.05% en los últimos pisos. Para la evaluación del desempeño local de los muros seleccionados, se presentan en la Fig. 3a, Fig. 3b y Fig. 3c las relaciones demanda/capacidades máximas obtenidas para el alargamiento del acero y el acortamiento del hormigón.



**Fig. 3** - Comparación demanda/capacidad de la deformación unitaria, muro en dirección Y, bajo diseño FBD y PBD. (a)Elemento de borde (b) Doble malla Estado (c) acero de refuerzo.

Para el muro seleccionado, se puede observar que no se supera ninguno de los límites de deformación impuestos a los elementos de acero y hormigón. Se puede evidenciar que los márgenes que presenta son menores, acercándose en el primer piso el límite para el alargamiento del acero, y de forma preocupante el límite de deformación para el hormigón no confinado en el tercer piso, justo fuera de la zona contemplada con elementos de borde especial. Esto último puede ser de gran importancia, debido a que presentaría un modo de falla no deseable al alcance diseño, fallando prematuramente en el tercer piso con poco aprovechamiento de la capacidad de deformación adicional prestada para los pisos inferiores.



**Fig. 4** - Comparación demanda/capacidad bajo diseño FBD y PBD. (a) Envoltura de momento (b) Envoltura de corte. Estado Límite de Ocupación Inmediata. Fuente: Elaboración Propia.

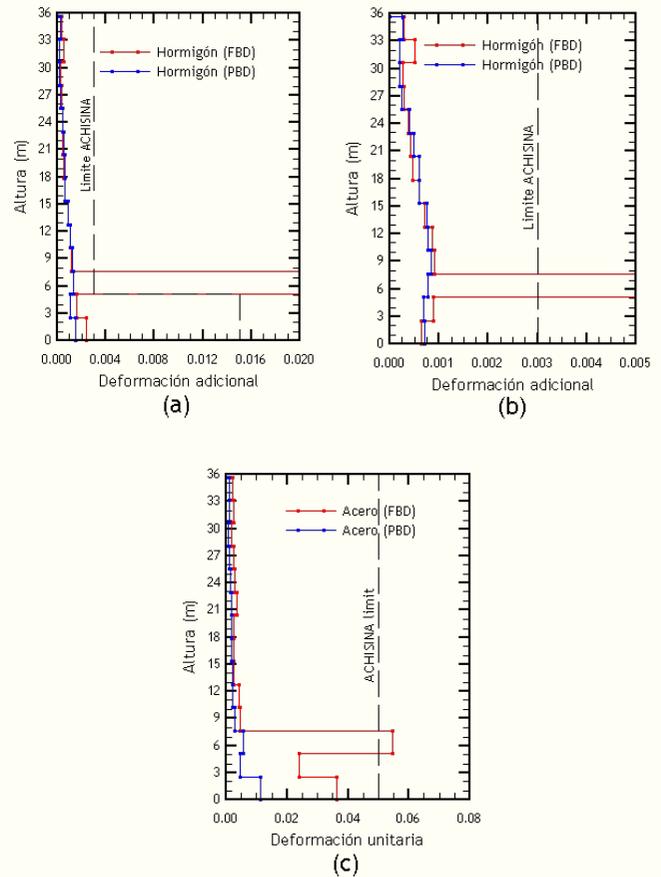
Para explicar lo anterior, se compara la demanda y capacidad del momento flector y la cortante, en la Fig. 4a y Fig 4b, respectivamente. Para esto, se considera la demanda como la envolvente del análisis realizado, mientras que la capacidad se calcula a partir de las propiedades de los materiales y disposición del refuerzo del muro estudiado, aplicando como carga axial el peso sísmico. Se observa en el primer y en el tercer nivel se logra alcanzar cercanamente al momento flector donde se puede esperar que ocurra la plastificación, posiblemente produciendo una falla prematura en este último debido a su menor capacidad del hormigón, tal como se observó en los resultados anteriores. En cambio, la demanda por esfuerzo de corte igualmente no supera la capacidad del muro, por lo que es de esperarse una falla por flexión.

Respecto al rediseño, se puede observar que el muro del tercer piso no presenta deformaciones superiores según se apreció en el diseño original, asimismo, la comparación entre la demanda y capacidad a momento parece indicar la formación de la sección crítica en el primer piso.

### 3.2 Estado limite de capacidad de deformacion adicional

El estado límite corresponde solamente la evaluación del desempeño local, en donde se revisan los mismos parámetros que en el estado límite anterior, pero permitiendo un rango mayor de daños para una sollicitación sísmica amplificada. De forma análoga, se presenta las relaciones demanda/capacidad para el alargamiento del acero y el acortamiento del hormigón de los muros seleccionados, en la Fig. 5a, Fig. 5b y Fig. 5c.

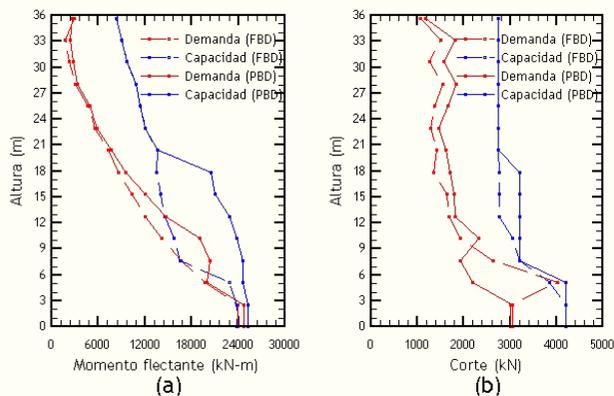
Se evidencia para el tercer nivel que se superan los límites para ambos materiales, presentando valores de deformación en comparación con la capacidad considerables para el hormigón. Estos resultados se pueden fundamentar en el hecho de la pérdida de la capacidad de resistir la flexión, considerando la gran reducción del refuerzo de acero, el espesor y el grado del hormigón utilizados entre los dos primeros pisos y los pisos superiores. En efecto, en lugar de concentrarse las deformaciones plásticas en los primeros niveles, está ocurriendo esto en el tercero, cuyo diseño no está preparado para manejar grandes deformaciones.



**Fig. 5** - Comparación demanda/capacidad de la deformación unitaria, bajo diseño FBD y PBD. (a) Elemento de borde (b) Doble malla Estado (c) acero de refuerzo.

De forma análoga al estado límite anterior, ilustrado en la Fig. 6 se tiene que se alcanza el momento de fluencia para el primer y el tercer nivel, con lo que explica los resultados anteriores respecto a las deformaciones experimentadas en este último piso. En efecto, se logra plastificar el muro en ambos niveles, ocurriendo la gran mayoría de la rotación en el tercer nivel y no en el primero, fuera de la intención del diseño por capacidad realizada inicialmente en el procedimiento lineal. Por otro lado, se tiene que se supera el límite del esfuerzo de corte en el segundo nivel, aunque esto viene después de la falla de la fibra de hormigón a compresión, por lo que incide como relevante para el estudio del posible mecanismo de falla de este elemento.

Respecto al rediseño, se presenta una mejora sustancial en cuanto a las deformaciones incurridas, lográndose cumplir con los requisitos especificados para el material de hormigón. En efecto, la comparación entre la demanda y capacidad a momento flector indica que el rediseño logro subsanar la deficiencia que presentaba el diseño original en los pisos 3-7, permitiendo el desarrollo de la rótula plástica dentro de la sección crítica definido en la etapa de diseño. El lector interesado podrá encontrar los resultados completos de esta investigación en [30, 31].



**Fig. 6** - Comparación demanda/capacidad bajo diseño FBD y PBD. (a) Envoltorio de momento (b) Envoltorio de corte. Estado Límite de Capacidad de Deformación Adicional

#### 4. Conclusiones

En el presente artículo, a través del análisis realizado mediante el método ACHISINA, se puede concluir que, aunque la estructura obtenida mediante el diseño basado en fuerzas (FBD) cumple con los criterios establecidos para el estado límite de ocupación inmediata, fue necesario revisar el diseño de los elementos de muro, especialmente aquellos correspondientes a la dirección Y. De hecho, existe una clara necesidad de mantener la capacidad de momento en relación a la altura para evitar la formación de rotulas plásticas fuera de la zona crítica definida en la etapa de diseño, lo que resulta en una subutilización de la mayor capacidad de deformación de los elementos de borde confinados pertenecientes a los dos primeros pisos. Por lo tanto, podría ser necesario incluir en el procedimiento FBD requisitos que tengan en cuenta la participación de modos superiores en el diseño. Para lograr esto, se recomienda evitar cambios bruscos en el grosor de las paredes, en las calidades de los materiales y en la disposición del refuerzo en el diseño, teniendo en cuenta la aparición de mayores momentos en niveles

intermedios debido a una mayor participación de modos superiores.

En base a los resultados de las derivas de entrepiso, se revela la necesidad de aumentar la rigidez en la dirección Y de la estructura obtenida según el diseño basado en fuerzas (FBD), ya que se observaron derivas superiores al 1%, muy por encima del límite del 0.7%, incluso considerando el uso de particiones dúctiles. se estima que es necesario reevaluar estos límites considerados para las derivas de entrepiso, aun con el conocimiento de la intención de obtener un desempeño de Ocupación inmediata al considerar un sismo de diseño, como se evidenció en eventos sísmicos recientes, se considera exigente para edificios que cumplen con un diseño lineal. Estos resultados se mejoraron con la aplicación de la metodología de diseño basado en el desempeño (PBD).

Al comparar las metodologías aplicadas en el diseño del edificio (FBD y PBD), se evidencian diferencias en su aplicación y en los datos medidos resultantes, siendo crítica la diferencia entre los registros sísmicos utilizados. Además, se sugiere realizar el emparejamiento de acelerogramas que se utilizarán en los análisis para evaluar el desempeño de las estructuras, ya sean registros reales o acelerogramas artificiales, abarcando todo el rango de períodos relevantes para la respuesta estructural, en lugar de depender únicamente de la recomendación de igualar entre  $0.5T$  y  $1.25T$ .

#### 5. Referencias

- [1] J. P. Moehle, «Nonlinear analysis for performance-based earthquake engineering», *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 14, n.o 5, pp. 385-400, dic. 2005, doi: 10.1002/tal.334.
- [2] T. Y. Yang, J. P. Moehle, Y. Bozorgnia, F. Zareian, y J. W. Wallace, «Performance assessment of tall concrete core-wall building designed using two alternative approaches: PERFORMANCE ASSESSMENT OF TALL CONCRETE CORE WALL BUILDINGS», *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, vol. 41, n.o 11, pp. 1515-1531, sep. 2012, doi: 10.1002/eqe.2219.
- [3] R. Klemencic, J. A. Fry, y J. D. Hooper, «Performance-based design of tall reinforced concrete ductile core wall systems», *Struct. Design Tall Spec. Build.*, vol. 15, n.o 5, pp. 571-579, dic. 2006, doi: 10.1002/tal.383.
- [4] N. Aly y K. Galal, «Seismic performance and height limits of ductile reinforced masonry shear wall

- buildings with boundary elements», *Engineering Structures*, vol. 190, pp. 171-188, jul. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.03.090.
- [5] S.-H. Jeon y J.-H. Park, «Seismic Fragility of Ordinary Reinforced Concrete Shear Walls with Coupling Beams Designed Using a Performance-Based Procedure», *Applied Sciences*, vol. 10, n.o 12, p. 4075, jun. 2020, doi: 10.3390/app10124075.
- [6] M. Dabaghi, G. Saad, y N. Allhassania, «Seismic Collapse Fragility Analysis of Reinforced Concrete Shear Wall Buildings», *Earthquake Spectra*, vol. 35, n.o 1, pp. 383-404, feb. 2019, doi: 10.1193/121717EQS259M.
- [7] «Reliability-Based Design Methodology for Reinforced Concrete Structural Walls with Special Boundary Elements», *SJ*, vol. 117, n.o 3, may 2020, doi: 10.14359/51721375.
- [8] K. Kolozvari, V. Terzic, R. Miller, y D. Saldana, «Assessment of dynamic behavior and seismic performance of a high-rise rc coupled wall building», *Engineering Structures*, vol. 176, pp. 606-620, dic. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.100.
- [9] F. A. Arifin, T. J. Sullivan, G. MacRae, M. Kurata, y T. Takeda, «Lessons for loss assessment from the Canterbury earthquakes: a 22-storey building», *Bull Earthquake Eng.*, vol. 19, n.o 5, pp. 2081-2104, mar. 2021, doi: 10.1007/s10518-021-01055-7.
- [10] X. Ji, D. Liu, y C. Molina Hutt, «Seismic performance evaluation of a high-rise building with novel hybrid coupled walls», *Engineering Structures*, vol. 169, pp. 216-225, ago. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.05.011.
- [11] K. Zhong, T. Lin, G. G. Deierlein, R. W. Graves, F. Silva, y N. Luco, «Tall building performance-based seismic design using SCEC broadband platform site-specific ground motion simulations», *Earthquake Engng Struct Dyn.*, vol. 50, n.o 1, pp. 81-98, ene. 2021, doi: 10.1002/eqe.3364.
- [12] J. C. Vielma, A. H. Barbat, y S. Oller, «Seismic safety of low ductility structures used in Spain», *Bull Earthquake Eng.*, vol. 8, n.o 1, pp. 135-155, feb. 2010, doi: 10.1007/s10518-009-9127-4.
- [13] G. R. Hagen, «Performance-Based Analysis of a Reinforced Concrete Shear Wall Building», California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, 2012. doi: 10.15368/theses.2012.120.
- [14] ASCE, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-16. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [15] ASCE, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, ASCE/SEI 41-17. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [16] PEER, *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings*, TBI. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, Univ. of California, Berkeley, 2017.
- [17] LATBSDC, *An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Los Angeles Region*. Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, 2020.
- [18] FEMA, *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Buildings*, P-58-6. Washington, DC: prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, 2018.
- [19] R. Lagos et al., «The quest for resilience: The Chilean practice of seismic design for reinforced concrete buildings», *Earthquake Spectra*, vol. 37, n.o 1, pp. 26-45, 2021.
- [20] ACHISINA, *Procedimiento Alternativo para el Análisis y Diseño Sísmico de Edificios*. Santiago, Chile: Subcomité n° 7 de ACHISINA, 2017.
- [21] ACI, *318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute, 2008.
- [22] ACI, *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute, 2019.
- [23] Seismosoft Ltd., *SeismoStruct 2021 User Manual - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures*. Pavia, Italy, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://seismosoft.com/>
- [24] Seismosoft Ltd., *SeismoBuild 2021 User Manual - «A computer program for seismic assessment of reinforced concrete framed structures»*. Pavia, Italy, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://seismosoft.com/>
- [25] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, y R. Park, «Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete», *J. Struct. Eng.*, vol. 114, n.o 8, pp. 1804-1826, 1988.

- [26] M. Menegotto y P. E. Pinto, «Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending», Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, International Association for Bridge and Structural Engineering, pp. 15-22, 1973.
- [27] CESMD, «Center for Engineering Strong Motion Data». 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.strongmotioncenter.org/index.html>
- [28] A. Arias, «A Measure of Earthquake Intensity. Seismic Design for Nuclear Plants. R.J, Hansen. (ed.)», pp. 438-483, 1970.
- [29] Seismosoft Ltd., SeismoMatch 2021. Pavia, Italy, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://seismosoft.com/ha>
- [30] Vielma-Quintero, J. C., Carvallo, J. y Vielma J.C. (2023). Evaluación comparativa de la respuesta sísmica de un edificio estructurado mediante diseño basado al desempeño. Monografía CIMNE IS 79, Monografías de ingeniería sísmica. Barcelona, España. ISSN: 1134-3249.
- [31] Vielma-Quintero, J. C., Carvallo, J. y Vielma J.C. (2023). Comparative assessment of performance-based design methodologies applied to a R.C. shear-wall building. g. Buildings. 2023, 13, 1492. <https://doi.org/10.3390/buildings13061492>
-

# ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO CON EMPUJE INCREMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE DESEMPEÑO DE UNA EDIFICACIÓN TÍPICA HABITACIONAL DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO.

Ricardo Aguayo Ortega <sup>1</sup>, Jorge Carvallo Walbaum <sup>2</sup> & Juan Carlos Vielma Pérez<sup>3</sup>

## RESUMEN

*El análisis estático no lineal ha sido desarrollado en un edificio de hormigón armado para estudiar el comportamiento a flexo-compresión de los muros de corte y estimar el daño a partir del cumplimiento de estados límites definidos en el documento de Diseño basado en desempeño de ACHISINA. Un modelo refinado de fibra distribuida ha sido incorporado en toda la altura del edificio considerando el comportamiento confinado del hormigón a partir del detallamiento de las secciones estructurales. Un diafragma rígido ha sido considerado en la estructura para modelar el comportamiento de la losa de hormigón armado. El método N2 ha sido implementado considerando la demanda sísmica en formato aceleración - desplazamiento a partir del espectro de desplazamiento establecido en el D.S.61, redactado posteriormente al terremoto 8.8Mw del Maule del 2010. Considerando los resultados, se concluye que la estructura obtiene un nivel de desempeño de ocupación inmediata para Drift cercanos al 5‰ en la dirección simétrica Y, mientras que en la dirección asimétrica X se observa una mayor cantidad de daños proporcional a un nivel de seguridad de la vida.*

---

<sup>1</sup> Ingeniero civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. [ingcivilaguayo@gmail.com](mailto:ingcivilaguayo@gmail.com)

<sup>2</sup> Master of Science in Engineering, Profesor Escuela de Ingeniería civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. [jorge.carvallo@pucv.cl](mailto:jorge.carvallo@pucv.cl)

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero, Profesor Escuela de Ingeniería civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. [juan.vielma@pucv.cl](mailto:juan.vielma@pucv.cl)

## 1. Introducción

La naturaleza sismogénica de Chile producto de la interfaz entre la placa de Nazca y Sudamericana, genera un elevada convergencia de -8.4 cm por año, con terremotos con un periodo de ocurrencia mayor que cualquier zona sísmica del mundo [1]. Terremotos de elevada envergadura acontecen en 1985 (8.0Mw), 2010 (8.8Mw) y 2014 (8.2Mw) [2], de facto 14 terremotos generados desde 1900 promediando 1 cada 8 años [3]. Implica la constante necesidad de supervisar y evaluar las herramientas de diseño sismorresistente con el propósito de producir estructuras con un desempeño sísmico adecuado para enfrentar terremotos a nivel de seguridad de la vida. El terremoto del Maule del 2010 ofrece una excelente oportunidad para estudiar los edificios de hormigón armado diseñados por los códigos de diseño sísmico modernos [4], sometidos a un nivel de daños mayores que los reportados para el terremoto de 1985 de Algarrobo [5], en algunos casos con pérdidas económicas significantes [6].

Cambios importantes en la normativa de Chile posterior al terremoto del 2010 [7] son introducidos a través del D.S.61 [8] Y D.S.60 [9], con el propósito de mejorar el comportamiento estructural de los muros de hormigón armado e incorporar conocimientos de diseño basado en desplazamiento, emigrando de la analogía entre desempeño y resistencia. El enfoque de diseño basado en fuerzas (Análisis Modal Espectral) de la norma Nch433 [10] guarda coherencia con el estándar ASCE-7 de los Estados Unidos [11], donde el comportamiento inelástico es considerado a partir de la aplicación de factores de reducción de comportamiento dependiente de la ductilidad estructural [12]. El diseño se limita a un nivel de deformaciones elásticas, desconociendo el comportamiento a niveles de deformación que consideren una degradación importante de la rigidez. Independientemente, el desempeño

estructural fue prácticamente operacional para el terremoto del 2010, sin aplicación normativa del diseño basado en desempeño en Chile [13].

La investigación es focalizada en la evaluación del desempeño de un modelo no lineal con plasticidad distribuida, aplicado a un edificio de 14 pisos de muros de hormigón armado. Para ello, se ha llevado a cabo una modelación no lineal refinada de fibras distribuidas y rotulas concentradas para evaluar el desempeño sísmico tomando como referencia el documento de diseño basado en desempeño de Achisina.

## 2. Antecedentes.

Los terremotos inducen fuerzas y desplazamiento en la estructura, si la estructura tiene la capacidad de una respuesta elástica existirá una relación proporcional entre la fuerza y el desplazamiento, dada por la rigidez inicial del sistema estructural. El diseño es considerado correcto si la sollicitación no sobrepasa la resistencia, no obstante, para niveles de demanda sísmicos extremos como en el caso de Chile es muy probable que esta condición no se garantice. Elevadas demandas sísmicas inducirán el eventual daño de la estructura producto de la incursión inelástica. Por tanto, el método basado por fuerza tiene la gran limitación de no verificar la capacidad de la estructura para sismos de gran intensidad. Los códigos de diseño sísmico que intentan reflejar grandes avances en conocimientos no son transparentes en la determinación del comportamiento completo [14], es por ello la necesidad de introducir nuevos métodos de diseño que nos permitan entender de mejor manera el comportamiento completo hasta la condición de colapso. Esto implica evaluar el cumplimiento de niveles de desempeño en la estructuración para diversos niveles de demanda sísmica.

## 2.1 Diseño lineal basado por fuerzas.

El diseño basado por fuerzas considera un comportamiento lineal, estableciendo una relación perfectamente proporcional entre la fuerza y el desplazamiento, es decir a un nivel infinito de fuerza, infinito es el desplazamiento para todo rango de deformaciones. Factores de agrietamiento constantes son introducidos para representar la pérdida de rigidez de las secciones para sismos elevados. La demanda sísmica es representada por fuerzas distribuidas en la altura del edificio, considerando los modos de vibración [15]. Una combinación modal es necesaria para representar la fuerza de diseño. Las fuerzas sísmicas son definidas a partir de los espectros de aceleraciones establecidos por la clasificación sísmica del suelo de fundación, reducidos previamente por un factor de reducción de respuesta. Estos factores se aplican por igual para todos los modos de vibración, simplificación que no representa el comportamiento real de la estructura [16], pues a grandes niveles de deformación la formación de rotulas plásticas en los primeros pisos provoca que el comportamiento estructural sea influenciado por los modos superiores [17]. Sin embargo, este enfoque de diseño no proporciona información sobre el mecanismo de colapso, dado que se limita únicamente a dar seguridad de la vida.

## 2.2 Diseño basado en desempeño.

La Ingeniería Basada en desempeño busca limitar los daños de las estructuras para diversos niveles de demanda sísmica. SEAOC crea el comité visión 2000 [18] para definir objetivos específicos en el diseño basado en desempeño. En el Blue Book después de terremotos devastadores en 1900, estipula los siguientes objetivos de desempeño que deben cumplir las estructuras: – (1) Soportan un terremoto de baja envergadura sin daños, (2) deberán resistir un terremoto de media envergadura, sin daños estructurales, pero podrían ocurrir daños no estructurales, (3) Soportar un terremoto de rara ocurrencia experimentado daños, sin alcanzar una condición de colapso.

La determinación precisa del comportamiento estructural durante el evento sísmico conlleva una incertidumbre asociada a la determinación del daño. No obstante, mediante análisis no lineales, es posible comprender el comportamiento a flexo-compresión de las secciones de hormigón armado, abarcando un amplio espectro de deformaciones hasta una posible condición de colapso.

Por ejemplo, el diseñador estructural podrá conocer la ubicación real de la zona crítica del edificio, que previamente fue elegida pero nunca verificada explícitamente en el diseño estructural [19].

Esta filosofía diseño últimamente ha sido potenciada por ACHISINA tras la creación de la guía de “Diseño basado en desempeño – Un procedimiento alternativo para el análisis y diseño sísmico de edificios” [20] permite definir las pautas básicas para llevar a cabo un “Performance based design”.

## 2.3 Caso de estudio

Ubicado en la ciudad de Villa Alemana, este es un edificio de 14 pisos de altura con una altura máxima de 39.40, 2.55 m de altura de entrepiso y 2 niveles de subterráneos. De uso habitacional y construido completamente de muros de hormigón armado. Los muros del edificio son estructurados a partir de formas C, L o T, asimétricas principalmente, representativo de los edificios de muros de hormigón armado chilenos. Presenta espesores de 20 cm en la totalidad de la planta con la excepción de algunos muros perimetrales de 30 cm acoplados con vigas que reducen la excentricidad de la planta.

El edificio se encuentra fundado sobre suelo tipo D ( $180 \text{ m/s} < V_s < 350 \text{ m/s}$ ) y zona Sísmica 3 cercana a la zona de subducción. El diseño preliminar fue llevado a cabo considerando principalmente la Nch433 [10], D.S.60 [8] y D.S61[9], a través de un análisis modal espectral. Con un aspecto de forma mayor a 2.6 clasifica como “slender walls”, donde

las deformaciones por flexión son las principales contribuyentes de las deformaciones laterales [21].

## 2.4 Modelación no lineal.

El modelo en base a rotulas concentradas y fibras distribuidas han sido aplicados para la modelación estructural. Un modelo previo de rotulas concentradas llamado M1 fue desarrollado de forma comparativa. Posteriormente un modelo de fibras distribuidas en muros más rotulas concentradas en vigas llamado M2, es utilizado para evaluar el desempeño final. Principalmente, el modelo de fibra busca representar el comportamiento no lineal por flexo – compresión de los muros de hormigón, discretizando la sección transversal en finitas fibras y la sección longitudinal en secciones de integración.



**Figura 1.** Discretización de las fibras distribuidas en la sección transversal.

Además, cada sistema de muro se encuentra unido por cachos rígidos para otorgar compatibilidad en deformación. En cada fibra la no-linealidad es definida a partir del diagrama de momento – curvatura que depende directamente del detallado de las secciones. El modelo de plasticidad distribuida permite desvincular al diseño estructural del concepto de longitud de plastificación, el cual ha sido ampliamente cuestionada su aplicabilidad.

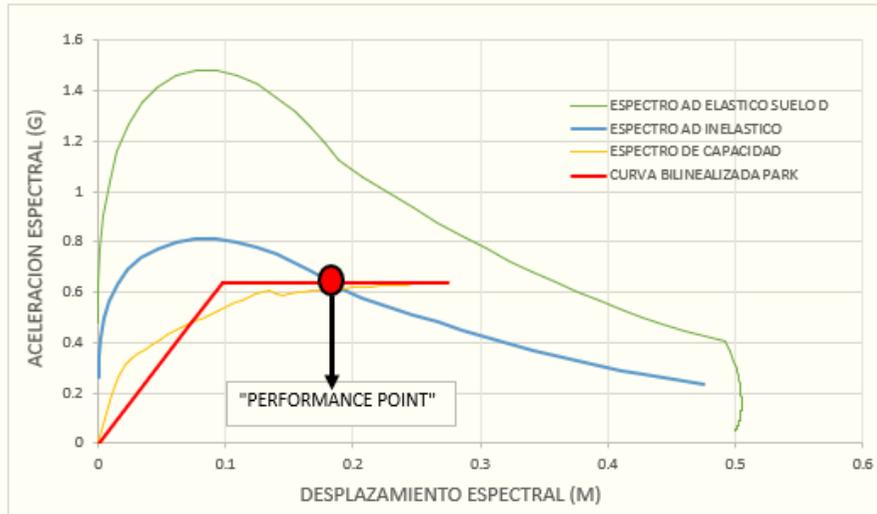
Considerando el modelo constitutivo de análisis no lineal de los materiales se han empleado el modelo de Mander del hormigón [21] y el modelo de Menegotto – Pinto para el acero [22]. Se ha considerado el efecto P- $\Delta$  en análisis estructural.

## 2.5 Definición de la demanda sísmica.

Se emplea un enfoque determinístico en la determinación de la demanda sísmica, a diferencia del enfoque probabilístico ampliamente utilizado en el mundo. El terremoto del Maule del 2010 es considerado como SD (Sismo de diseño) presentado en formato de aceleración – desplazamiento para su posterior aplicación en el método N2 [23]. Este nivel de demanda sísmica es considerado como un terremoto raro con un periodo de retorno de 475 años. Se considera como nivel de sismo de diseño (SD), debido a que el desempeño exhibido por los edificios en 2010 fue de ocupación inmediata [13]. Mientras que para el sismo máximo considerado (SMC) se tomará la deriva global del sismo de diseño multiplicada por 1,4, como lo dice el punto 3.5.2 del documento de ACHISINA [20].

## 2.6 Método N2 y Performance Point.

Para evaluar el “Performance Point” el método N2 fue aplicado sobre la estructura de forma bidireccional. Este enfoque determinístico facilita la evaluación del desempeño, a través de la superposición gráfica del espectro de capacidad (obtenido a partir de transformaciones modales) y el espectro de aceleración-desplazamiento [24]. El espectro de capacidad es previamente bi-linealizado a partir del método de compensación de Park [25]. Al determinar el “Performance Point” se conocerá la deriva global para evaluar el desempeño a nivel del SD. El método de Farfjar ha sido implementado ya que permite una aplicación racional y práctica en la evaluación del desempeño sísmico [24].



**Figura 2.** Determinación del Performance Point, Método N2.

### 3. Resultados y discusión.

#### 3.1 Comparativa de técnicas de modelación.

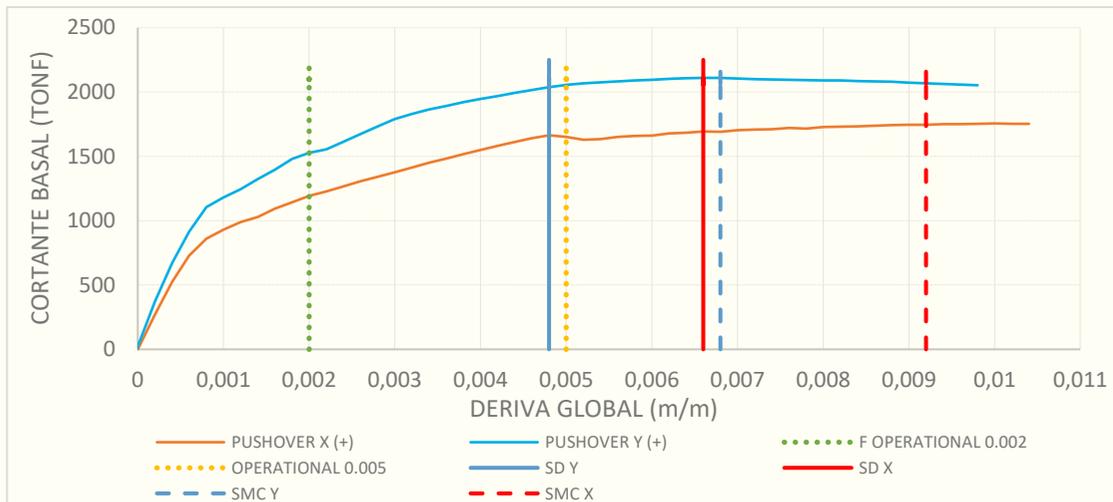
Una comparativa entre 2 técnicas de modelación expresadas en el modelo M1 y M2, ha sido llevada a cabo para estudiar el comportamiento de la curva de capacidad. La estructura fue analizada en ambas direcciones y sentidos, para ello fue necesario numerosas calibraciones en los parámetros de convergencia para la resolución de las ecuaciones no lineales y la obtención de la curva de capacidad. Principalmente se observa que la curva de capacidad del modelo M1 sobrestima la capacidad resistente en comparación de la curva de capacidad del modelo M2. Comienza a ser prácticamente imposible, para el modelo M2 de fibra distribuida, obtener la totalidad de la curva con degradación de resistencia. Precisamente cuando el modelo M2 pierde la convergencia numérica simultáneamente se alcanza el peak de Cortante Basal en el modelo M1 y degradando su resistencia.

#### 3.2 Análisis modal.

Del análisis modal en la dirección Y, el periodo es de 0.56(s) con un 64.89% de la masa traslacional. Para la dirección en X el periodo es de 0.65 (s) con un 64.40% de la masa traslacional. 50 modos fueron necesarios para mover el 95% de la masa participativa.

#### 3.3 Análisis de la curva de capacidad.

Luego de aplicar el método N2 y obtener las demandas de diseño, estas se representarán gráficamente en la curva de capacidad (Fig. 3). Las demandas de diseño se representan gráficamente mediante líneas continuas en color azul y rojo en los ejes Y e X, respectivamente. En cuanto a las líneas punteadas, estas reflejarán las demandas para el SMC, siendo en azul para el eje X y en rojo para el eje Y.

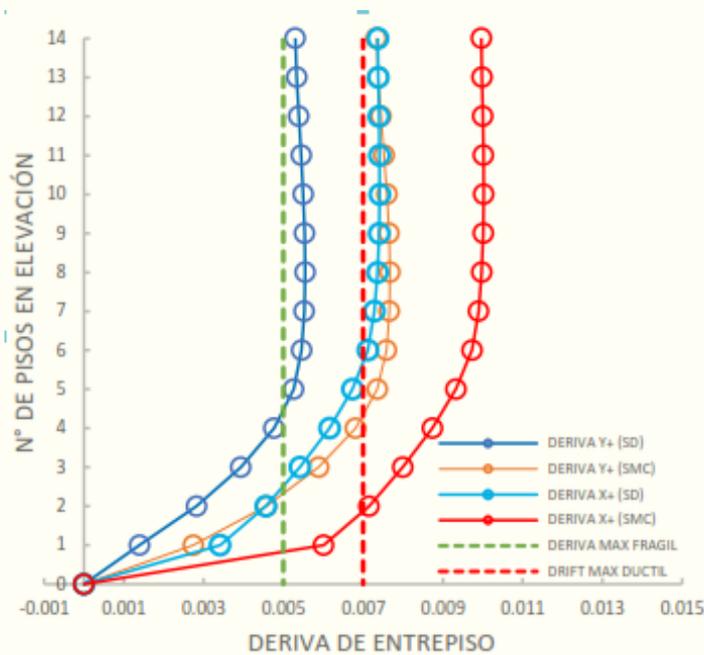


**Fig. 3.** Análisis de la curva de capacidad en X (+) e Y (+).

Para la demanda de diseño, se registra una deriva global en el eje X de 6.6% y de 4.8% en el eje Y. Mientras que para el SMC en X de 9.2% y 6.8%. Para estos niveles de deformaciones se llevará a cabo el análisis a nivel local (deformaciones unitarias) y global (Drift entrepisos). Se observa para Drift cercanos al 5% el desempeño es de ocupación inmediata y para Drift del 2% el desempeño es perfectamente operacional, con algunos elementos en fluencia, es decir, el comportamiento es prácticamente lineal. A través de caracterizaciones previas de edificios chilenos y el estudio dado la realidad sísmica, el desempeño exhibido es congruente con la investigación de “Seismic Performance of High rise concrete buildings in Chile” [13], donde los edificios con índice de rigidez ( $H_o/T$ ) entre 40 y 70 (m/s) y Drift menores al 5% tuvieron una respuesta de ocupación inmediata para el terremoto del Maule del 2010.

### 3.4 Nivel de desempeño a nivel global.

Para evaluar el desempeño global estudiaremos los Drift de entrepisos. Es necesario en primera instancia la modelación de un nodo de control en el centro de masa de cada nivel, conectado al muro más cercano mediante un cacho rígido. Esta técnica permite evaluar los Drift para cada factor de carga. La línea verde y roja respectivamente representa Drift del 5% y 7%, que son los máximo valores para edificios con elementos no estructurales frágiles y dúctiles, respectivamente.

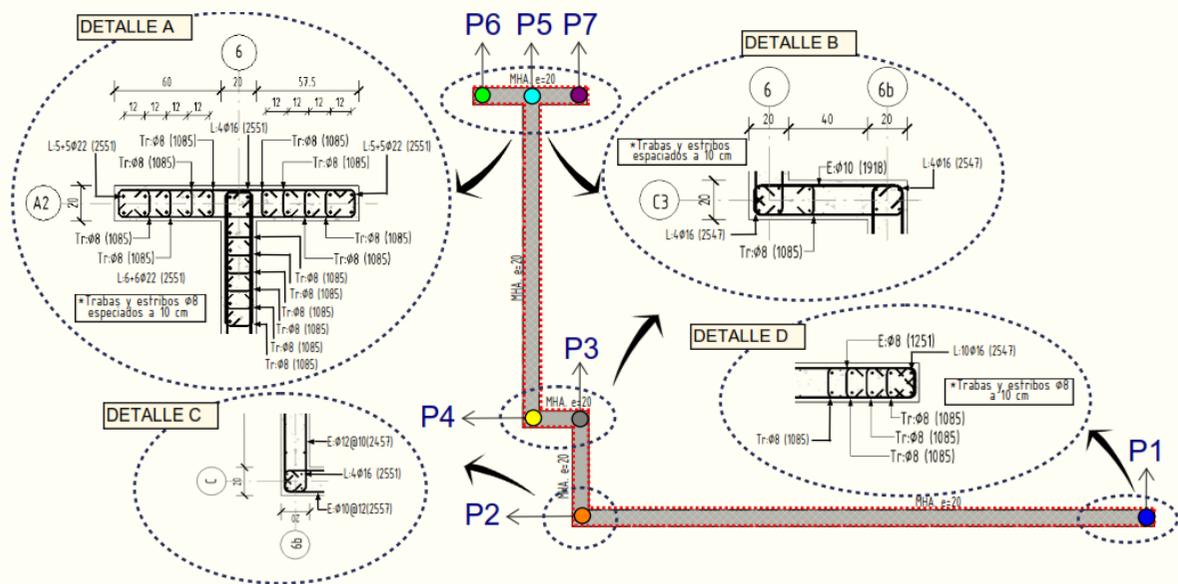


**Figura 4.** Derivas de entrepiso para SD y SMC.

Se observa que, para el SD en el eje Y (Dirección Rígida), se presentan Drift menores al 7‰ y ligeramente más altos que un 5‰, alcanzando los valores máximos en el piso 6 y 8. Mientras tanto, para la demanda MCE, los Drift exceden los valores del 7‰. En la dirección X (Dirección menos rígida), para el SD, los Drift exceden el límite de 7‰ para el estado de ocupación inmediata, concentrando los valores máximos en el 9no y 12avo piso. Los Drift muestran un comportamiento inelástico con valores máximos en los pisos superiores, mientras que los Drift máximos elásticos ocurren a mediana altura.

### 3.5 Nivel de desempeño a nivel de componentes.

El análisis por deformaciones unitarias considera la redistribución de tensiones a medida que los elementos sufren daños. Este análisis pretende establecer conservadoramente la capacidad de deformación y resistencia para elevadas demandas sísmicas. Se presenta a continuación un sistema de muro estudiado en el cual se han medido las deformaciones unitarias en elevación en ciertos puntos específicos de la sección transversal.

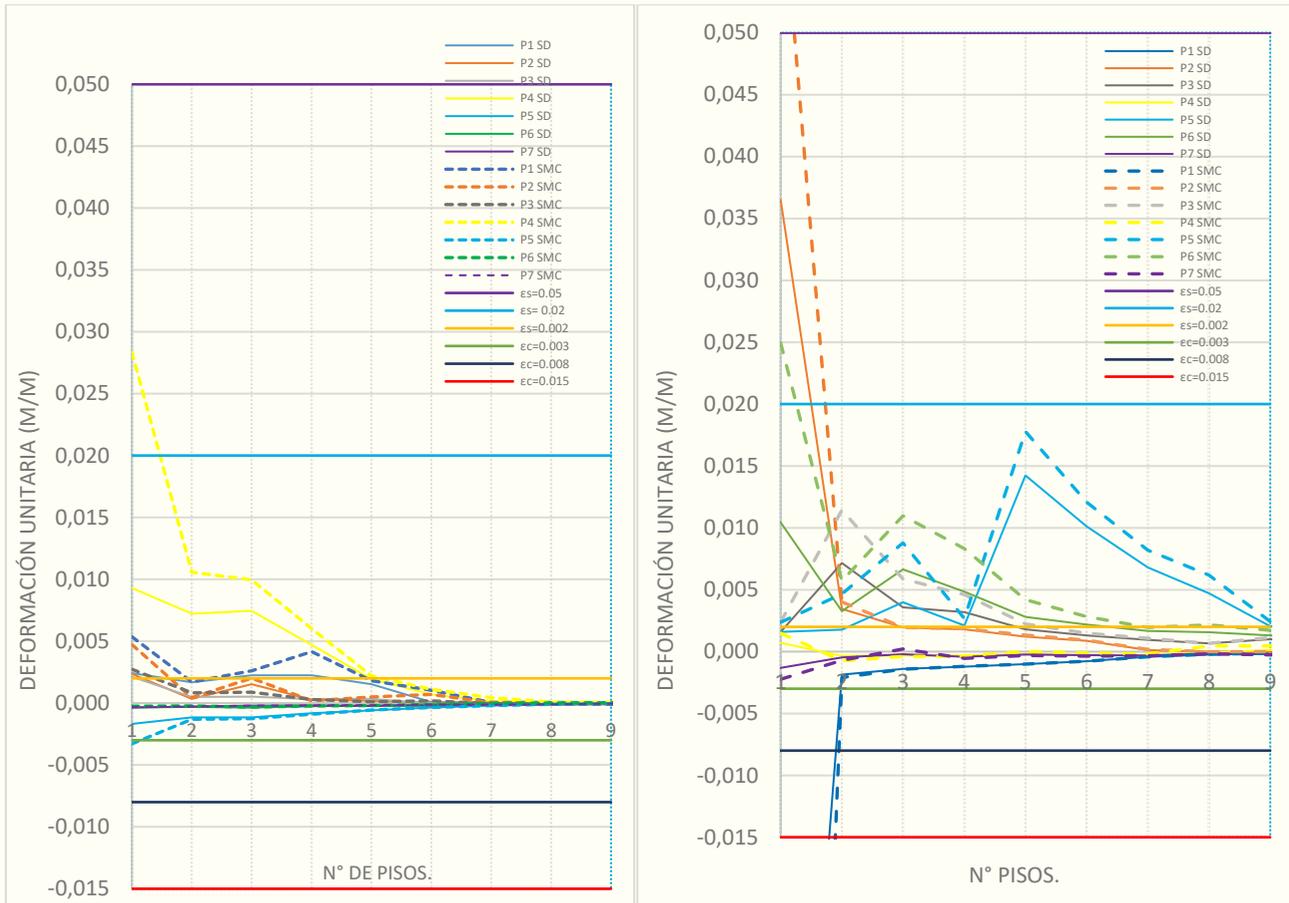


**Figura 5.** Muro con comportamiento desfavorable en X.

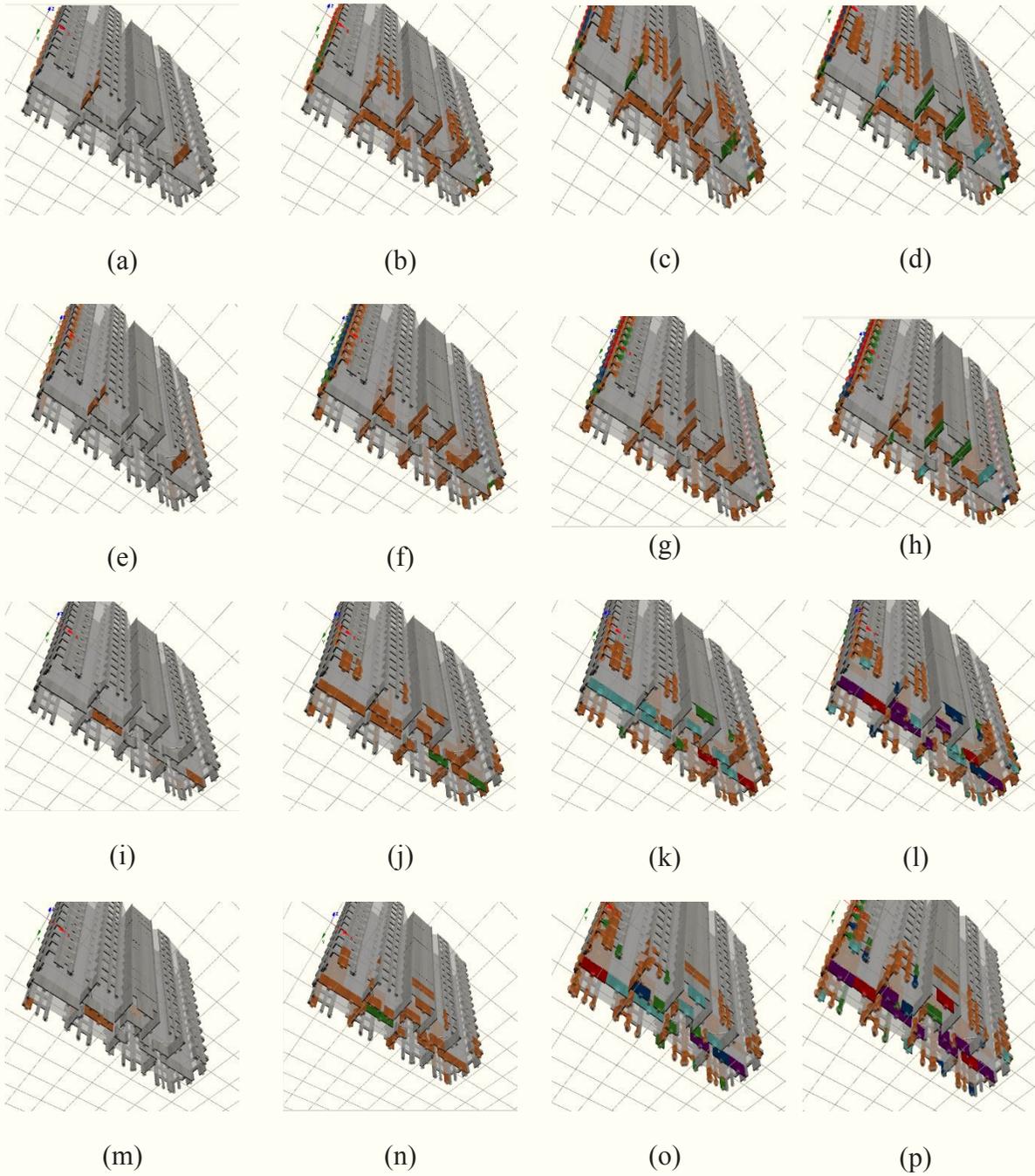
Este muro ha sido seleccionado pues es el primer elemento estructural que inicia la fluencia en Dirección X, correspondiente al muro más largo en aquella dirección. Se verifica que la dirección Y el muro cumple perfectamente los criterios de desempeño (limitación de deformaciones unitarias) para ambos niveles de demandas sísmicas. En otro escenario, en la dirección X+, dada la demanda sísmica de diseño, la deformación unitaria en la cabeza de confinamiento en el Punto de Fibra P1, ubicada en el primer piso, supera el 1.5%. Por tanto, es necesario estudiar esta sección que se considera la más desfavorable en el diseño estructural. Podría ser necesario aumentar el espesor de los muros para incrementar el nivel de confinamiento en la sección y así alcanzar un mejor desempeño sísmico. Además, se realiza un análisis a la sección utilizando SAP2000 para determinar la capacidad de deformación, como lo dicta la práctica convencional. Aplicando el diseño basado en desplazamiento la demanda de Drift

Global alcanza un 8.2‰ en +X. Esto no es consistente con lo reportado en el análisis no lineal pues la punta P1 del muro alcanza el  $\epsilon_c=0.008$  para un 5.2‰ del Drift Global, es decir, el comportamiento no lineal acoplado infiere menor capacidad de deformación.

En la Figura 6, las líneas continuas ilustran las deformaciones unitarias a nivel SD, mientras que las líneas punteadas indican las deformaciones unitarias correspondientes al SMC. Mientras que, las líneas horizontales representan los valores de los estados límites (criterios de aceptación) definidos en el documento de ACHISINA. Para efectos de mejor visualización de las gráficas, se ha considerado la medición hasta el 9no piso, pues las deformaciones unitarias no representan daños significativos en pisos superiores.



**Figura 6.** Deformaciones unitarias en elevación y comparación con estados límites para Y (+) y X (+) para muro con asimetría desfavorable en X.



**Figura 7.** Activaciones cromáticas de las secciones para distintos niveles de deriva global. La gama de colores presentadas en los modelos es congruente con los colores de las gráficas de estados límites. **(a)** 0.002 in Y+, **(b)** 0.005 in Y+, **(c)** 0.006 in Y+, **(d)** 0.0068 in Y+, **(e)** 0.002 in Y-, **(f)** 0.005 in Y-, **(g)** 0.006 in Y-, **(h)** 0.0068 in Y-, **(i)** 0.002 in X+, **(j)** 0.005 in X+, **(k)** 0.0066 in X+, **(l)** 0.0092 in X+, **(m)** 0.002 in X-, **(n)** 0.005 in X-, **(o)** 0.0066 in X-, **(p)** 0.0092 in X-.

#### 4 Conclusiones.

El análisis no lineal trasciende las esferas ingenieriles, brindando un camino para alcanzar la resiliencia estructural y limitar los daños. El modelo físico no lineal desarrollado en SeismoStructure que permite una activación cromática de las secciones en respuesta al cumplimiento de estados límites de falla en los materiales, ofrece una manera efectiva y visualmente comprensible de identificar y resaltar zonas críticas afectas a daños. La aplicación del análisis no lineal podría conducir en una disminución sustancial de los costos asociados a daños y las tareas de restauración en la rehabilitación sísmica, considerando los daños como una variable de diseño.

En la dirección asimétrica con respecto a X se exhibe una falla por flexión controlada por la compresión, mientras que en la dirección simétrica con respecto a Y, la flexión se ve influenciada por la tracción, aumentando la capacidad de deformaciones en el techo, en contraposición a lo observado en X. Cuando la flexión es controlada por la tracción, proporcionamos un mayor nivel de seguridad de la vida. El estudio de la progresión de estados límites a nivel global permite entender el comportamiento sísmico en la degradación de rigidez, resistencia y ductilidad. Debido a los múltiples ajustes requeridos en los parámetros de convergencia para lograr la estabilización de las ecuaciones no lineales, se vuelve una tarea prácticamente inalcanzable para el modelo de fibra distribuida obtener la curva de capacidad con una degradación completa de la resistencia una vez que se ha alcanzado el peak máximo de cortante basal, a niveles de deriva global que rondan el 1%.

Considerando el análisis global de deformaciones en la dirección Y, el nivel de demanda de diseño lleva la estructura a un nivel de operación inmediata con Drift de techos menor al 5%, consistente con el comportamiento global exhibido por los edificios de hormigón armado para el terremoto de Maule del 2010. Los desplazamientos de diseño disminuyen conforme aumenta la

rigidez; en otras palabras, la rigidez constituye ser un factor principal para restringir los daños estructurales y lograr el nivel de ocupación inmediata para el SD, tal como ha sido demostrado por los edificios típicos chilenos de muros de hormigón armado. Además, las derivas inelásticas obtenidas del análisis no lineal al no estar controladas por factores de reducción ni de rigidez, permite establecer una limitación de daño de elementos no estructurales a elevados niveles de deformación.

Considerando el análisis local de las deformaciones unitarias, para la demanda sísmica de diseño determinada por el punto de desempeño (basado en el terremoto 8.8Mw del Maule del 2010), es posible establecer que en la dirección desfavorable (X), el edificio exhibe un nivel de desempeño de seguridad de la vida, aunque existen ciertos niveles de daños que son congruentes con la definición de demanda sísmica definida en la Nch433 (seguridad de la vida). Por otro lado, en la dirección Y, las deformaciones unitarias no superan los límites establecidos en el documento de ACHISINA para los criterios de aceptación de ocupación inmediata. Es fundamental mencionar, que los estados de daños analizados no son representativos para sismos de naturaleza frecuente.

Basándonos en el estudio de la progresión del daño en la estructura una vez que se han alcanzado los estados límites, se ha observado que el elemento estructural que inicia la fluencia en primer lugar es el muro más largo en cada dirección, seguido por la prematura fluencia de las vigas. A elevados niveles de deformación se comprometen en gran medida. Es importante que los diseñadores estructurales siempre diseñen de forma rigurosa el confinamiento en las cabezas a compresión, más allá de los límites mínimos normativos. Puesto que, en el análisis no lineal, los muros con asimetría complejas acoplados por un diafragma rígido presentan menor capacidad de deformación que lo reportado para el análisis convencional de diseño basado en desplazamiento establecidos en

el D.S. 61 que considera al muro con un comportamiento en cantiléver desacoplado.

Es importante enfatizar que el análisis no lineal tiempo historia, es la herramienta más precisa para determinar el desempeño sísmico de un edificio, pero presenta importantes limitaciones debido al extenso tiempo de procesamiento y post-procesamiento, siendo poco práctico para proyectos convencionales de diseño sismorresistentes. Por tanto, esta investigación presenta al análisis no lineal con empuje incremental como una alternativa con tiempos razonables de procesamiento de 45 a 30 minutos evaluando la capacidad de la estructura a elevados niveles de demanda sísmica y permitiendo verificar un adecuado diseño estructural con los métodos convencionales. Así garantizamos mayor seguridad sísmica en el diseño para edificios de cualquier altura, alejándonos de un panorama imprevisto de colapso.

## 5 Referencias.

[1] DeMets, C.; Gordon, R.G.; Argus, D.F.; Stein, S. Current plate motions. *Geophys. J. Int* 1990, 101, pp 425-478.

[2] Ruiz, S.; Saragoni, R. Attenuation formulas for the Chilean subduction considering the two mechanisms of seismogenesis and ground effects. In *Proceedings of the Chilean Congress of Seismology and Earthquake Engineering*, Concepción, Chile, 16 -19 November, 2005.

[3] Lagos, R.; Lafontaine, M.; Bonelli, P.; Boroschek, R.; Guendelman, T.; Massone, L.; Saragoni, R.; Rojas, F.; Yañez, F. The quest for resilience: The Chilean practice of seismic design for reinforced concrete buildings. *Earthquake Spectra* 2021,37, no.1, pp. 26–45.

[4] Tellen, K.; Maffei, J.; Willford, M.; Aviram, A.; Huang, Y.; Kelly, D.; Bonelli, P. Lessons for concrete wall design from the 2010 Maule Chile earthquake. In *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons*

Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, 1-4 March, 2012.

[5] Massone, L.; Bonelli, P.; Lagos, R.; Lüders, C.; Mohle, J.; Wallace, J.W. Seismic design and construction practices for RC structural wall buildings. *Earthquake Spectra* 2012, vol. 28, pp. S1-S11.

[6] Suquillo, B.; Rojas, F.; Massone, L. Study of the seismic performance of a RC building with damage during the Mw 8,8 earthquake in 2010. In *Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering*, Thessaloniki, Greece, 18th - 19th June 2018.

[7] Carvallo, J.; Alcaíno, P. Behavior of reinforced concrete buildings in Viña del Mar. Lessons of February 27th 2010 Earthquake. In *Proceedings of the 15TH World Conference on Earthquake Engineering 2012*, Lisboa, Portugal, 24th to 28th September 2012.

[8] MINVU. D.S.60, reglamento que fija los requisitos de diseño y cálculo para el hormigón armado y deroga el decreto supremo N°188 de 2010; Santiago, Chile, 2011.

[9] D. S. 61 MINVU, reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga el decreto 117; Santiago, Chile, 2011.

[10] MINVU. Norma Chilena Nch433, Diseño sísmico de edificios; Santiago, Chile, 1996.

[11] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures; Reston, Virginia, United States, 2010.

[12] Vielma, J.C., Barbat, A. H., Oller, S. Factores de reducción de respuesta. Estado del arte y estudio comparativo entre códigos. *International Journal of Structural Engineering* 2006, vol.11, pp. 77-106.

[13] Lagos, R.; Kupfer, M.; Lindenberg, J.; Bonelli, P.; Saragoni, P.; Guendelman, T., Massone, L., Boroschek, R., Yañez, F. Seismic

Performance of High-rise Concrete Buildings in Chile. *International Journal of High-Rise Buildings* 2012, 1, pp. 181-194.

[14] Bertero, V. Lessons learned from recent catastrophic earthquakes and associated research. In *Proceedings of the first international conference Torroja, Madrid, Spain, July 1989*.

[15] Plaza, R.; Massone, L. Modelación no-lineal, bidimensional y tridimensional de un edificio de hormigón armado. Report of the degree of civil engineer, University of Chile, Santiago, 2017

[16] Montoya-Coronado, L.A.; Biondini, F.; Titi, A.; Bairán, J.M. Efecto de los modos altos de vibración en la respuesta sísmica no lineal de edificios de concreto. In *Proceedings of the 2nd Nicaraguan Congress of Earthquake Engineering, Managua, Nicaragua, 16th to 17th November, 2017*.

[17] Massone, L.; Bass, E. Dynamic shear amplification of reinforced concrete coupled walls. *Engineering Structures* 2020, vol.220, 110867.

[18] SEAOC Vision Committee. *Performance Based Seismic Engineering of buildings*; Sacramento, California, United States, 2008

[19] Lafontaine, M. Diseño Basado en Desempeño de edificios. Seminario online Proyecto de actualización Nch433, ACHISINA., 2020.

[20] ACHISINA. Diseño sísmico Basado en Desempeño - Un procedimiento alternativo para el análisis diseño sísmico de edificios; Santiago, Chile, 2017.

[21] Huang, C. L.; Li, Y. F.; Lin, C. T.; Hsu, T. H. Analytical and pushover analysis for predicting nonlinear force-displacement relationships of slender RC walls. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 2011, 34, pp. 415–428.

[22] Menegotto, M.; Pinto, PE. Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending. In *Proceedings of the Symposium on the resistance and ultimate deformability of structures acted on by well-defined repeated loads, international association for bridge and structural engineering. Zurich, Switzerland, 1973*.

[23] Farjfar, P.; Gaspersic, P. The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. *Earthquake engineering and structural dynamics* 1996, 25, pp. 31-36.

[24] Dautaj, A.; Sadiku, H.; Kabishi, N. Method N2- According to Farjfar. *International journal of Civil and Structural Engineering – IJCSE* 2015, 2, pp. 363-369.

[25] Park, R. Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. In *proceedings of Ninth World Conference Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 2-9 August 1988*

# INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

---

## Empresas Socias

AGUAS ANDINAS S.A.

ALSTOM CHILE S.A.

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

COLBÚN S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

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.

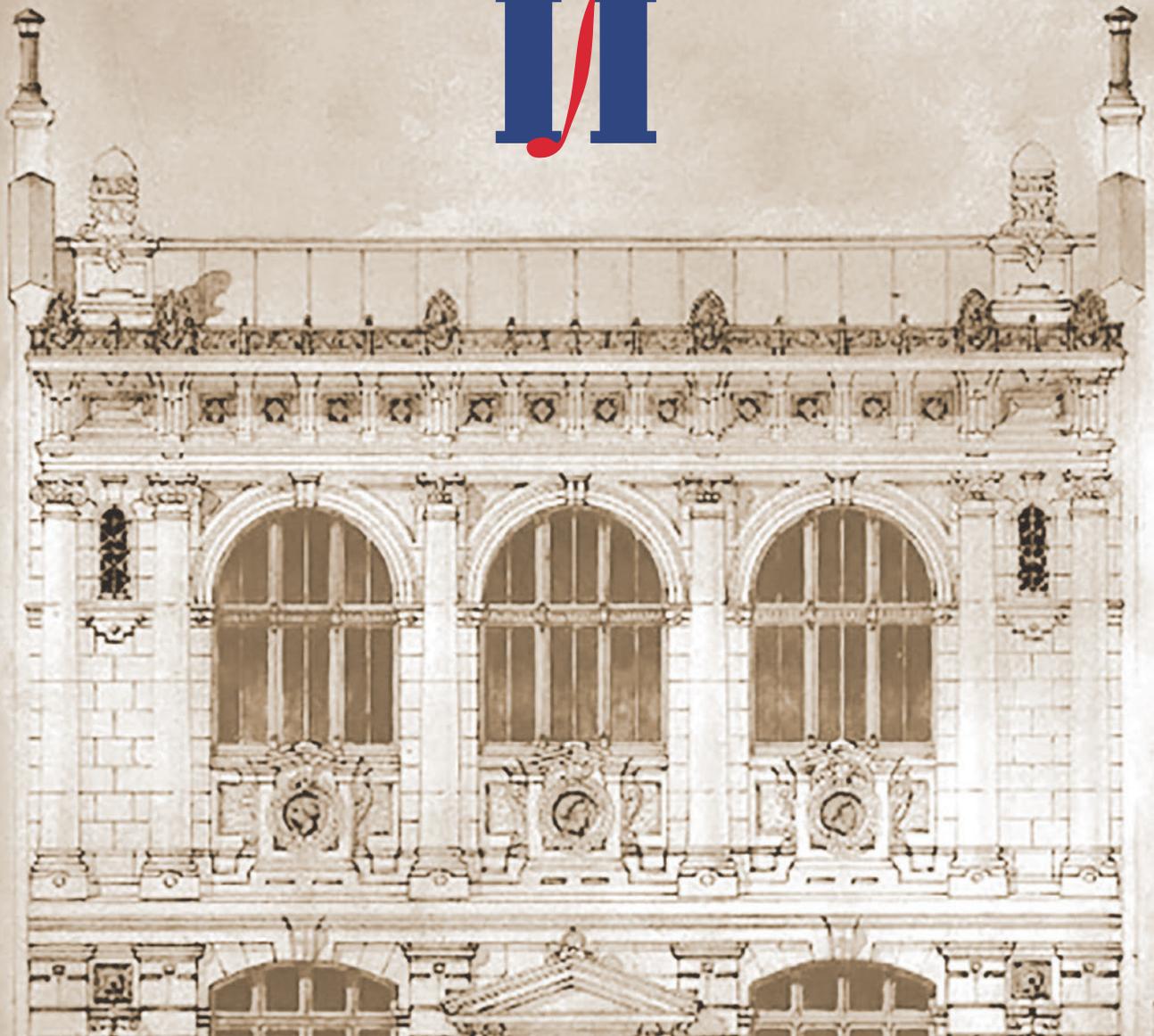
IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX CONSULTORES LTDA.

ZAÑARTU INGENIEROS CONSULTORES LTDA.



**Nuestros canales digitales:**

Sitio web: [www.iing.cl](http://www.iing.cl)

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

E-mail: [iing@iing.cl](mailto:iing@iing.cl) · [institutodeingenieros@gmail.com](mailto:institutodeingenieros@gmail.com)

**Nuestros teléfonos:**

(+56) 22696 8647 · (+56) 93736 0656