

Revista Chilena de

INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 - N° 493 - Agosto 2021



Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 133, N° 2 - ISSN 0716 - 2340

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

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

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

Ricardo Nicolau del Roure G.

Primer Vicepresidente

Luis Nario Matus

Segundo Vicepresidente

Carlos Mercado Herreros

Tesorera

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Protesorero

Jorge Pedrals Guerrero

Secretaria

Ximena Vargas Mesa

Prosecretario

Germán Millán Valdés

DIRECTORIO 2021

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Fernando Bravo Fuenzalida

Juan Carlos Barros Monge

Juan E. Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Álvaro Fischer Abeliuk

Rodrigo Gómez Álvarez

Mauro Grossi Pasche

Cristian Hermansen Rebolledo

Mario Letelier Sotomayor

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Valdés

Marcela Munizaga Muñoz

Juan Music Tomicic

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

Daniela Pollak Aguiló

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

René Vásquez Canales

Scarlett Vásquez Paulus

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADÉMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA
DE SISMOLOGÍA E INGENIERÍA
ANTISÍSMICA, **ACHISINA**.

Presidente: Rodolfo Saragoni H.

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

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

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

Presidente: Scarlett Vásquez P.

SOCIEDAD CHILENA
DE GEOTECNIA, **SOCHIGE**.

Presidente: Gonzalo Montalva A.

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

Presidenta: Carolina Palma A.

PMI SANTIAGO CHILE CHAPTER.

Presidente: Alfonso Barraza San M.

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

Presidente: Raúl Benavente G.

COMISIONES DEL INSTITUTO

**INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Y EL BIG DATA.**

Presidente: Juan Carlos Barros M.

**INGENIEROS EN LA HISTORIA
PRESENTE.**

Presidente: Ricardo Nanjarí R.

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

Presidente: Ricardo Nicolau del Roure G.

PROSPECTIVAS DE LA INGENIERÍA.

Presidente: Jorge Yutronic F.

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

Presidente: Jorge Pedrals G.

CONSEJO CONSULTIVO

Raquel Alfaro Fernandois

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Jorge Cauas Lama

Joaquín Cordua Sommer

Alex Chechilnitzky Zwicky

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Agustín León Tapia

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Pérez

Guillermo Noguera Larraín

Luis Pinilla Bañados

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazin Arellano

Raúl Uribe Sawada

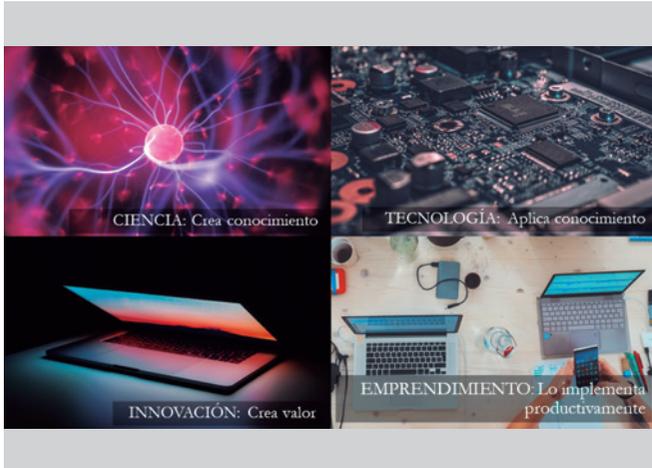
Luis Valenzuela Palomo

Solano Vega Vischi

Hans Weber Münnich

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



Nuestra portada

Cuatro Pilares: Ciencia, Tecnología, Innovación y Emprendimiento, son claves para que esta Sociedad del Conocimiento tome la sofisticación y el desarrollo que se observa hoy en el siglo XXI.

REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 493, agosto de 2021

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

DIRECTOR

Raúl Uribe S.

CONSEJO EDITORIAL

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

REPRESENTANTE LEGAL

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

SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

EDITORIAL

Pág. 2

UN RELATO PARA CHILE: PLENA INCORPORACIÓN A LA SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO

Pág. 3

Conferencia del. Sr. Álvaro Fischer Abeliuk.

LA FALLA SAN RAMÓN Y EL DESAFÍO DE LAS FALLAS ACTIVAS PARA LA INGENIERÍA

Pág. 20

Conferencia de los Sres. Gabriel Easton y
Rodolfo Saragoni.

EL DESARROLLO SOSTENIBLE Y LA PRESIÓN DE LOS *STAKEHOLDERS*

Pág. 52

Conferencia del Sr. Luis Valenzuela Palomo.

ENTREVISTA

A INGENIEROS DESTACADOS

Pág. 79

- Sr. Sergio Bitar C.
- Sr. Patricio Meller B.

Comisión de Ingenieros en la Historia Presente
Presidente: Ricardo Nanjarí R.

En el mes de marzo del presente año, el Ing. Álvaro Fischer, Presidente del Consejo Nacional de Ciencias, Tecnologías, Conocimiento e Innovación, Premio Medalla de Oro 2020 de este Instituto, dictó una conferencia denominada **Relato para Chile: Plena Incorporación a la Sociedad del Conocimiento**. Señaló el Ing. Fischer que llegamos tarde a la Revolución Industrial y que si bien participamos de alguna manera de ella, nunca logramos sacarle provecho real. Este escenario se podría repetir ahora, con la Revolución Digital, que nos conduciría a la Sociedad del Conocimiento; ello redundaría en que el país tendría serios obstáculos para alcanzar el desarrollo. Para mantener, y extender hacia el futuro, el liderazgo regional de los últimos decenios, Chile debe superar estos obstáculos. Fischer plantea la siguiente pregunta: ¿queremos ser espectadores o protagonistas?, para concluir que, si tomamos la opción de ser protagonistas, debemos apoyarnos en los cuatro pilares que permiten la acumulación de conocimiento: Ciencia, Tecnología, Innovación y Emprendimiento.

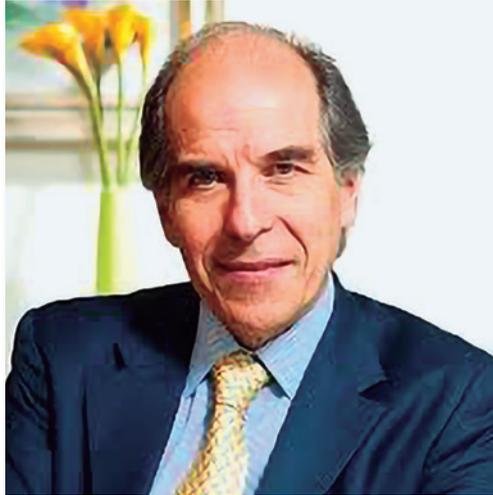
En el mes de abril, los señores Gabriel Easton, Geólogo, Magíster en Ciencias y Doctor en Oceanografía, junto con Rodolfo Saragoni PhD, Premio Medalla de Oro del Instituto y Premio Nacional del Colegio de Ingenieros de Chile, dictaron la conferencia **La Falla San Ramón y el Desafío de las Fallas Activas para la Ingeniería**. Debido al detallado contenido técnico de estas dos conferencias, en este editorial rescataremos los principales conceptos expuestos por los conferencistas. El señor Saragoni se refirió a la Neotectónica, disciplina que establece un vínculo actualizado entre la Geología y la Ingeniería Sísmica, para lo cual, con apoyo de los registros fotográficos del profesor Gilbert, de la Universidad de California, Berkeley, realizó una muy detallada descripción de los efectos de terremotos en los países más sísmicos del planeta, incluidos los registrados en Chile y en Argentina. Con estos antecedentes, el señor Easton abordó el nuevo conocimiento y el desafío que representa la Falla San Ramón, como también las fallas activas en general para la ingeniería en nuestro país. Señaló que esta falla representa la posibilidad de un terremoto al lado de Santiago, que implica una eventual dislocación del suelo en el piedemonte de la ciudad, lo que otorga una peligrosidad mucho mayor al fenómeno.

En el mes de mayo, don Luis Valenzuela, Ingeniero Civil, Master of Science en Mecánica de Suelos, Medalla de Oro del Instituto de Ingenieros de Chile y Consultor en Geotecnia y Presas de Relaves, dictó la conferencia titulada **El Desarrollo Sostenible y la Presión de los Stakeholders**. El Ing. Valenzuela comenzó su disertación explicando el concepto de *stakeholder*, utilizando la definición dada por Edward Freeman en 1984, que se singulariza a cualquier grupo o individuo que es afectado por, o puede afectar, el logro de los objetivos de una organización. En esta ocasión se refirió específicamente al caso de empresas, mostrando su evolución a través del tiempo. El desarrollo de la empresa industrial a fines del siglo XVIII, y durante todo el siglo XIX, se dio en un contexto extremadamente complejo, en que existían movimientos filosóficos, políticos y económicos importantes. Ya a fines del siglo XIX se aproximaba a lo que serían los movimientos revolucionarios en Rusia, y en el siglo XX se manifiestan presiones de la sociedad, independientemente de que, en ese siglo, ocurrieron las guerras mundiales de 1914 y 1938, por las cuales se mantiene la misma inestabilidad que había en el siglo anterior, pero ya con la empresa industrial mucho más desarrollada. Tras un detallado recorrido mostrando las interacciones –positivas y negativas– entre la presión de los *stakeholders* y los relaves derivados de la industria minera en general, el señor Valenzuela concluye señalando que la empresa debe hacer especiales esfuerzos en detectar a tiempo las inquietudes del entorno y no actuar tardíamente y en forma reactiva.

En esta edición se incluyen sendas entrevistas a los destacados ingenieros señores Sergio Bitar y Patricio Meller.

UN RELATO PARA CHILE: PLENA INCORPORACIÓN A LA SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO

Conferencia del Sr. Álvaro Fischer Abeliuk, Presidente del Consejo Nacional de Ciencias, Tecnologías, Conocimiento e Innovación.



Sr. Álvaro Fischer Abeliuk.

El día jueves 25 de marzo de 2021 a las 11:00 horas, vía Zoom, se dio inicio al ciclo de conferencias del Instituto de Ingenieros de Chile. Como primera conferencia de este año, se contó con la participación del Presidente del Consejo Nacional de Ciencias, Tecnologías, Conocimiento e Innovación, don Álvaro Fischer quien, ante una gran cantidad de asistentes, expuso sobre el tema “Un Relato para Chile: Plena Incorporación a la Sociedad del Conocimiento”.

El Sr. Fischer es Ingeniero Civil Matemático de la Universidad de Chile; ha sido profesor en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y en la Escuela de Medicina de la misma casa de estudio, pero también ha tenido una trayectoria muy notable en ámbitos muy distintos de la Ingeniería, con temas sociológicos, humanísticos y ha hecho clases de evolución, razonamiento y emocionalidad en la Universidad de Chile; tiene un Magíster en Artes Liberales de la Universidad Adolfo Ibáñez. Por otra parte, en otras actividades, ha sido fundador y director de Empresas Resiter, ha sido Vicepresidente de la Clínica Las Nieves. Actualmente, director de numerosas Sociedades Anónimas y las cuales se destacan: Presidente de la Fundación Chile, Rector de la Universidad Tecnológica de Chile, Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, Miembro de la New York Academy of Science y de la Human Behavior Society; integra el Consejo de Redacción del diario El Mercurio y además ha hecho varias publicaciones en áreas distintas de la ingeniería.

Fue el editor del libro “Nuevos Paradigmas a comienzos del tercer milenio”, también autor de “La Mejor Idea Jamás Pensada” y otro libro titulado “De Naturaleza Liberal”. También ha publicado artículos en El Mercurio. Fue premio del Concurso Nacional de Proyectos junto con su socio Raúl Alcaíno y proyectos de CORFO en el año 1979; es premio al Ingeniero por Acciones Distinguidas del Instituto Ingenieros de Chile del año 2002 y premio Medalla de Oro del año 2020 de este Instituto. Actualmente es Presidente del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo.

El Presidente.

—Muy buenos días, bienvenidos a la primera conferencia mensual del año 2021 del Instituto de Ingenieros de Chile que, lamentablemente por el momento, vamos a tener que continuar teniéndolas de manera virtual o telemática.

La conferencia de hoy día, tal como está anunciado, será dictada por el ingeniero Álvaro Fischer y versa sobre la Sociedad del Conocimiento, donde Álvaro nos explica de una manera muy didáctica, muy gráfica y amena lo que debemos saber y entender cuando se habla de la Sociedad del Conocimiento.

Sr. Álvaro Fischer.

—Muchas gracias Presidente por la presentación, saludo a todos los colegas y a los socios del Instituto. Es un verdadero placer tener la oportunidad de hacer esta presentación ante ustedes, en una casa en la que me siento muy cómodo, porque ha sido parte de mi actividad durante los últimos 40 años. Lo hago con mucho gusto y con mucho interés, es un verdadero privilegio.

En el día de hoy voy a hablar de un tema que tiene que ver de manera lateral quizás con la Ingeniería, porque tiene que ver la Sociedad del Conocimiento. En ella están involucradas una serie de temas como la Ciencia, la Tecnología, la Innovación y vamos a ver qué otros más. Quiero hacerlo también vinculado con el particular momento en que se encuentra Chile y el futuro que le espera por delante y por eso es que he titulado esta presentación como “Un Relato para Chile: La plena incorporación del país a la Sociedad del Conocimiento” (Figura 1).

Durante los últimos veinte o treinta años se ha planteado al país un importante desafío que se puede resumir de la siguiente manera: Llegamos tarde a la Revolución Industrial, el país no la pudo aprovechar integralmente; ésta no es una afirmación absoluta; por supuesto que participamos de alguna manera de ella, pero nunca logramos sacarle provecho real a la Revolución Industrial. Y no podemos llegar tarde a la Sociedad del Conocimiento, o sea, sería una verdadera lástima para el país no ser capaz de incorporarse plenamente a la Sociedad del Conocimiento para alcanzar el desarrollo. Muchas personas han planteado esto, entre ellos el Presidente Piñera en la campaña para su primer gobierno; este desafío está como telón de fondo

al resto de los temas que voy a plantear a continuación. Antes de ello, quisiera poner un poco de contexto sobre la situación en la que nos encontramos actualmente en el país, que como todos sabemos es el inicio en cierto sentido de una nueva etapa (Figura 2).



Figura 1



Figura 2

Efectivamente, estamos frente al inicio de una nueva etapa, que está caracterizada básicamente por las elecciones que tenemos en un par de semanas más para elegir una convención que va a escribir una nueva Constitución, lo que marcará un rayado de cancha distinto para el país. Es un giro o un cambio de etapa que comenzará a regir probablemente el año 2022, además de las otras elecciones que están incorporadas en el calendario nacional. Pero

esta nueva etapa la podemos ver de distintas maneras: la podemos ver como un futuro incierto, gris, amenazante, con muchas dificultades por delante, o podemos buscar el ángulo o las maneras en que esta nueva etapa le presente o signifique una oportunidad renovada al país para retomar el liderazgo que ha tenido en los últimos decenios en la región, mantenerlo y extenderlo hacia el futuro, para transformarse en un país plenamente desarrollado (Figura 3).



Figura 3

La dualidad entre estas dos opciones, puestas así, de manera opuesta o contrapuesta, se puede expresar en torno a lo que han sido los últimos 30 años del país, o un poco más, 35 años (Figura 4).



Figura 4

En el plebiscito del año 1988, el país logró construir ciertos consensos. Consiguió elevarse a alturas en un avión, que tenía dos motores: uno, el de la Economía de Mercado, que se estaba construyendo, y que se fue consolidando a partir de ese minuto, y un segundo motor, que fue la Democracia, que se incorporó con plenitud a partir de marzo de 1990. Este avión provisto de dos motores anduvo los siguientes 20 años con mucha fuerza, pero los últimos 5 o 10 con más dificultades. Las razones por las cuales se logró este consenso no es del caso investigarlas o describirlas ahora, sino solamente consignar el hecho de que se produjo este consenso, y él ayudó a que este avión despegara con esa fuerza.

La Nueva Etapa, la propuesta que estoy haciendo y que deberíamos intentar empujar ahora, es que se produzca un nuevo consenso en el país a partir del 2022, es decir, cuando la nueva Constitución, redactada y eventualmente aprobada por la ciudadanía, esté en plena implementación (Figura 5).



Figura 5

Un consenso que en este caso habrá tenido que comenzar por un consenso constitucional, o sea, uno los motores sería el constitucional. Ese consenso está incentivado por la regla de los dos tercios, que es bajo la cual va a tener que actuar la Convención. El otro motor es el de la economía, pero en este caso, la Economía del Conocimiento. Es respecto de este punto donde quiero centrar mi presentación de hoy día.

Estos son los antecedentes: dónde nos encontramos, y en medio del futuro incierto al cual nos dirigimos, está la opción de tomar este consenso 2022, para que nuevamente el país utilice un avión con dos motores, como lo logró el año 88 (Figura 6).



Figura 6

Entonces comencemos con la idea de la Sociedad del Conocimiento. Lo primero que quiero decir al respecto, es qué si uno piensa en la Sociedad del Conocimiento, y si, además, no queremos que ocurra lo que nos ocurrió con la Revolución Industrial, que no la aprovechamos a plenitud, tenemos que resolver la pregunta: ¿queremos ser espectadores o protagonistas? Cuando uno es espectador no participa de los beneficios; si uno quiere jugar bien al fútbol no basta con ser espectador, se requiere entrar a la cancha a jugar partidos de fútbol. Por lo tanto, si uno quiere participar de la Sociedad del Conocimiento y recibir sus frutos tiene que ser un protagonista de ella. Esa es la invitación que estoy proponiendo. Que el país se incorpore a ella. Lo hago como Presidente del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, cuyo propósito es preparar la estrategia del país en esta materia y entregársela a la Presidencia de la República, para que la adopte en aquellos ámbitos que le parezca apropiado hacerlo (Figura 7).

Para abordar el tema de la Sociedad del Conocimiento, permítanme comenzar con esta lámina que habla de la Creación de Valor: los seres humanos tenemos un rasgo que ha sido permanente a través de la historia, que es la Creación de Valor y este gráfico así lo muestra. Pareciera

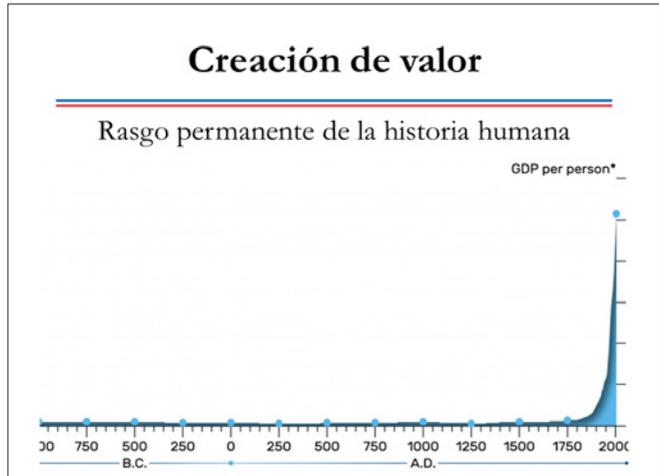


Figura 7

que no hubiese habido Creación de Valor desde que aparecieron los *Homo Sapiens* hasta hace unos 300 años. No es así, solo que en los últimos 300 años ello ocurrió de manera acelerada. Antes, ella había sido muy pequeña (Figura 8A y B).

De hecho, desde los tiempos de los cazadores-recolectores, ya sea recogiendo frutos silvestres de manera individual, o haciéndose de los de alimentos, por ejemplo, mediante la caza de mamíferos mayores, de manera colectiva, en cualquiera de estas dos modalidades, generábamos valor obteniendo riqueza de la naturaleza utilizando nuestro conocimiento, usando herramientas ideadas por nosotros. Eso lo hacíamos mediante tecnologías, en este caso tecnologías primitivas, como por ejemplo estas puntas de flechas y hachas de mano, que para hacerlas había que tener cierto conocimiento para cortar, golpear una roca con otra y desbastar estos trozos apropiadamente para conseguir los resultados buscados (Figura 9).

Desde esos tiempos hasta ahora, en que estamos en plena Sociedad del Conocimiento, eso ha ocurrido de manera permanente, como se vio en el gráfico: se ha acelerado mediante la utilización de tecnologías de la Revolución Industrial, y en la sociedad actual, con tecnologías de punta. Por ejemplo, las máquinas, hoy en día representadas por robots, por inteligencia artificial, por artilugios que son capaces de emular la inteligencia humana en algunos ámbitos, o por la modificación de la realidad, que observamos todos los días mediante la creación del medio digital de la realidad virtual o realidad aumentada (Figura 10).

Desde modelo cazador-recolector



Figura 8A y B

A la sociedad del conocimiento



Figura 9

Ello también ha producido lo que hoy se llaman *Smart Cities*, que también requieren tecnologías de punta, sustentadas por el conocimiento acumulado, sustentado en un

Tecnología de punta



Figura 10

Factores críticos

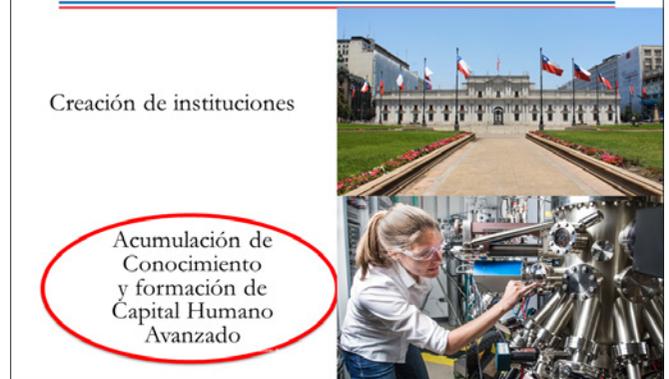


Figura 11

marco conceptual y teórico que permite conceptualizarlo, proponer hipótesis, contrastarlas con la evidencia empírica y luego aplicarlas (Figura 11).

Este proceso de Creación de Valor, a través de la acumulación de tecnología, ha sido una constante en la humanidad. Los Factores Críticos para lograrlo han sido la creación de instituciones, o sea, la capacidad de los países de darse reglas para funcionar, representadas en la lámina por el Poder Ejecutivo, y en la acumulación de conocimiento y formación de capital humano avanzado que está en condiciones de adquirirlo y aplicarlo. Es respecto de este factor donde quiero poner el acento de esta presentación (Figura 12).



Figura 12

Esta acumulación de conocimiento está fundada en cuatro pilares, que para ustedes que son Ingenieros, son cercanos a su quehacer. Por un lado, está la Ciencia, que para decirlo en simple, crea conocimiento; luego está la tecnología, que aplica ese conocimiento para el uso de las personas; a continuación, está la innovación, que crea valor a partir de los dos anteriores; finalmente, está el emprendimiento, que implementa productivamente todo lo anterior. Estos cuatro Pilares: Ciencia, Tecnología, Innovación y Emprendimiento, son claves para que esta Sociedad del Conocimiento tome la sofisticación y el desarrollo que se observa hoy día en el siglo XXI (Figura 13).



Figura 13

Para describirlo me parece útil la metáfora del arpeggio, esas cuatro notas musicales que siempre suenan armónicas entre sí, y que tocadas en conjunto forman un acorde. Aquí tenemos el arpeggio de do mayor, en las que están expresados estos cuatro pilares de manera canónica. Abajo está la ciencia de color azul, por ejemplo, la física del estado sólido, luego la tecnología, la aplicación de esa física de estado sólido para la crear chips de circuitos integrados; la Innovación, que crea valor a partir de esas dos, para producir los *Smartphones*, los teléfonos celulares que todos ocupamos; y luego, el emprendimiento, que permite producir el iPhone, el Samsung, u otros teléfonos que nos habilitan a aprovechar ese valor creado (Figura 14).



Figura 14

Lo interesante del arpeggio es que en cualquier orden que se toquen las notas suenan armónicas, y lo mismo ocurre con los 4 pilares de la Sociedad del Conocimiento. Por ejemplo, no es necesario partir desde las ciencias, podríamos partir de un emprendimiento como fue el que le propuso Kennedy en el año 1961 a su país, de llevar un ser humano a la Luna antes de que finalizara década, como efectivamente ocurrió, en julio del 1969. Ese emprendimiento forzó la creación de tecnología, o sea la capacidad de tener cohetes que fueran capaces de salir de la atmósfera. Para poder tener esa tecnología hubo que investigar en la Ciencia los combustibles sólidos, y eso dio lugar a un sinnúmero de innovaciones que fueron incorporadas al módulo lunar, que fue el que finalmente alunizó. Los cuatro pilares de la Sociedad del Conocimiento se pueden combinar en cualquier orden, u siempre pueden resultar efectivos (Figura 15).

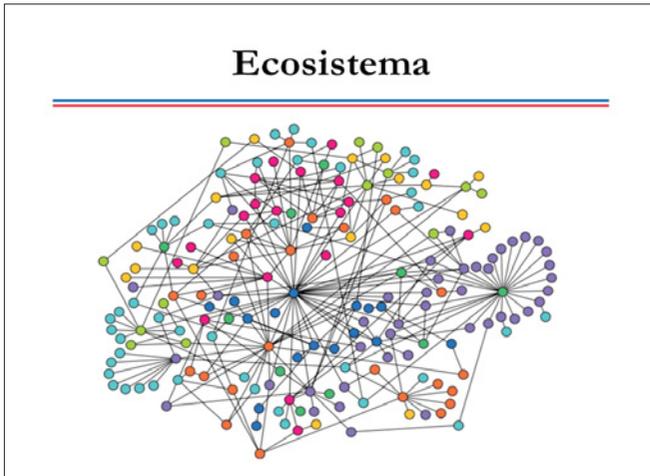


Figura 15

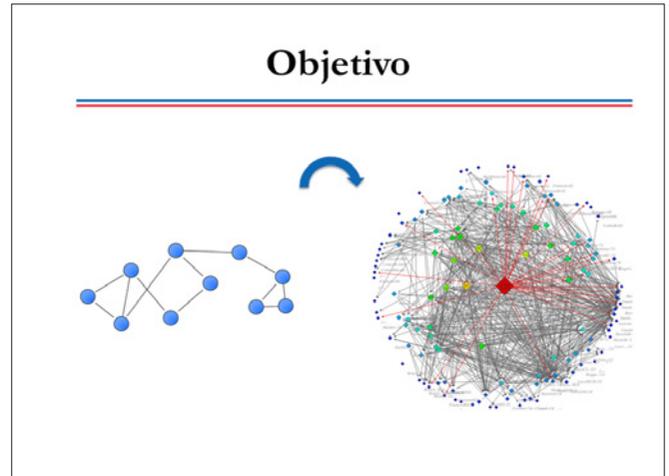


Figura 16

La forma en que los gobiernos o los países sacan provecho de estos cuatro Pilares es por medio de un ecosistema de ciencia, tecnología, innovación y emprendimiento, es decir, un conjunto de nodos, en cada uno de los cuales está uno de esos Pilares, conectados con otros, de tal manera que sea el conocimiento aquello que se transfiere de un nodo a otro. Conocimiento que en algunos casos es de carácter científico, en otros casos de carácter aplicado, en otros casos de carácter innovativo, o emprendedor, pero siempre procurando que estén bien conectados, para que todas las posibilidades de interacción se produzcan. En la medida de que haya más nodos y más conexiones, crece exponencialmente el número de posibles combinaciones entre ellos, y eso permite que se produzca una explosión de opciones desde dónde obtener más valor para la sociedad (Figura 16).

El objetivo entonces, es partir con un sistema relativamente simple, y llegar a un sistema, o a un enjambre complejo de nodos, en que haya una multitud de diversas, empresas, institutos de investigaciones, capitalistas de riesgo, ministerios, Fundaciones Chile, etcétera, que estén actuando, cada uno en su ámbito, para lograr que este ecosistema crezca, que los nodos sean de mejor calidad, que las conexiones sean más fáciles de recorrer y que la cantidad de ellas sea cada vez mayor (Figura 17).

Esto significa que el viejo dilema de si uno necesita Ciencia Aplicada o Ciencia Pura, es un falso dilema. La mayoría las personas que han estudiado estos temas, señalan que no tiene sentido, que todos deben participar en el Ecosistema para que una Sociedad del Conocimiento se dé.



Figura 17

Necesitamos tanto a los científicos por curiosidad, como a los divulgadores de la ciencia, como a los científicos aplicados, como a los innovadores, los emprendedores, etcétera, etcétera, etcétera. Esto es fundamental entenderlo. Todo tiene que estar bien articulado, y el propósito de los países es impulsarlo con la mayor fuerza posible, destinando recursos a ellos, pero también apoyando para que el sector privado se incorpore, y, en la medida en que la base científica y tecnológica del país se haga más robusta, entonces las empresas de base tecnológica serán más importantes y crecerán, demandarán mayor investigación, y el sistema entrará en un círculo virtuoso retroalimentado. Esto es lo que muestran los países que han seguido este camino con convicción y perseverancia (Figura 18).

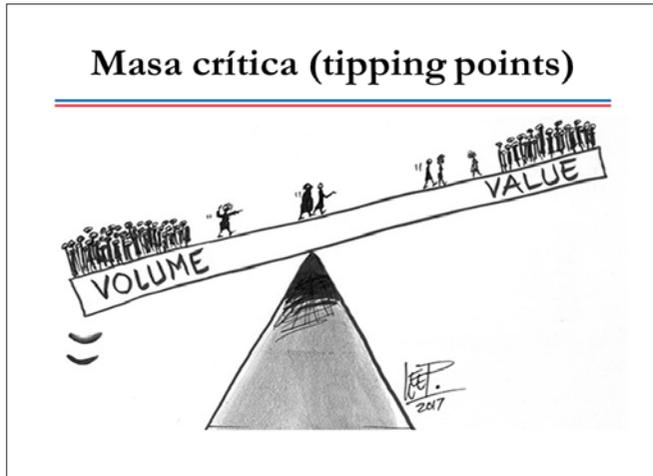


Figura 18

Por eso se necesitan masas críticas. No es posible lograr resultados con nodos aislados funcionando sin mayor conexión y sin la cantidad suficiente. Ello es necesario tanto en el sector público, por medio del esfuerzo que haga el Estado para destinar recursos, prioridades, convicciones y perseverancia para mantener dicho esfuerzo en el tiempo, como también en el sector privado, ampliando las empresas de base tecnológica, que permitan al país entrar a la parte virtuosa del ciclo. No tengo que ejemplificar mucho, la pandemia nos ha mostrado la importancia de la ciencia: en pocos días, una vez conocido el virus SARS-COV2, fue posible secuenciarlo, una proeza científica, que permitió, mediante tecnologías modernas, detectar el virus con tests PCR, y también fabricar los kits que detectan anticuerpos. En Chile, hemos tenido la posibilidad de tener vacunas, no sólo porque el gobierno anticipadamente negoció contratos con varios laboratorios, o sea, tomó un portafolio de opciones, sino también porque ya existía una relación entre la Universidad Católica y el laboratorio de SINOVAC, que permitió adquirir la confianza y los conocimientos para que esta relación prosperara, y facilitara la llegada de esas vacunas en grandes cantidades. O sea, este ecosistema no solamente es nacional, sino que tiene conexiones internacionales.

Pero para que todo esto opere, los países tienen que tener la convicción de querer implementarlo. Tienen que ponerlo en sus prioridades. Chile no ha tenido esa prioridad, y eso hay que reconocerlo. A lo largo de 20 años no se ha podido elevar el esfuerzo en estas materias por distintas razones. Siempre ha habido la excusa de la existencia de prioridades de otro tipo.

En el Consejo Nacional de Innovación creemos que, para poder lograrlo, los países tienen que estar convencidos de ello; no solamente los gobernantes, sino también la ciudadanía, porque cuando la ciudadanía cree que es posible y es necesario, entonces se lo exige a la clase política, y la clase política tiene que actuar. Este es el desafío que debemos afrontar. Pero para poder entusiasmar a la población se necesita un relato. Aquí propongo uno. Puede no ser el único, pero es un relato posible (Figura 19).



Figura 19

Este Relato dice que Chile es un país extremo –basta mirar este mapa– este globo terráqueo para darse cuenta de ello, y este país extremo, tiene a su vez en sus dos extremos atractores de Ciencia de clase mundial y Tecnología de punta que son verdaderamente únicos e irrepetibles.

En el extremo norte, tenemos los mejores cielos para la astronomía. En la imagen podemos ver a la red de telescopios Alma, y la multitud de otros telescopios que se están construyendo. Abajo a la izquierda está el *European Extremely Large Telescope* que va a ser el más grande del mundo con un espejo de 39 metros de diámetro, en fin, también está el TAO, el GMT y Paranal (Figura 20A y B).

Estos telescopios constituirán en los próximos años cerca de dos tercios o el 70% de la capacidad recolectora de datos astronómicos del mundo, lo que tiene múltiples ramificaciones tanto en materia de *software*, como en uso de fibra óptica, de procesamiento de datos, de *Big Data* (Figura 21).

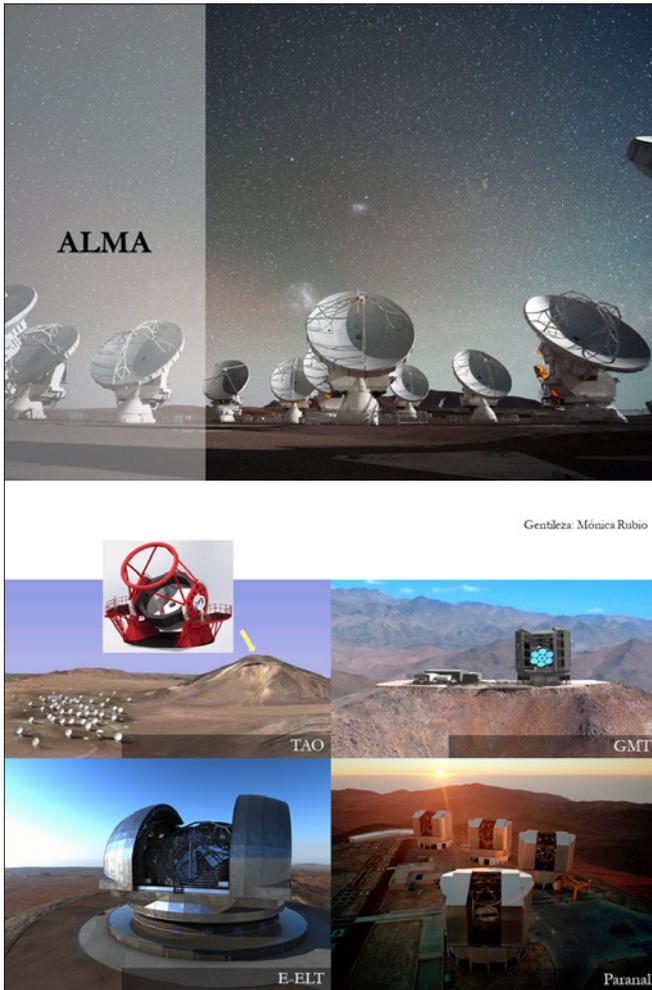


Figura 20A y B

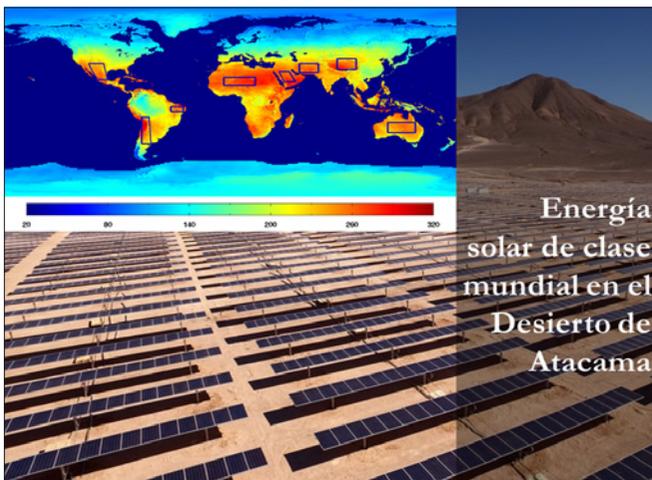


Figura 21

Además, el extremo norte tiene la energía solar de clase mundial en el desierto de Atacama, una de las fuentes de energía más importantes del mundo en el siglo XXI, lo que, además, permite producir hidrógeno verde, y nos va a dar la capacidad de producir minerales de manera ecológica, que van a tener un inmenso valor en el siglo XXI (Figura 22).



Figura 22

Además, en las planicies altas del desierto de Atacama, habitan organismos extremófilos y entender su biología, su evolución y su metabolismo es de gran interés para la ciencia. Ya el desierto de Atacama ha sido utilizado como un laboratorio para las expediciones que se hacen a Marte (Figura 23).



Figura 23

Por otro lado, el extremo norte ya tiene ganado un espacio en el imaginario turístico internacional. El turismo y la ciencia y la tecnología conversan bien: a los turistas les gusta saber que hay Ciencia instalada en los lugares que visitan, y a los científicos y tecnólogos les agrada estar trabajando en un lugar en que hay turismo desarrollado por el positivo impacto que eso tiene en su calidad de vida (Figura 24A y B).

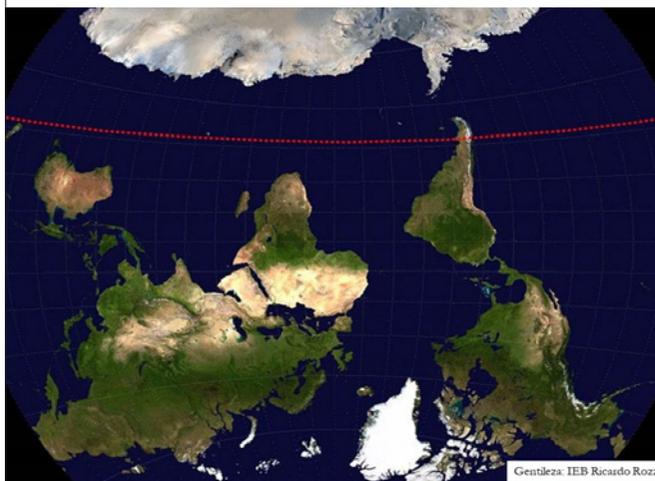


Figura 24A y B

En el extremo sur tenemos, además, los ecosistemas más australes del mundo, con una proporción de mar respecto de tierra mucho más alta que la que hay en el hemisferio norte, como ustedes observan en este mapa invertido. Por eso, estudiar el mar en esta zona es particularmente interesante; la creación y la formación del clima, de las corrientes marinas, de las temperaturas, los bosques que

existen en esta zona y todos los ecosistemas asociados, son de alto interés científico (Figura 25).



Figura 25

Además, Chile es una puerta de entrada a la Antártica. Ustedes pueden ver que la distancia desde Punta Arenas a la Antártica es de 1000 kilómetros, menos de la mitad de la que hay desde Nueva Zelanda o Australia, y menos de un tercio de la que hay desde Sudáfrica. De esa manera, Punta Arenas está llamada a ser, de manera natural, la capital científica del estudio de este continente, que, por lo demás, es uno en el cual la humanidad está haciendo un experimento inédito: es destinarlo solo al estudio científico, a la investigación científica y sin que nadie sea su dueño. Chile puede ser una condición ideal para transformarse en protagonista principal de ese experimento (Figura 26A y B).

Además, por supuesto, el turismo en esta zona es mundialmente conocido, no solamente por la belleza de sus paisajes y el glamour de fin de mundo que evoca, sino además, porque la historia de la Ciencia, la Historia de la Navegación, con Hernando de Magallanes por ejemplo, o la historia de la antropología, con la trágica historia de los cuatro pueblos nativos que la habitaban, hace que sea su territorio esté instalado en la imaginación del mundo desarrollado, y por lo tanto combina esa atracción turística con su atractivo en Ciencia y Tecnología (Figura 27).

En efecto, por ejemplo, está el desafío de entender la evolución y metabolismo de las bacterias que se encuentran a 3000 metros de profundidad bajo el hielo en la Antártica, en el Lago Vostok (Figura 28A y B).



Figura 26A y B

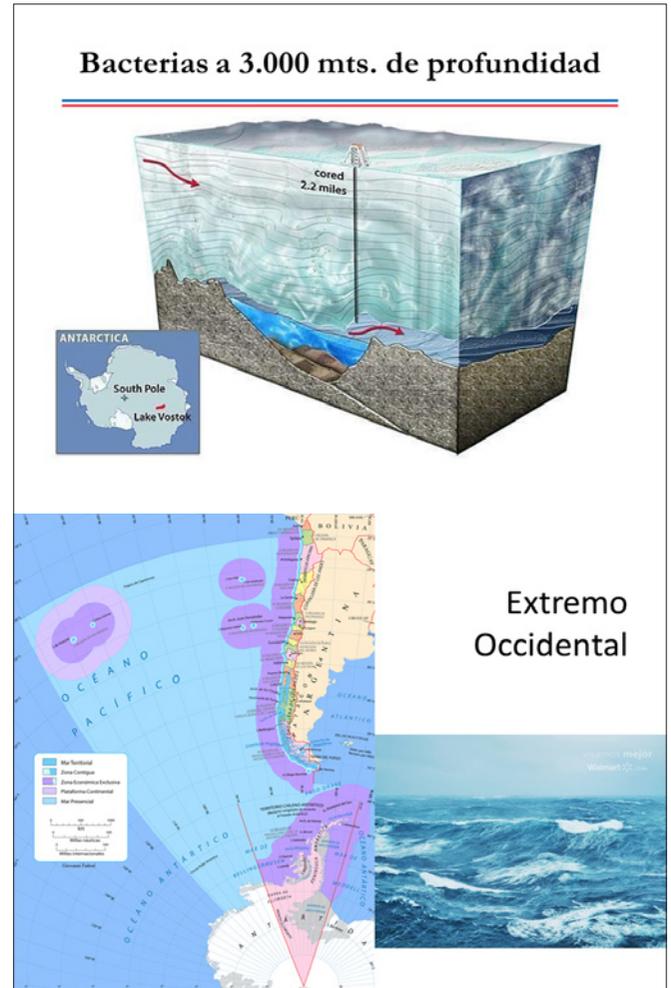


Figura 28A y B



Figura 27

No solamente eso, Chile tiene en su extremo occidental este mar que es gigantesco. Chile es uno de los países más privilegiados, por la proporción de costa por habitante, y la capacidad que eso le otorga para monitorear el océano, que es una de las zonas menos conocidas del globo y menos explorada científicamente. No solamente su superficie, sino también especialmente lo que hay bajo ella, incluido el fondo marino (Figura 29).

Ahora bien, este relato que les he hecho de Chile, es un relato abstracto, que necesita una cristalización tangible, algo que nos lo represente. Los países han utilizado a los edificios icónicos para hacerlo (Figura 30).

**Relato abstracto necesita una
cristalización tangible**



Figura 29

y su biblioteca cuando dejó el gobierno. Este es un buen ejemplo de cómo Chile está efectivamente traduciendo este relato abstracto en el esfuerzo tangible por realizarlo (Figura 32).

Centro Subantártico Cabo de Hornos



Ennead Architects NY

Figura 31

Edificios icónicos



Figura 30

Aquí tenemos el Sydney Opera House, que es símbolo de esa ciudad en Australia, o el museo Guggenheim de Bilbao, símbolo de esa ciudad también. Nosotros podemos hacer algo parecido en nuestro país (Figura 31).

Ya está en construcción, y si no hubiera sido por la pandemia ya estaría inaugurado, (para el aniversario de los 500 años del descubrimiento del estrecho de Magallanes, el pasado noviembre del 2020), este Centro Subantártico Cabo de Hornos, de los más australes del mundo, ubicado en la Isla Navarino, en Puerto Williams. Su diseño original es de la famosa oficina Ennead Architects de Nueva York, los mismos que construyeron el Rose Pavillion del Museo de Historia Natural de New York, y que fueron escogidos por Bill Clinton para que les diseñara su museo

Museo de Antropología de Iquique



Arquitectura Daniel Libeskind

Figura 32

También está este proyecto del museo Antropología de Iquique, cuya arquitectura fue proyectada por el afamado arquitecto alemán-norteamericano Daniel Libeskind (Figura 33).

Asimismo, en el norte está el proyecto del Centro de Interpretación Astronómica Chajnantor, diseñado por dos jóvenes figuras de la arquitectura nacional: Max Núñez y Matías Zegers; estaría ubicado en el parque astronómico

Atacama de la ANID, ex Conicyt, y estaría ubicado un poco más abajo de la llanura de Chajnantor, a unos 3800 metros, cerca de San Pedro Atacama (Figura 34).



Figura 33



Figura 34

En la Región de Atacama está el Parque Paleontológico, Los Dedos, en Bahía Inglesa, donde hay una riqueza paleontológica muy importante con fósiles de mamíferos de cientos de millones de años, que es de mundial, en el cual también se proyectará un Centro de Investigación muy importante abierto al público (Figura 35).

Y, finalmente, la transformación de Punta Arenas en la capital científica Mundial de la Antártica estaría representado por un edificio icónico, ubicado en la Punta Arenosa,

donde está este círculo rojo, en la salida norte de la ciudad. Su diseño ya fue adjudicado por el MOP, y sería un proyecto tanto científico, educativo y turístico, de cómo Punta Arenas y Chile pretende ser la capital Mundial de la de la investigación científica en la Antártica (Figura 36).



Figura 35



Figura 36

En resumen, nos encontramos ante un país que está buscando un nuevo consenso. Si lo hacemos bien, logrando una nueva Constitución consensuada a partir de la regla de los dos tercios, exigida para los acuerdos adoptados el 15 de noviembre de 2019; si además le agregamos la convicción de incorporar la economía del conocimiento a nuestro modelo de desarrollo, de tal manera de que el país como un todo se incorpore a la Sociedad del Conocimiento,

con fuerza, convicción y prioridad: si a eso le sumamos las capacidades ya instaladas y estas condiciones geográficas únicas e irrepetibles que el país ostenta frente a las opciones que ofrece el siglo XXI, creo que estamos en condiciones, de transformar a Chile en una Plataforma Científica, Tecnológica, Innovadora y Emprendedora para el siglo XXI, y, por esa vía, alcanzar el pleno desarrollo.

Muchas gracias.

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

Sr. Ricardo Nicolau.

—Muchas gracias Álvaro, por esta interesante y motivante charla que nos has dado y me queda muy claro que enfrentamos desafíos muy serios para poder incorporar a esta Economía del Conocimiento y ser protagonistas en este siglo XXI.

Realmente interesante y muy buena gráfica, muy llamativa y muy motivadora. Estoy viendo si hay preguntas en el Q&A, por el momento no tenemos nada, ninguna, quedaron alejados nuestros ingenieros.

Bueno, aquí Germán Millán dice: muchas gracias por tan buena e interesante charla.

Luis Nario, dice que quiere destacar la importancia del tendido de la fibra óptica entre punta Arenas y la Antártida que efectivamente es un proyecto muy, muy interesante.

Marcela Munizaga te agradece por tu presentación y pregunta: ¿por qué crees tú que la ciudadanía en general tiene poca valoración del desarrollo de la ciencia en Chile y cómo se puede cambiar eso?

Sr. Álvaro Fischer.

—Bueno, muchas gracias Marcela por la pregunta. Al comentario de Luis Nario quiero decir que efectivamente es muy interesante el esfuerzo que se ha hecho. Por ahora, entiendo que es la fibra óptica de Puerto Montt hasta Puerto Williams, pero que está la idea de seguir a la Antártica, lo que le daría mayor fuerza todavía a este

argumento de que Chile sea la puerta de entrada y además una mejor conexión con el mundo asiático, porque de ahí se llega a Australia, Nueva Zelanda y se conecta con todas las redes de fibra óptica que hay allá, una mejor alternativa que cruzar el Pacífico por la altura de Hawai. Así que efectivamente ese punto apoya muy bien un esfuerzo que ha hecho el país para poner a disposición del mundo científico tecnológico esta potencialidad.

Respecto del tema la ciencia y la tecnología, bueno, ésta es una pregunta para la que es difícil encontrar una respuesta obvia. Voy a empezar con una anécdota. Me ha tocado escuchar en programas de radio, de la mañana o en las horas de más tráfico, cuando se discutía cambios al currículum escolar, qué si habría cambios en historia o en filosofía, y cosas por el estilo. En medio de esa discusión, los periodistas o animadores de esos programas decían: “ojalá no nos toque más física, ojalá que no nos pongan más matemática”. Hay una cierta sensación en una parte la población que eso no resulta muy atractivo. Tenemos esta idea, este arquetipo de que Chile es un país de poetas, que toma cierta distancia de la Ciencia y la Tecnología, aunque quizás no tanto del mundo del Emprendimiento y la Innovación.

Creo que lo primero es reconocer la importancia que tienen en el mundo actual la Ciencia y la Tecnología –la pandemia algo ha ayudado– y la íntima relación que eso tiene con la Innovación y el Emprendimiento. Eso no va a surgir de manera espontánea, sino que se necesita una que se produzca en ambos sentidos. O sea, las autoridades, las instituciones intermedias, tienen que hacer su esfuerzo y mostrar los casos exitosos de aquellas Compañías que les va bien porque han incursionado en esos ámbitos, los casos exitosos de investigaciones nacionales, porque todo eso va produciendo un ambiente apropiado para que estos temas sean más visibles, más apreciados y para que las personas lo entiendan mejor. Pero no hay una bala de plata para lograrlo. Se requiere un esfuerzo combinado, para lo cual el relato que les acabo de hacer es una ayuda. Otro es la prioridad que le den los gobiernos a estos temas, a través de su presupuesto, a través de la prioridad que le otorgue. También, el esfuerzo que hagan las propias compañías en robustecer su capacidad tecnológica, y, por supuesto, el esfuerzo que hagamos en la educación básica, en la educación media en fortalecer la educación STEM. No es trivial lograrlo, pero creo que, de no hacerlo, nos estaríamos autocondenando a quedar rezagados y perdernos la Sociedad del Conocimiento o no aprovecharla

plenamente, tal como no aprovechamos plenamente la Revolución Industrial.

Gonzalo Montalva.

—¿Cuáles son en su opinión los mecanismos para ser plenos actores de la Sociedad del Conocimiento?

Sr. Fischer.

—Para ser un actor pleno uno tiene que tiene que participar de ello y eso requiere destinar recursos, destinar esfuerzos, tiempo, energía, prioridades. Hace unos 10 años atrás estaba en Chile el Vicepresidente de la National Science Foundation de EEUU, que era un físico connotado y me decía (y por eso es que está la lámina de los futbolistas al principio): “yo sé que a los chilenos les gusta mucho el fútbol; si los chilenos quieren ser buenos en el fútbol no basta con que vayan al estadio los fines de semana, tienen que ir y jugar al fútbol”. Para ser protagonista de la Sociedad del Conocimiento uno tiene que prepararse, invertir, instalar instituciones, darles buenas gobernanzas, es decir, hacer la pega completa. Hay que hacer investigación científica, hay que hacer investigación aplicada, hay que hacer aplicaciones tecnológicas que se transformen en innovaciones, hay que tener capitalistas de riesgo que busquen cuáles son las que se pueden financiar, hay que tener mecanismos de incentivo tributario, que son los que pone el Estado para motivar a aquellos que quieran trabajar en ello, tiene que haber programas de fomento para quién están haciendo prototipaje, tiene que haber Institutos como el que se acaba de licitar por CORFO, de tecnologías limpias para desarrollar el hidrógeno verde, o el litio, todas estas gigantescas posibilidades de generación y almacenaje energético que hay. Escuché el otro día al analista principal de recursos naturales de Goldman Sachs, hablar del impresionante futuro que podría tener el cobre a lo largo de esta década, por la gran transformación que está ocurriendo con el proceso de descarbonización y electrificación acelerada.

Ser protagonista es trabajar en todo ello. Es hacer ciencia, hacer tecnología, hacer innovación, hacer emprendimientos tecnológicos, hacer difusión, meter la mano en el barro y hacer de todo. Eso requiere tiempo, esfuerzo, recursos, pero sobre todo convicción, porque sin convicción previa uno no hace las cosas. Y luego, perseverancia, para lograr

las masas críticas, los ejemplos virtuosos, los *feedbacks* que retroalimentan la imaginación de las personas, para que el proceso tome su fuerza propia.

Sr. Tomás Guendelman.

—¿Cuál es tu opinión respecto al rol del 5G en el combate de la delincuencia y el delito informático?

Sr. Álvaro Fischer.

—Creo que el 5G con la mayor conectividad y velocidad de transmisión de datos que otorga obviamente va a tener importancia en el combate a la delincuencia; pero no solamente en el combate a la delincuencia, sino en una vastedad de otras actividades, y de manera muy importante. Pero para que esas aplicaciones operen bien, las personas tienen que utilizarlas, tienen que formar parte de sus hábitos permanentes. El proceso de digitalización en el que estamos inmersos es fundamental para lograr lo que el país está demandando —más recursos para las pensiones o mejor salud— porque la creación de valor hoy está basada y fundada en conocimiento. El 5G es un símbolo de eso, símbolo de tecnología empaquetada.

Sra. Sally Bendersky e Iván Álvarez.

—¿Cómo se desarrollarán capacidades en forma masiva para que los chilenos aprovechen esta propuesta?

¿La materialización de estas ideas requiere de un sistema educacional acorde a los desafíos? Yo creo que ya has comentado sobre esto, pero te da la oportunidad de volver a enfatizar.

Sr. Álvaro Fischer.

—Sí, creo que efectivamente para lograr materializar todo esto la educación es fundamental. Creo que tenemos que revisar la importancia que se le está dando a la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, que en inglés se dice STEM. Tenemos una cierta disposición natural a no darle la importancia que tiene, como ya comenté, y con esto no quiero decir que las artes y las humanidades u otras disciplinas no sean importantes. Yo mismo me he

interesado especialmente por la biología y las ciencias sociales. No quiero poner en contraposición una con la otra. No se trata de tener a todo el mundo dedicado a la ciencia, a la tecnología, a la matemática o a la ingeniería, no. Yo creo que la educación básica tiene que proveer las herramientas para que, quienes tienen un cierto talento o un gusto por ellas, se interesen y lo puedan desplegar con mayor facilidad. Eso requiere el uso de las tecnologías en la educación, que pueden ser muy habilitadoras para lograrlo, y que la educación de matemática y física tradicional no aleje a una parte del estudiantado antes de tiempo, que no ocurra que los que potencialmente pudieron haberse interesado no lo hicieron porque no recibieron una educación estimulante.

Por eso el esfuerzo que hay que hacer en la etapa inicial va a ser crucial. Estas cosas no ocurren de un momento a otro. Van a requerir una generación completa, sin claudicar. Es la única forma de avanzar. porque uno avanza.

Pregunta.

—*En este Chile que vivíamos antes de octubre de 2019, ¿es posible retomar esta senda post pandemia?*

Sr. Álvaro Fischer.

—Si la pregunta se refiere a retomar una senda de crecimiento y progreso general del país yo creo que sí. En cierto sentido, eso es lo que estoy proponiendo. Que hagamos un esfuerzo por dotar al país de dos motores al avión que nos conduzca al desarrollo, motores levemente distintos a los anteriores. La democracia recuperada y la economía de mercado que se estaba instalando fueron los impulsores del año 90 en adelante. Ahora, hay que impulsar estos nuevos dos motores que son un acuerdo Constitucional y la Economía del Conocimiento. Debemos volver a construir un consenso, porque el anterior se nos fue resquebrajando, como si les hubiéramos practicado un *fracking*, ese método con el que se extrae el petróleo o el gas desde las rocas.

Ahora tenemos la oportunidad de reconstruir nuevos consensos, y lo que yo planteo es que, si esos consensos los hacemos en torno a una nueva Constitución y la Economía del Conocimiento como modelo para alcanzar el desarrollo,

tendremos la posibilidad de retomar la senda de progreso en la que vivíamos antes de octubre de 2019.

Sr. Christian Rasmussen.

—*¿Qué relación debe existir entre la Sociedad del Conocimiento y la sociedad en general?*

Sr. Álvaro Fischer.

—La Sociedad del Conocimiento es un término muy genérico, que intenta decir que casi todas las cosas que están a nuestro alrededor, tanto los bienes y servicios que intercambiamos, como la forma en que nos comunicamos o nos movilizamos, o las manifestaciones artísticas, culturales o de entretenimiento en las que participamos, todas ellas están sustentadas en conocimiento de distinto tipo, para algunos La Sociedad del Conocimiento es la constatación de que la sofisticación del mundo contemporáneo está basada en esta acumulación del conocimiento, que nos permite realizar una serie de cosas que no estaban disponibles antes, que permite sostener, no sin dificultades, a cerca de 8 mil millones de personas sobre el globo, lo que de otra manera no se lograría.

Las personas deben estar consciente de eso, porque en una sociedad abierta como a la que aspiramos, en la que no se imponga a las personas actuar de cierta manera, los conocimientos disponibles y las opciones que eso otorga también, para que las personas imaginen y desarrollen su proyecto de vida de la manera que quieran, se consiguieron mediante la construcción de una sociedad del conocimiento.

Pero es bueno entender que todo ello no se puede dar por sentado. Todo lo alcanzado está disponible porque hubo un proceso anterior que condujo a ello, que permitió crear conocimiento y aplicarlo, y que las interconexiones entre los distintos componentes de la sociedad son cada vez más estrechas.

Es importante que la sociedad comprenda la estrecha interconexión que hay entre todo, porque si no, las personas piensan que pueden escoger las partes que les gustan y desechar el resto, en circunstancias que todas ellas forman parte del mismo sistema.

Pero también debemos tener una visión crítica de lo que vaya resultando. Examinar lo que está ocurriendo, y enfrentar los desafíos éticos que se nos vienen. Por ejemplo, ¿qué vamos a hacer con la biotecnología? La capacidad que tenemos de modificar el genoma humano a partir de la técnica Crispr Cas9 nos plantea dilemas que son difíciles de resolver. De ahí que la sociedad debe establecer una mirada crítica y reflexiva respecto de lo que la Sociedad del Conocimiento va construyendo, y en eso las artes y las humanidades conforman disciplinas orientadas a eso.

Sr. Dante Bacigalupo.

—De lo explicado por los profesores Daron Acemoglu y James Robinson en sus últimos libros, es claro el bajo grado de desarrollo de Latam y por ende de Chile, además de las razones del mismo.

Hay una gran distancia con el primer mundo que a ratos se ve difícil de remontar para hacer lo expuesto en su conferencia. Pero Chile tiene recursos naturales geográficos muy importantes que me hacen pensar en la posibilidad de una suerte de “Sociedad” con ese mundo, para incorporarnos y participar activamente en el área de desarrollo del conocimiento. ¿Es posible trabajar en esa línea con algún éxito?, ¿Es lo que estamos haciendo?

Sr. Álvaro Fischer.

—Acemoglu y Robinson critican a las sociedades “extractivas”, definidas como aquellas en las que las instituciones del país excluyen a las mayorías del proceso de decisiones y de distribución del ingreso. Obviamente el término “extractivo” no se refiere a la extracción de recursos naturales de las entrañas de la Tierra. De modo que la explotación de los recursos naturales no es una restricción al desarrollo de Chile. Por el contrario, contribuye a este.

Pero en el siglo XXI la explotación de los recursos naturales debe hacerse en condiciones más sofisticadas, tanto para atender a las restricciones ambientales, como de provisión de agua de mar, uso de energías limpias, automatización y control digital de las faenas, además de la permanente introducción de innovaciones tecnológicas para hacer más

eficiente, seguro y “verde” el proceso. De modo que la explotación de las riquezas que Chile posee en materia de recursos naturales solo será factible si incorpora la ciencia, la tecnología y la innovación necesarias para lograr lo anterior, y si se fomentan los emprendimientos que introduzcan esos cambios. Eso requerirá de esfuerzos nacionales combinados con otros aportados desde el extranjero, pero no solo como transferencia de conocimiento al país, sino como intercambio científico-tecnológico innovativo que ocurre a nivel del ecosistema global, y con las transacciones comerciales involucradas cuando sea del caso, tanto desde el exterior hacia Chile como en sentido contrario.

Sr. Jorge Mardones.

—¿Qué rol puede jugar el Instituto del Ingenieros de Chile y sus Sociedades Académicas para llegar a que los actores del arpegio: la Ciencia, la Tecnología, la Innovación tengan sonoridad?

Sr. Álvaro Fischer.

—El Instituto de Ingenieros tiene la gracia de albergar en su interior ingenieros de múltiples disciplinas, que están en muchas actividades: académicas, de investigación, productivas, de servicios, de divulgación, etc. Creo que esa amplia gama de actividades permite al Instituto promover el tipo de ideas de las que he estado hablando y transmitir las hacia la sociedad. Es una posibilidad que el directorio del Instituto y sus socios deben examinar;

Sr. Ricardo Nicolau.

—Bueno Álvaro, realmente muy interesante, muy desafiante, uno queda muy entusiasmado, pero también preocupado, porque si no lo hacemos bien, vamos a llegar tarde o desaprovechar esta oportunidad. Dadas las circunstancias, esperemos que lo que tú prevés se materialice y que este avión con dos motores vuelva a despegar con fuerza y nos lleve más cerca de lo que es la Sociedad del Conocimiento hoy día.

Fin de la Conferencia.

LA FALLA SAN RAMÓN Y EL DESAFÍO DE LAS FALLAS ACTIVAS PARA LA INGENIERÍA

Exponen: Sr. Gabriel Easton y Rodolfo Saragoni.



Sr. Gabriel Easton.



Sr. Rodolfo Saragoni.

El día 27 de abril de 2021 a las 11:00 horas, vía zoom, ante una gran cantidad de asistentes, se realizó la segunda conferencia del Instituto de Ingenieros. En esta ocasión se contó con la exposición de los Sres. Gabriel Easton y Rodolfo Saragoni que abordaron el tema: “La Falla San Ramón y el Desafío de las Fallas Activas para la Ingeniería”.

Gabriel Easton es Geólogo y Magíster en Ciencias Mención Geología de la Universidad de Chile de año 1997, es Doctor en Oceanografía de la Universidad de Bordeaux en Francia, especializado en Geología cuaternaria y marina con aplicación a la paleosismología y tectónica activa, peligros geológicos; es Profesor Titular de la Universidad de Chile. Actualmente, es Director de la Escuela de Posgrado y Educación Continua en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Autor de sesenta publicaciones internacionales, libros y capítulos de libros. Actualmente investiga sobre el peligro y riesgo sísmico de la Falla San Ramón.

Rodolfo Saragoni es Ingeniero Civil y Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Es reconocido internacionalmente por sus contribuciones a la caracterización de la demanda sísmica, especialmente por su definición del potencial destructivo, ha sido profesor visitante en cursos de posgrados en varias universidades del mundo entero, Sudamérica, el viejo continente y en California. Fue presidente de la Asociación Iberomericana de Ingeniería Sísmica y vicepresidente de la Asociación Sudamericana de Ingenieros Estructurales; tuvo el honor de presidir la 16va Conferencia Mundial de Ingeniería Antisísmica realizada en Santiago de Chile en enero del 2017, con un tremendo éxito donde hubo más de 3000 participantes extranjeros y actualmente es presidente de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Cuando era muy joven obtuvo el premio internacional de OEA, Manuel Noriega Morales 1983, por sus contribuciones a la Ingeniería Sísmica y como investigador joven, además tiene Premios del Instituto de Ingenieros de Chile, el más importante, el premio Medalla de Oro y simultáneamente, el mismo año, recibió también el premio Al Ingeniero por Acciones Distinguidas.

A continuación, se reproducen las intervenciones de cada uno de los expositores.

El Presidente.

—Muy buenos días, bienvenidos a la Conferencia Mensual del Instituto de Ingenieros de Chile, correspondiente al mes de abril del año 2021. Hoy día tenemos un tema extraordinariamente de moda, porque aquellos que ya han leído el diario El Mercurio en la mañana, trae precisamente un artículo bastante interesante que se llama: Mapa de fallas en el país. Y dice que, en Chile, hay identificadas más de mil fallas, entre ellas algunas que están activas y otras inactivas, y el tema de la charla de hoy día es precisamente muy relacionada con esto, y va a ser entregado a ustedes por dos connotados especialistas en la materia: el Doctor Gabriel Easton y el profesor Doctor Rodolfo Saragoni.

Dr. Gabriel Easton.

—Primero, quisiera agradecer al Instituto de Ingenieros de Chile, representado por su presidente: Ricardo Nicolau del Roure como también al Directorio por la invitación, en especial a la profesora Ximena Vargas quien inicialmente nos contactó para esto, como también a mi colega Rodolfo Saragoni por la presentación precedente.

En esta presentación abordaremos el nuevo conocimiento y el desafío que representa la Falla San Ramón como también las fallas activas en general para la ingeniería en nuestro país.

Conceptualmente, podemos visualizar la Falla San Ramón en un esquema como este (Figura A1), en que se muestra su ubicación limitando el bloque de la Cordillera Principal de Los Andes respecto del valle central de Santiago.

La Falla San Ramón tiene una estructura cortical, que consiste en una ruptura de la corteza que profundiza hasta unos 10-15 km o hasta 20 km incluso y que, a lo largo del tiempo geológico, ha construido el relieve con el cual estamos familiarizados, como es el frente cordillerano de Santiago. En donde la falla llega a la superficie se conoce como “traza”, y su estudio y cartografía es muy importante puesto que cuando estas estructuras se manifiestan en el terreno a través de rasgos como escarpes de falla, esto denota la capacidad que han tenido de romper hasta la superficie durante terremotos pasados, lo cual podrá volver a ocurrir. Entonces, esta falla representa la posibilidad de un terremoto de fuente local, es decir, que se puede generar al lado de Santiago a unos 10, 15 o 20 kilómetros

de profundidad, junto con la posibilidad que la ruptura sísmica llegue hasta la superficie y rompa el terreno a lo largo de su traza. Esto implica que podemos tener una dislocación del suelo en el piedemonte de Santiago, lo que induce una peligrosidad mucho mayor al fenómeno; estamos hablando de un peligro sísmico de fuente local, cortical, que puede generar bastante daño localizado a lo largo de la potencial ruptura en superficie, como también debido a las fuertes aceleraciones esperables en un escenario como este, tal como vamos a ver.

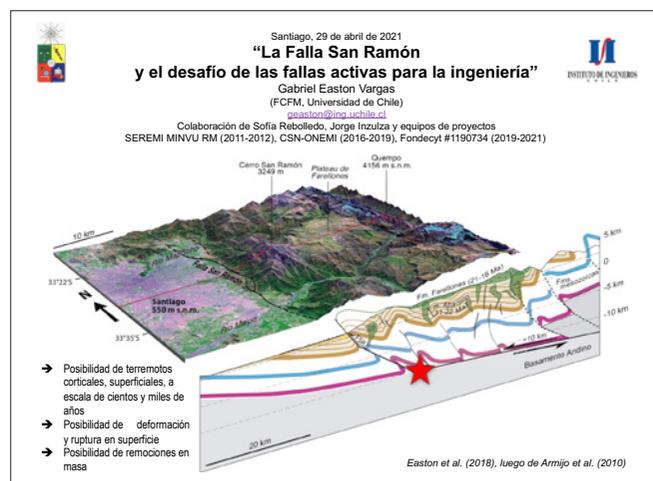


Figura A1

La Falla San Ramón no es la única falla cortical que se ha mapeado en Chile, aunque probablemente es la que conocemos mejor en cuanto al peligro y riesgo sísmico que representa. En los últimos años la comunidad geológica y en particular la comunidad neotectónica y, más específicamente los paleosismólogos y paleosismólogas, ha estado trabajando fuertemente en cartografiar las fallas activas y diferenciarlas de aquellas cuaternarias, porque son conceptos distintos y tienen implicancias diferentes en cuanto a la evaluación del peligro sísmico.

En la compilación de Isabel Santibáñez y colaboradores (Figura A2), hay una primera muestra de fallas corticales que dan cuenta de alguna actividad a escala cuaternaria, y en esa compilación podemos ver que hay muchas fallas en Chile, lo que no significa que Chile esté lleno de fallas, sino que corresponden, como señalaba antes, a objetos tectónicos que tenemos que estudiar, que tenemos que localizar y determinar en forma específica el peligro sísmico asociado a cada una.

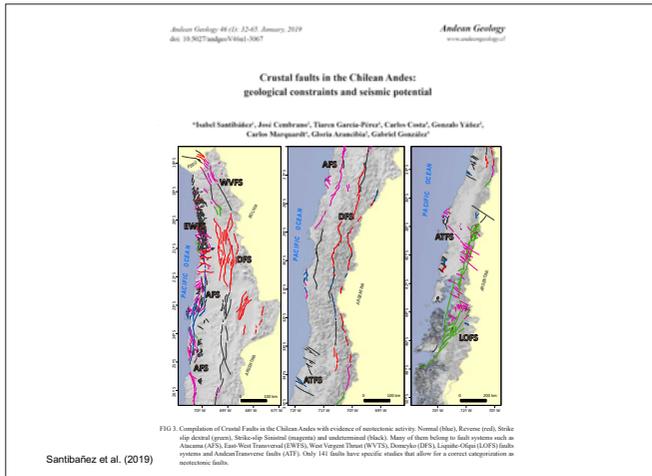


Figura A2

En otra compilación de Valentina Maldonado y colaboradores (Figura A3), se muestra algo similar, diferenciando las fallas que son potencialmente activas de aquellas en que el conocimiento permite señalar que son activas propiamente tal, es decir, fallas que podrían ser activas y fallas activas. La diferencia entre ambas es que en el primer caso desplazan rasgos que tienen edades más antiguas que diez mil años, mientras que en el segundo cortan rasgos más jóvenes que esa edad. Ambas compilaciones constituyen tremendos avances que nos permiten entender cada vez mejor la importancia del fenómeno del fallamiento activo y los terremotos corticales en nuestro país.

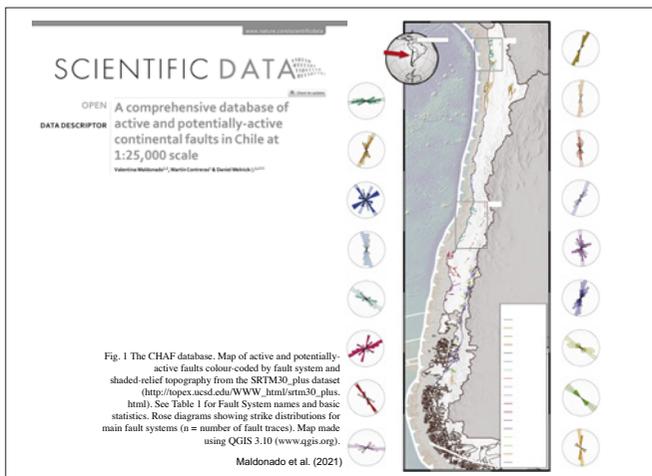


Figura A3

Quisiera entonces hacer un primer alcance, en relación con la diferencia entre lo que entendemos por fallas activas, fallas cuaternarias o fallas potencialmente activas.

Esta es una ciencia relativamente nueva pues, si bien desde fines del siglo XIX se reportan rupturas en superficie asociadas a fallas geológicas, la ciencia de la geología de terremotos y en especial de las fallas activas tuvo un mayor impulso a partir de los años sesenta y setenta, pero especialmente desde los años ochenta y noventa, principalmente en Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda y otros países. En Chile, se puede decir que la neotectónica es una ciencia que comenzó a tomar fuerza a fines de los noventa y sobre todo a principios del presente siglo, para recién a partir de la segunda década contar con trabajos paleosismológicos propiamente tal.

En el trabajo de Santibañez y colaboradores (Figura A4), se mencionan como fallas activas aquellas con evidencias de ruptura en los últimos diez mil años, de acuerdo con la definición del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), fallas cuaternarias en el caso de aquellas con evidencias de desplazamientos en los últimos 2,7 millones de años, o fallas que podrían deslizarse en el futuro, afectando a los seres humanos.

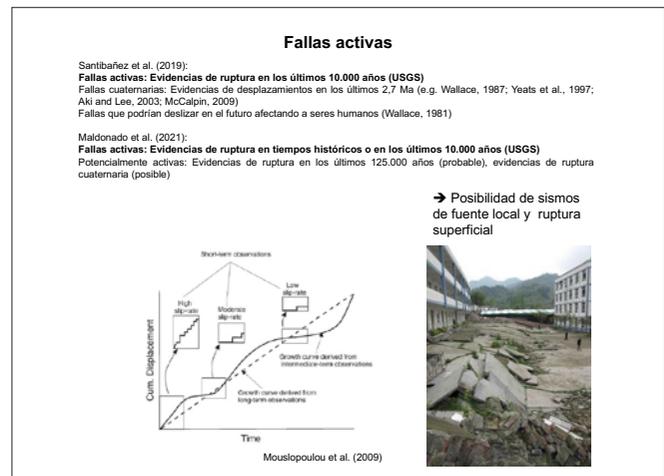


Figura A4

Para Maldonado y colaboradores, se mencionan como fallas activas aquellas con evidencias de ruptura en superficie ya sea en tiempos históricos o en los últimos diez mil años, tal como señala el USGS, fallas potencialmente

activas como aquellas que han generado una ruptura en los últimos ciento veinticinco mil años, o posibles cuando son cuaternarias.

Como denominador común, entendemos entonces que las fallas activas son aquellas que tienen alguna evidencia de ruptura en los últimos 10.000 años, y este entendimiento es fundamental, puesto que permite avanzar con claridad hacia la determinación del peligro sísmico asociado a estas estructuras geológicas en nuestro país.

Esto no significa que las fallas potencialmente activas, de las cuales no tenemos evidencias en ruptura en los últimos 10.000 años, sean importantes, sino más bien que tenemos que profundizar en su conocimiento.

¿Por qué es importante estudiar el comportamiento de las fallas activas en el pasado? Es porque estas pueden tener cambios en la velocidad con que se mueven los bloques que separan pudiendo, en algunos periodos, acumular mucho esfuerzo tectónico durante mucho tiempo para luego generar una ruptura, o en otros, romper produciendo terremotos más seguidos. Entender el comportamiento que las fallas han tenido en el pasado es fundamental, como también lo es dilucidar su capacidad de romper en superficie. De ahí entonces nace la paleosismología, ciencia que busca determinar qué fallas son capaces de generar terremotos, cuándo han ocurrido y especialmente cuándo fue el último y qué magnitud tuvo, preguntas muy relevantes para estimar el peligro que representan y el alcance que pueden tener potenciales eventos sísmicos en el futuro (Figura A5).

En el texto de McCalpin, uno de los paleosismólogos más reconocidos a nivel mundial, se define la paleosismología como el estudio de los terremotos prehistóricos, especialmente su ubicación, temporalidad y tamaño, es decir, se busca parametrizar los terremotos que ocurren o que han ocurrido y que se registran en la geología. En ese sentido, la paleosismología puede ser considerada una subdisciplina, diferente a la vez de la neotectónica.

Como mencionaba, luego de una larga trayectoria con grandes esfuerzos de la comunidad geológica, geofísica y sismológica por determinar fallas con evidencias neotectónicas, en nuestro país, recién a partir del presente siglo y en especial desde la segunda década tenemos trabajos paleosismológicos propiamente tales, con fechados de eventos discretos y tasas de deslizamiento en

los últimos 10.000 años en las fallas de Mejillones, San Ramón, Atacama, Liquiñe-Ofqui, Magallanes y otras (Figura A6).

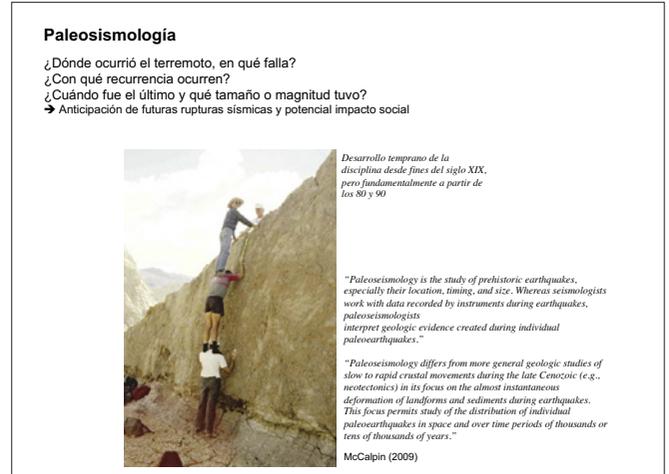


Figura A5



Figura A6

En la Falla Mejillones tenemos las primeras estimaciones de paleoterremotos publicadas en los años 2011 y 2012, con tasas de deslizamiento del orden de 0,5-0,6 milímetros por año (mm/a), o metros por kilo año (m/ka), que es lo mismo.

En el caso de la Falla San Ramón, el informe "Estudio Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón" entregado a la Seremi Minvu RM en 2012, junto con los resultados publicados internacionalmente en la revista *Geology* en

2014, evidencia el carácter activo de esta falla con los últimos terremotos fechados hace 17.000 y 8.000 años atrás, y tasas de deslizamiento del orden de 0,5-0,6 milímetros por año.

Trabajos más recientes como el de Ángelo Villalobos y colaboradores dan cuenta de evidencias paleosismológicas submarinas en la falla Liquiñe-Ofqui, mientras que en el trabajo de Daniel Melnick y colaboradores se realizan inferencias paleosismológicas en la falla El Yolki en Chile central. Investigaciones también recientes como las de José González-Alfaro y colaboradores e Ian del Río y colaboradores dan cuenta de avances en la determinación geocronológica en las fallas de Mejillones y Atacama, respectivamente. Junto a lo anterior, tenemos los significativos avances a partir de los resultados de Sandoval y De Pascale, Astudillo y colaboradores y De Pascale y colaboradores, que dan cuenta de las rápidas velocidades con que se mueven las fallas de Magallanes y Liquiñe-Ofqui, con tasas de deslizamiento del orden de 7,8-10,5 mm/a en el caso de la primera, y 18,8 a 11,6-24,6 mm/a en el caso de la segunda, respectivamente.

Todos estos trabajos muestran que, mientras más avanzamos y profundizamos en el conocimiento paleosismológico en nuestro país, más evidente resulta que las fallas activas constituyen un factor fundamental de peligro geológico que debiera ser considerado en los diseños de ingeniería y en la normativa sísmica, con el fin de reducir el riesgo de desastres asociados a su potencial activación. Un ejemplo de lo anterior lo constituye la secuencia sísmica del año 2007 en Aysén, que incluyó un terremoto de magnitud 6,2 generado a lo largo de una falla del sistema Liquiñe-Ofqui, tal como se ha evidenciado en trabajos recientes.

La Falla San Ramón corresponde a un concepto que data por lo menos del año 1950, cuando Juan Brüggén mencionaba la posibilidad de una falla a los pies del cordón montañoso que constituye el frente cordillerano de Santiago, señalándola como “la falla del cerro San Ramón”, que constituye un trazado rectilíneo en la ladera de la Cordillera de Los Andes, “que se puede seguir por lo menos por cuarenta kilómetros” (Figura A7).

En el año 1969 se publica un informe que da cuenta de la posibilidad de una falla a los pies del frente cordillerano, la Falla San Ramón, pero que no se sabe qué naturaleza tiene y mucho menos si es activa o no; de hecho, en este

trabajo se consideraba como una falla normal, es decir, con el bloque de la depresión central que baja respecto del bloque cordillerano, una visión que primó durante décadas hasta fines del siglo XX.

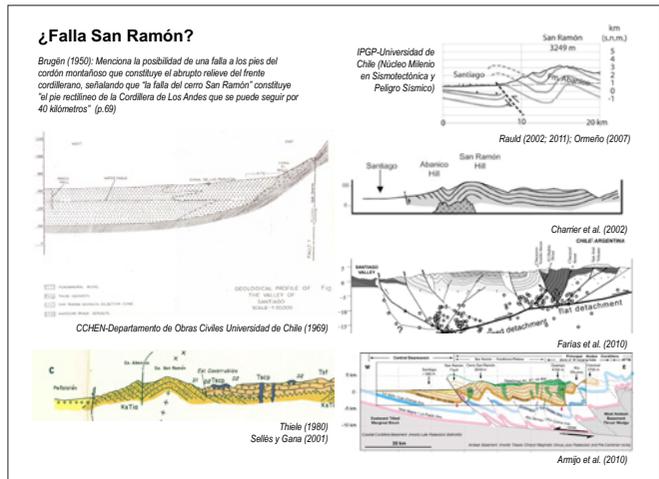


Figura A7

Recién a inicios del siglo XXI, en el marco de una colaboración entre el *Institut de Physique du Globe de Paris* y la Universidad de Chile, con Rolando Armijo, Ricardo Thiele y el Núcleo Milenio en Sismotectónica y Peligro Sísmico de Jaime Campos, Sofía Rebolledo, Ramón Verdugo y otros, se cultivó una nueva visión en torno a este tema que quedaría inicialmente plasmada en las memorias y tesis de grado de Rodrigo Rauld y Antonio Ormeño, en las cuales se planteó a la Falla San Ramón como una falla inversa y cuaternaria, es decir, potencialmente activa, responsable de los escarpes o escalones topográficos que se pueden observar a lo largo del piedemonte de Santiago y que afectan las terrazas fluviales del río Maipo. Esta idea tomaría fuerza en el trabajo de Rolando Armijo y colaboradores del año dos mil diez, en donde se plantea el rol que esta falla tiene en la construcción del frente occidental de la Cordillera de Los Andes, lo que, junto a los trabajos de Reynaldo Charrier y colaboradores, Marcelo Farías y colaboradores, Laura Giambiagi y colaboradores, entre otros, instalaría una discusión sobre la vergencia dominante o bivergencia, es decir, el modo cómo se construye la cordillera u orógeno andino. En todos estos últimos trabajos la Falla San Ramón es una falla cortical que se enraíza o profundiza hacia el este bajo el frente occidental de la Cordillera Principal de Los Andes, no quedando ya duda de su naturaleza inversa.

En el trabajo recientemente publicado de Maldonado y colaboradores (Figura A8), que es una compilación de fallas activas y potencialmente activas, se destaca justamente esta idea del frente occidental de la cordillera andina con la Falla San Ramón a los pies del frente cordillerano de Santiago, pero también con otras fallas recientemente descubiertas con evidencias de actividad cuaternaria tales como la Falla Cariño Botado en la depresión de la ciudad de Los Andes, o la Falla Mesamávida en la Región del Maule, estudiadas por los equipos y estudiantes de Luisa Pinto y Joaquín Cortés, respectivamente.

eléctrica y sísmica que evidencian esta estructura geológica hasta decenas de metros en profundidad.

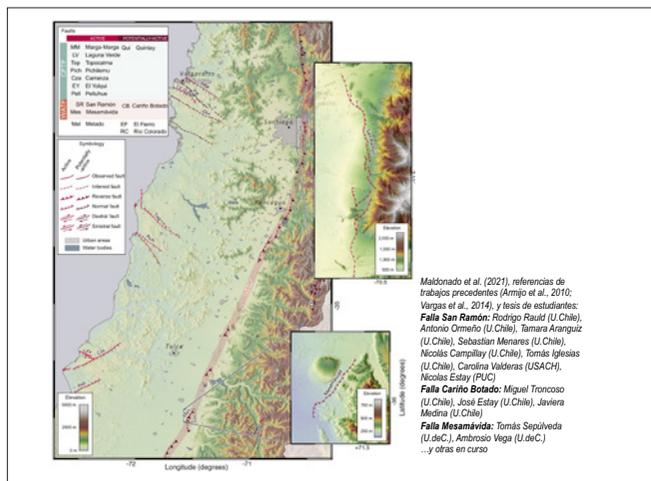


Figura A8

¿Qué sabemos hoy de la Falla San Ramón?

Es una falla activa, inversa y de estructura cortical, que profundiza hasta unos 10-20 km bajo el frente occidental de la Cordillera de Los Andes. Tiene sismicidad asociada en profundidad, de acuerdo con los trabajos de Adriana Pérez y colaboradores y de Jean Baptiste Ammirati y colaboradores, este último desarrollado gracias al “*Monitoreo Sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón*”, un estudio realizado entre octubre de 2016 y marzo de 2019 por el Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile para la ONEMI, gracias al cual pudimos incrementar notablemente las capacidades de monitoreo sísmico de esta falla como también de la cordillera ubicada inmediatamente al oriente de Santiago, en general (Figura A9).

También, hemos podido estudiar la manifestación de la Falla San Ramón en subsuperficie gracias a técnicas de geofísica, con resultados de tomografía de resistividad

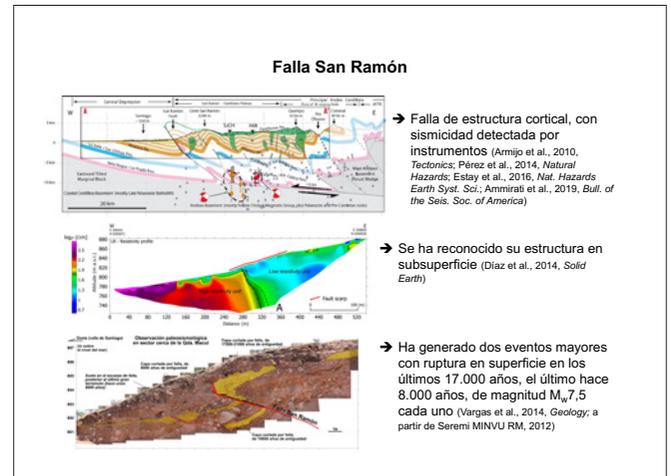


Figura A9

Como mencionaba antes, gracias a la excavación y el análisis de zanjas o trincheras paleosismológicas realizadas entre los años dos mil once y dos mil doce en el marco del estudio de la Seremi Minvu RM, pudimos demostrar el carácter activo de la Falla de San Ramón y fechar dos eventos de terremotos con ruptura superficial, ocurridos hace 17.000 años y el último hace 8.000 años atrás, cuyas magnitudes se han estimado en $M_w 7,2-7,5$, lo que constituye, además la demostración fundamental de su potencial sísmico y capacidad de romper la superficie.

¿Cómo funcionan este tipo de fallas?

Las fallas inversas son muy difíciles de observar en superficie en forma directa, pues usualmente quedan sepultadas por sus propios derrumbes una vez ocurrido el terremoto. En este esquema (Figura A10), en el primer caso, arriba a la izquierda, tenemos la situación antes del fallamiento en superficie. Luego, la falla se activa, genera un terremoto que levanta el bloque colgante, es decir, el oriental por sobre el occidental, se cae una parte de la cuña de material que queda sin sustento y por lo tanto la falla queda inmediatamente tapada por su propio derrumbe. En un nuevo terremoto, se desploma nuevamente la cuña de material que queda sin sustento, sepultando nuevamente la falla y haciendo crecer el escarpe. Entonces mientras más grandes son los escarpes, es decir, los escalones topográficos que evidencian la falla, esto quiere decir que más deformación

acumulan en superficie, como producto de los terremotos que los han generado. Por esto este tipo de fallas es muy difícil de ver directamente en terreno, puesto que siempre van a quedar tapadas por sus propios derrumbes, una vez que se activan y generan sismos, razón por la cual solo gracias a las excavaciones de las trincheras paleosismológicas pudimos evidenciar directamente la Falla San Ramón cortando las capas del suelo del piedemonte de Santiago y fechar los últimos terremotos.

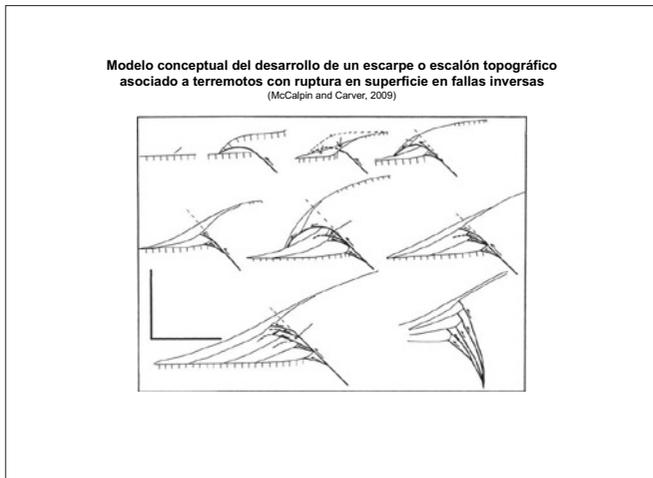


Figura A10

En este mapa geológico se muestran los escarpes de falla que afectan a las unidades geomorfológicas del piedemonte en el sector nororiente de Santiago (Figura A11), en que el color naranja representa unidades de edad cuaternaria, antiguas, el amarillo oscuro unidades cuaternarias de edad intermedia y en color amarillo claro las unidades más recientes, en las cuales habíamos llegado a determinar que era un lugar propicio para la excavación de trincheras paleosismológicas, pues teníamos una idea de la edad de la superficie del terreno afectada por la falla, más joven que 38-45 ka.

Entonces, gracias al estudio realizado entre los años 2011-2012 para la Seremi Minvu RM, pudimos realizar estas trincheras paleosismológicas en el escarpe más joven de la Falla San Ramón (Figura A12). Al excavar pudimos ver directamente la falla cortando capas que constituyen el suelo del piedemonte de Santiago, lo cual se puede apreciar en este fotomosaico de la trinchera, que es la observación fundamental paleosismológica que demuestra el carácter

activo de esta falla (Figura A13). En este fotomosaico, cada uno de los cuadrados representa un metro de ancho y podemos ver aquí una pared que tiene 5 metros de profundidad, en la cual apreciamos que esta capa de sedimento fino coloreada de amarillo (Figura A14), que se sitúa entre depósitos de aluviones, con edades entre 17.000 y 21.000 años, se encuentra totalmente cortada, interrumpida en su continuidad lateral por la Falla San Ramón que la podemos seguir desde la superficie hasta la parte inferior de la trinchera, en donde volvemos a encontrar nuevamente la misma capa al otro lado de la falla, con edades similares de 19.000 años. El mismo material lo encontramos en una capa intermedia, con edades de 8.000 años, que también está cortado por la falla.

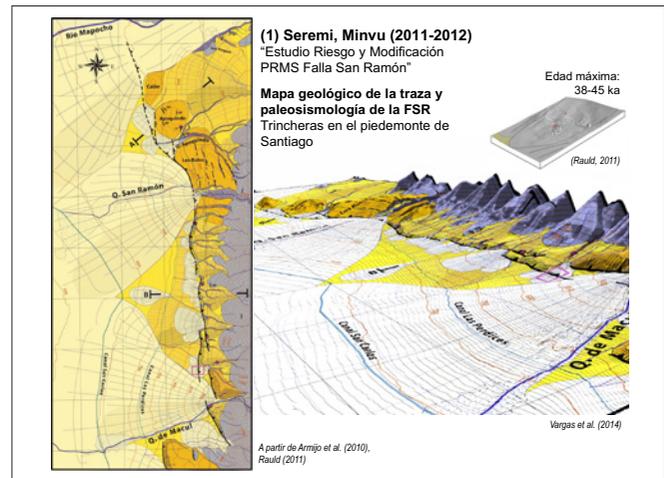


Figura A11



Figura A12

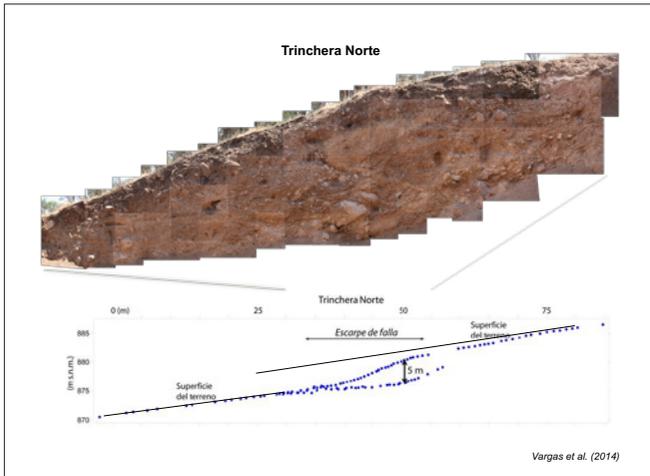


Figura A13

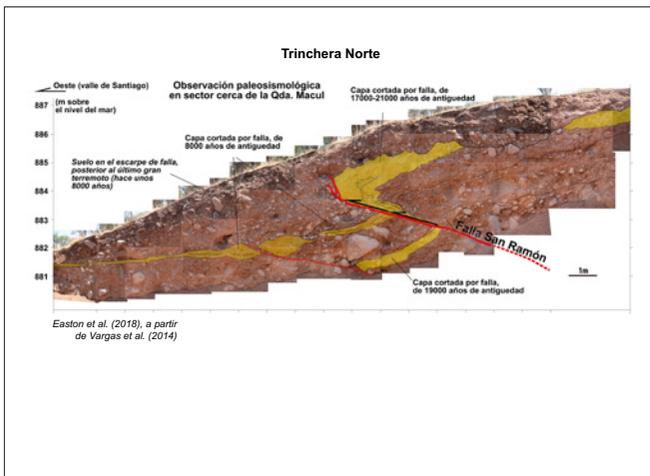


Figura A14

Cuando realizamos la investigación paleosismológica fechamos las capas mediante técnicas avanzadas de geocronología como son dataciones radiocarbono por AMS (espectrometría de masas con aceleradores) y OSL (luminiscencia ópticamente inducida), lo que nos permitió entonces determinar la edad de los terremotos y reconstruir la evolución del escarpe de falla en este sector (Figura A15). Antes del penúltimo terremoto la capa se encontraba al mismo nivel y la superficie del terreno no había sido desplazada. Hace unos 17.000 años ocurrió un terremoto que levanta el bloque oriental, corta la capa y la desplaza, perdiendo sustento y derrumbándose parte de ella, quedando el material directamente sobre el terreno. Luego, se emplazan aluviones y hace unos 8.000 años nuevamente otro terremoto vuelve a cortar la capa llevando

la parte que está en el bloque oriental más arriba, con lo cual pierde sustento, se derrumba y cae junto con parte de las capas de aluviones que se habían emplazado sobre ella, generando el derrumbe. Luego de eso no hay evidencias de capas más jóvenes afectadas por la falla que permitan inferir un terremoto con ruptura en superficie en los últimos 8.000 años, por lo cual interpretamos que la Falla San Ramón ha acumulado suficiente esfuerzo tectónico para generar un nuevo evento, similar a los deducidos a partir de la trinchera paleosismológica.

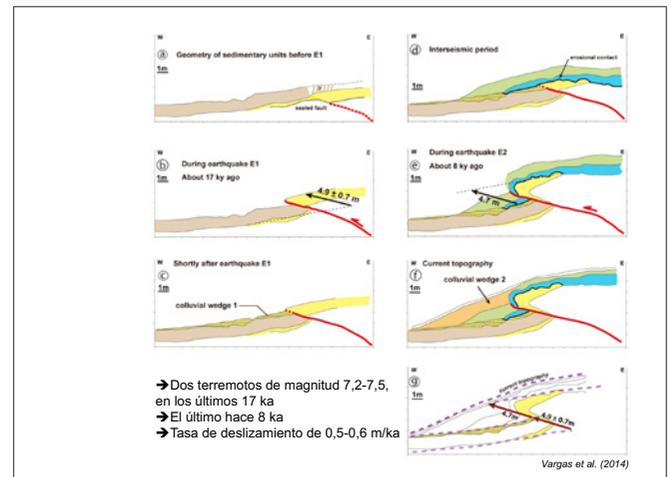


Figura A15

Es interesante notar que otra trinchera paleosismológica, cuyo estudio se encuentra en curso en la tesis de Tomás Iglesias, muestra evidencias similares a las ya descritas lo que sustenta las inferencias de paleoterremotos a partir de estas observaciones.

También es interesante notar que, a escala geológica, cuando se cartografía la geología del frente cordillerano, se puede modelar su estructura y llegar a resultados muy parecidos en cuanto a tasas de deslizamiento con respecto a las deducidas a partir de las trincheras paleosismológicas, aunque a escalas de tiempo geológico diferente (Figura A16).

De acuerdo con las observaciones de las trincheras la tasa de deslizamiento de la falla es equivalente a unos 0,5-0,6 milímetros por año para los últimos 17.000 años, mientras que cuando analizamos el frente cordillerano en su conjunto podemos inferir tasas de deslizamiento del orden de 0,3-0,5 milímetros por año para los últimos millones de años y, por lo tanto, hay una cierta consistencia entre

las observaciones de corta escala geológica temporal con aquellas de larga escala temporal (Figura A17).

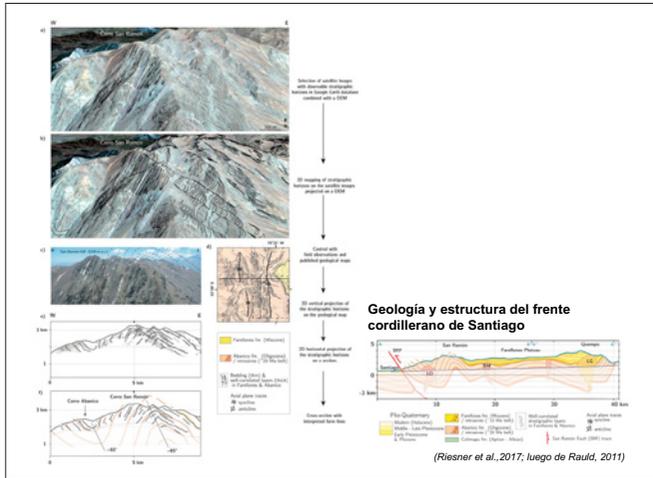


Figura A16

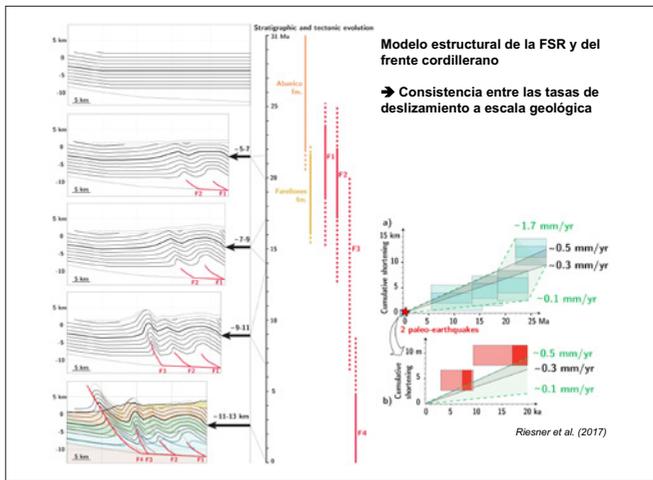


Figura A17

Gracias al proyecto que realizamos a través del Centro Sismológico Nacional para la ONEMI, cuyo objetivo fundamental era implementar un sistema de monitoreo sísmico y profundizar el conocimiento geológico de la Falla San Ramón, pudimos realizar un sondaje y un pozo en el escarpe de falla ubicado al oriente del Centro de Estudios Nucleares La Reina, ubicado en la comuna de Las Condes (Figura A18). Esta fue realmente una hazaña realizada por el IDIEM, quienes recuperaron un sondaje de 200 m de profundidad, proyectado especialmente para estudiar la estructura cortical de la falla, en una zona con roca altamente

dañada en la cual la recuperación del testigo propiamente tal fue muy difícil (Figura A19). ¿Y qué es lo que pudimos observar? En la parte superior, en los primeros 40 metros, tenemos gravas no consolidadas dispuestas sobre rocas volcánicas presumiblemente de la Formación Abanico que tiene millones de años de antigüedad, intensamente dañada y fracturada. Tenemos núcleos de falla que comienzan a aparecer cerca de los 160 metros de profundidad y especialmente cerca de los 180 metros de profundidad y luego, debajo de esto, tenemos nuevamente gravas no consolidadas. Es decir, tenemos rocas muy viejas montándose por falla sobre gravas jóvenes y, por lo tanto, esta observación constituye otra evidencia fundamental del carácter inverso de la Falla San Ramón como también de su importancia como estructura cuaternaria, activa, en la corteza superior (Figura A20).

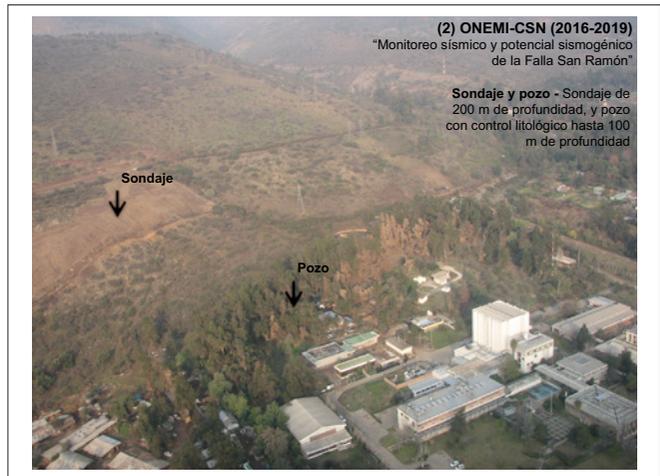


Figura A18



Figura A19

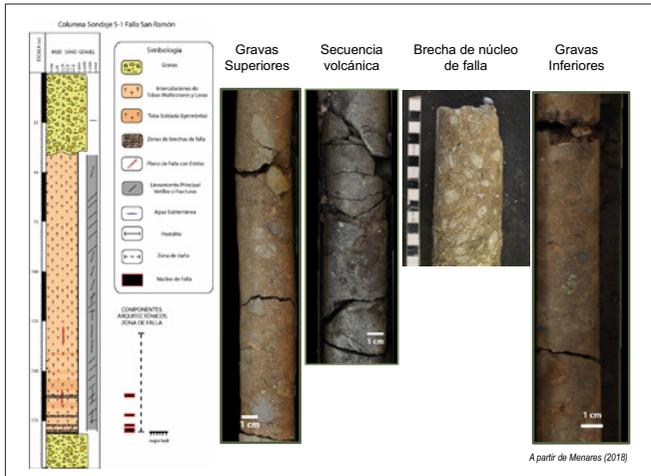


Figura A20

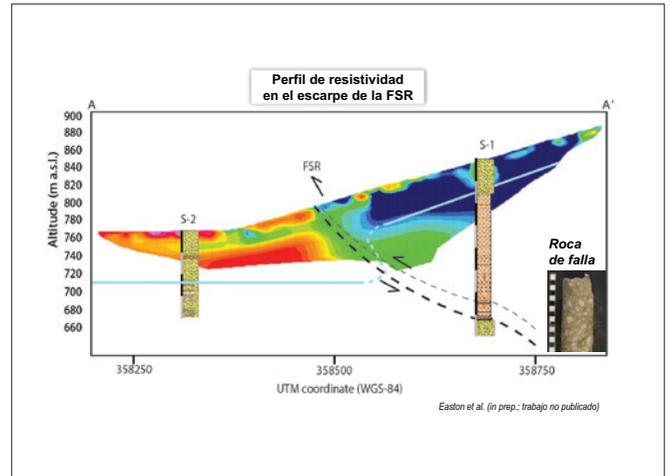


Figura A21

¿Qué es lo que uno ve en los sondajes? Bueno aquí se ven, desde la foto de la izquierda a la derecha, las gravas superiores, luego las rocas volcánicas de la Formación Abanico, el núcleo de la falla que se puede observar a unos 180 metros de profundidad y que corresponde a una brecha tipo mosaico, y finalmente las gravas inferiores. Cuando se observa con más detalle la brecha, podemos apreciar que corresponde a roca triturada, en donde hay remanentes de roca que se mezclan con roca molida en la matriz y minerales que dan cuenta de una cierta actividad hidrotermal asociada a esta falla.

En este perfil geofísico de resistividad eléctrica que pasa por el sondaje y el pozo realizados en el escarpe de la Falla San Ramón (Figura A21), inmediatamente al oriente del Centro de Estudios Nucleares, podemos apreciar un fuerte contraste lateral que manifiesta la localización de la falla en subsuperficie, que es consistente además con la observación realizada en el sondaje y el pozo. Es interesante comparar lo observado en este sector con lo encontrado en la falla que originó el terremoto de Chi-Chi en 1999, de magnitud 7,6 que rompió a lo largo de 80 km con desplazamientos en superficie del orden de 2 a 9 m. Estudios posteriores a este terremoto mostraron una estructura muy similar a lo que nosotros hemos estado observando en la Falla San Ramón (Figura A22).

Algunos otros ejemplos en el mundo, con rupturas en fallas activas de naturaleza inversa corresponden al terremoto de 1980 en El Asnam, Argelia, 1994 en California, 2005 en Pakistán, 2008 en Wenchuán, China, todos terremotos corticales de grandes magnitudes, 7,3-7,9, que

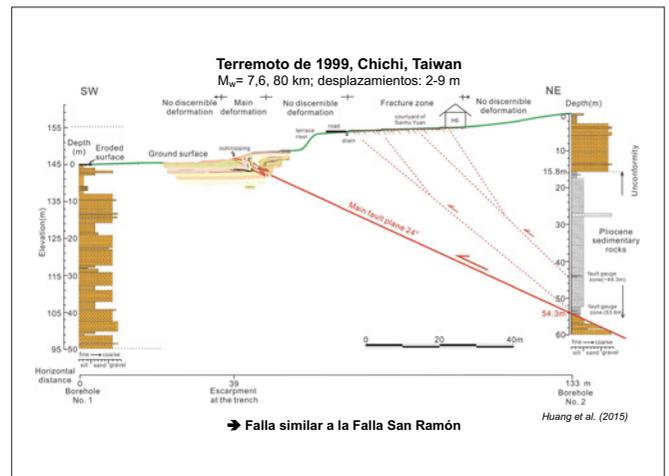


Figura A22



Figura A23

también generaron un impacto y daños muy importantes, con grandes remociones en masa en algunos casos (Figura A23).

Gracias al proyecto realizado para la ONEMI, implementamos el monitoreo sísmico de detalle en la Falla San Ramón, mediante la instalación de siete estaciones que incluyeron un sismómetro a 100 m de profundidad (Figura A24), lo cual permitió reforzar el monitoreo sísmico y geodésico de esta estructura como también del conjunto de la Cordillera Principal de Los Andes ubicada inmediatamente al oriente de Santiago. En el trabajo de Ammirati y colaboradores (Figura A25), se muestra la sismicidad cortical con sismos de muy baja magnitud, que ahora somos capaces de detectar gracias a esta red especialmente mejorada para el monitoreo de esta falla, pero que también nos permite entender mucho mejor la sismicidad cortical bajo la Cordillera de Los Andes en la Región Metropolitana. Podemos ver que tenemos dos franjas, una bajo el frente cordillerano en donde se ubica la Falla San Ramón y que coincide con la estructura geológica de esta falla, y otra en la alta cordillera que coincide con la ubicación de otras fallas, una de las cuales podría ser, por ejemplo, la que ocasionó el terremoto de Las Melosas en 1958. Esperamos que el monitoreo continuo, mejorado a través de esta nueva red, nos permita entender mucho mejor la estructura cortical de la cordillera andina a esta latitud, incluyendo la de la Falla San Ramón, con las implicancias que esto tiene para la determinación del peligro sísmico asociado a fallas activas en la Región Metropolitana en general.

En el trabajo de Ammirati y colaboradores simulamos un escenario de ruptura de la Falla San Ramón, considerando un terremoto en esta falla a lo largo de 50 km y por 20 km de profundidad, con desplazamientos del orden de 5 m de acuerdo con lo observado en las trincheras paleosismológicas en superficie (Figura A26). Como resultado, podemos ver que las aceleraciones esperadas ante un escenario como este pueden ser muy importantes en las inmediaciones de la falla como también en buena parte de Santiago, muy superiores lo experimentado por la ciudad durante el terremoto del Maule en 2010 (Figura A27). Esto muestra que, ante este escenario de ruptura de fuente local en la Falla San Ramón, la demanda sísmica en Santiago sería muy superior a lo estipulado por la norma NCH433, con aceleraciones que llegarían a valores cercanos a 80%g, o aún más en las cercanías de la falla, algo no contemplado por esta norma en la actualidad.



Figura A24

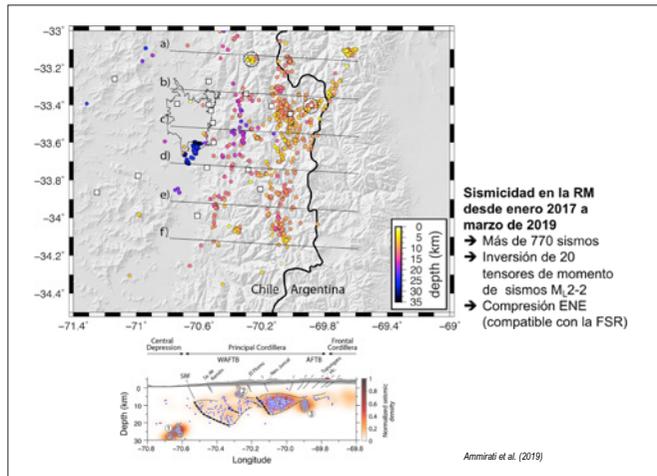


Figura A25

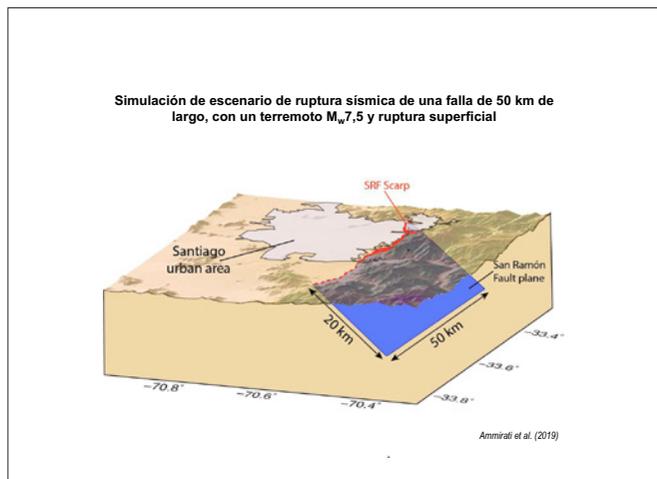


Figura A26

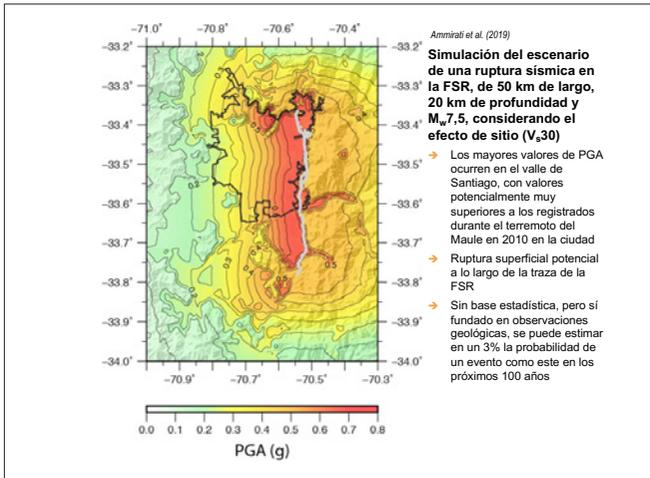


Figura A27

El peligro más importante ante la activación de esta amenaza sería, de todas maneras, la potencial ruptura en superficie que podría levantar el bloque cordillerano varios metros sobre el bloque de la depresión del valle central, generando una dislocación del suelo a lo largo del piedemonte de Santiago, que es lo que también informamos en el estudio de la Seremi Minvu RM del año 2012. Por esta razón, propusimos en ese estudio que no se siga construyendo en una franja de unos 300 m de ancho que es en donde se sitúan los escarpes de falla y donde podemos esperar más posiblemente una ruptura en superficie, ante la potencial activación de la Falla San Ramón (Figura A28).

¿Cuál es la situación de Santiago en la actualidad?

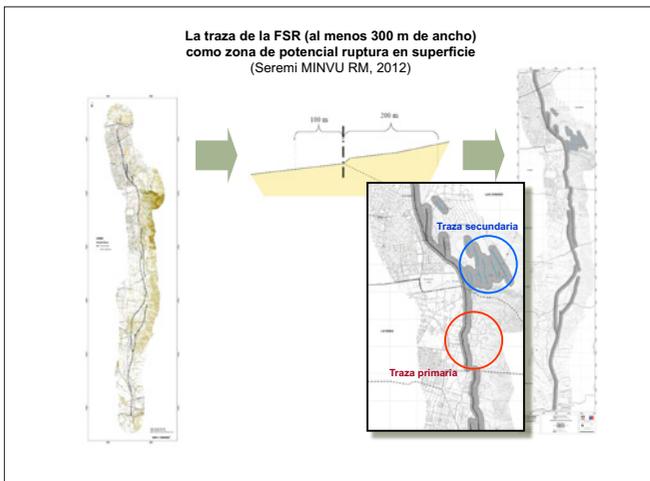


Figura A28

En un análisis histórico que realizamos junto a colegas de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, de la Facultad de Ciencias Sociales y de la Facultad de Derecho de la Universidad de Chile, publicado en la Revista de Urbanismo, pudimos constatar el crecimiento acelerado de la ciudad hacia el piedemonte cordillerano en las últimas décadas (Figura A29), luego de un cambio profundo en la regulación urbana. En el Plan Regulador (PRIS) de 1960, se supeditaba el crecimiento de la ciudad fundamentalmente al valle central. En 1979, sin embargo, se tomó la decisión de ampliar el área urbanizable y este cambio involucró el piedemonte de Santiago, resultando que desde 1979 en adelante hemos tenido una urbanización acelerada hacia el sector oriente y cada vez más sobre la traza de la Falla San Ramón, con cerca de un 55% ya urbanizado entre los ríos Mapocho y Maipo, lo que implica que cada vez más personas viven expuestas directamente a esta amenaza, en particular a la potencial ruptura en superficie ante un sismo mayor en esta falla.

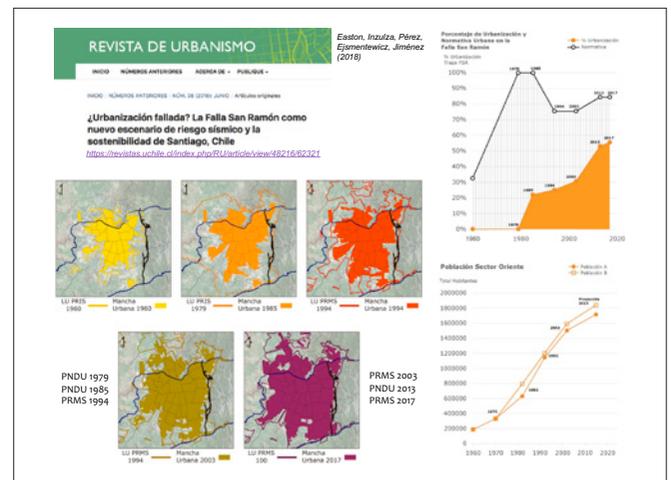


Figura A29

En la actualidad, desde hace un par de años y gracias al proyecto Fondecyt 1190734, nos encontramos trabajando en el análisis de una base de datos de topografía LiDAR de resolución espacial de escala centimétrica, que nos está permitiendo corroborar la ubicación de la traza de la Falla San Ramón en donde ya la teníamos mapeada, como también determinar su ubicación donde no la habíamos cartografiado en detalle, como por ejemplo en las comunas de Pirque y Lo Barnechea. Por ejemplo, en el área de la quebrada de Macul (Figura A30), podemos

ver claramente los escarpes de falla incluyendo el escarpe donde realizamos las trincheras paleosismológicas, y también se aprecia que los sedimentos más jóvenes de esta quebrada cubren los escarpes, lo que no significa que la falla no esté ahí, sino que está cubierta por sedimento. Además, en el marco de este proyecto estamos avanzando en el análisis y comunicación del riesgo de esta amenaza, en conjunto con las comunidades que habitan el sector oriente de Santiago.

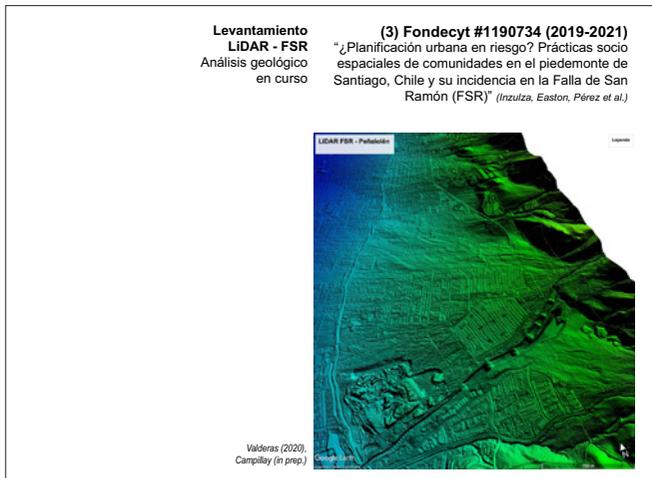


Figura A30

A modo de conclusión podemos destacar que la Falla San Ramón es una falla inversa, activa, capaz de romper la superficie, que ha generado terremotos de magnitud 7,2–7,5 en los últimos 17.000 años y el último hace 8.000 años atrás, que sin duda lo volverá a hacer y que la modelación de un terremoto con un escenario similar predice un fuerte impacto en Santiago, con ruptura en superficie y una demanda sísmica muy superior a lo que estipula la norma NCH433 para la ciudad.

Dado todo lo anterior, insistimos en la recomendación que el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS), como también los planes comunales incorporen la Falla San Ramón, de modo tal que su ubicación esté disponible en forma transparente para la población y que no se siga construyendo directamente sobre su traza, dado el riesgo que implica la potencial ruptura en superficie en zonas cada vez más habitadas. Nuevamente, recomendamos también que se modifique la norma sísmica NCH433 de modo tal que se incorpore esta y otras fallas activas del país, cuyo conocimiento es cada vez más profundo y contundente

en mostrar el peligro que representan ante su potencial activación, tal como ya ha ocurrido en algunos casos como en Aysén, el año 2007 y otros eventos corticales recientes. Esto implica abandonar la antigua concepción respecto de la lentitud o irrelevancia de las fallas geológicas en nuestro país para los diseños de ingeniería y la normativa sísmica en particular, y avanzar hacia una aún mejor normativa que se haga cargo de estas amenazas localizadas, pero potencialmente muy dañinas.

Si consideramos las observaciones paleosismológicas, es posible estimar, gracias a la colaboración de la Profesora Ximena Vargas, una probabilidad tiempo-dependiente del orden de un 3% para un evento mayor en la Falla San Ramón en los próximos 100 años y de un 13% en los próximos 500 años. Si bien esta estimación no tiene fundamento estadístico, es decir, no tenemos un conjunto de eventos discretos que nos permitan sustentar estadísticamente este cálculo, sí tiene consistencia observacional, en el sentido que es coherente con el conjunto de observaciones acumuladas hasta ahora a distintas escalas de tiempo geológico. Sin embargo, es interesante considerar el ejemplo de California en esta materia en que, más allá de cálculos probabilísticos, la ley Alquist-Priolo de 1972, dictada luego del terremoto de 1971, prioriza la seguridad de la población ante cualquier otro interés, de modo tal que prohíbe cualquier construcción para uso humano sobre una falla activa y permite profundizar los estudios en el caso que haya incertidumbre respecto de la ubicación o carácter activo de la falla en cuestión, fomentando la generación de conocimiento para la toma de decisiones en la materia. Proponemos entonces avanzar hacia una política pública que priorice la seguridad de la población de Santiago, de la Región Metropolitana y del país en general, ante la activación de la amenaza que constituyen la Falla San Ramón y otras fallas activas en nuestro territorio.

Es importante destacar además la necesidad de avanzar en el diseño e implementación de planes de respuesta ante la potencial activación de la Falla San Ramón, en lo cual se encuentra trabajando la ONEMI, como también en educación y comunicación del riesgo en esta materia. Para ello hemos propuesto, entre otras cosas, la posibilidad de preservar una de las trincheras paleosismológicas como un museo de sitio para facilitar la experiencia directa de las personas con esta amenaza, tal como ocurre en Japón en el caso de las fallas de Neodani y Nojima, que generaron los destructivos terremotos de Nobi y Kobe en 1891 y 1995, respectivamente (Figuras A31 y A32).



Figura A31



Figura A32



Figura A33

Finalmente quisiera mencionar que este es un tema que importa cada vez más a la comunidad, que a su vez está cada vez más involucrada en problemáticas ambientales que afectan a sus propios territorios (Figura A33). Pensamos que la conjunción entre ciencia e ingeniería, en sinergia con los organismos del Estado y las comunidades es fundamental para avanzar en estrategias de política pública que nos permitan abordar los tremendos desafíos del presente siglo XXI.

Muchas gracias por su paciencia, ha sido una larga presentación y les agradezco mucho por su atención.

Sr. Rodolfo Saragoni.

—Buenos días a todos. Es un agrado estar esta mañana con ustedes y agradecer al presidente Ricardo Nicolau por esta invitación.

En conversación previa con Gabriel Easton decidimos que era conveniente que partiera yo con la presentación desde el punto de vista de la Ingeniería y él va a ver lo de la geología, la neotectónica, una disciplina muy importante, entonces yo voy a cubrir esa parte de la incidencia que tiene la geología en la Ingeniería en Chile y en particular en la Ingeniería Sísmica (Figura B1).

Para la mayoría de ustedes cuando se habla de falla, pensamos, porque lo han visto en la prensa y en la televisión y se hacen películas sobre ello, en la falla de San Andrés; esa es una falla de contacto de placas, de la placa americana, el continente y la placa del Pacífico, que es la que está del lado del mar (Figura B2).

Nosotros vamos a mirar esta parte en particular en una próxima diapositiva, van a ver esta zona de la falla. Esta falla es muy importante a nivel mundial porque fue la que produjo el terremoto de San Francisco, California en 1906 (Figura B3).

Una de las calles principales, la calle Market, después del terremoto se inicia un incendio, ustedes ven que no están las paredes de los edificios, pero lo más impresionante es que la mayoría de los edificios modernos de diez pisos (ya se había inventado el ascensor), fueron diseñados en Chicago, porque no había ingenieros estructurales en California, por lo que el diseño era para los vientos



NEOTECTÓNICA E INGENIERÍA SÍSMICA

RODOLFO SARAGONI
PRESIDENTE DE ACHISINA
PROFESOR TITULAR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Figura B1

que hay en Chicago, entonces, estos edificios pasaron el terremoto sin diseño sísmico, y este es el pecado original de la ingeniería sísmica americana, porque se tomaron coeficientes sísmicos muy bajos (Figura B4).



Figura B4



Figura B2

En la Figura B5 se puede apreciar la traza de la falla y esta es una foto del Profesor Gilbert de Berkeley, de la Universidad de California. Es una traza recta, lo que marca diferencia con los terremotos que ocurren acá en Chile. La señora que está ahí, si cruza la falla cambia de placa, la placa que está al lado derecho es la placa del Pacífico y al lado izquierdo es la placa americana.

TERREMOTO SAN FRANCISCO, CALIFORNIA
18 ABRIL 1906

Figura B3

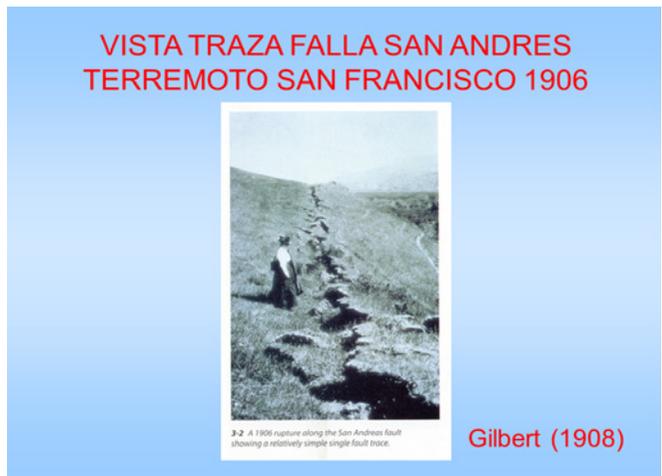


Figura B5

Son todas fotos de Gilbert de la época, fue tal el corrimiento de la falla, que está cerca se corrió 6 metros y eso lo produjo el terremoto (Figura B6), además de 3 levantamientos topográficos previos, se descubrió que los puntos más alejados de la falla ya se habían movido en ese momento, y aquí la placa estaba trabada y se produjo el terremoto. Así surgió la primera teoría del rebote elástico de los terremotos; este terremoto está asociado a la falla, entonces, la primera teoría sobre cómo ocurren los terremotos está basado en el movimiento de las fallas.



Figura B6

En la Figura B7, ustedes aquí ven la garganta, que es esa bahía estrecha y larga, atrás está la falla, ustedes la ven después en el continente, y esto está en la zona de Punta Reyes o Olema, que es la zona donde se sacaron las fotos históricas y que ahora es un parque nacional y se mantienen reproducciones de esto; si alguna vez ustedes tienen chance de cruzar de San Francisco al norte, pueden visitar este Parque Nacional.

Entonces, a partir de este terremoto, hay una asociación entre terremotos y fallas, pero cuando se tomaron estas fotos en realidad no se sabía nada sobre la teoría de placas, que se desarrolla en los años sesenta, así es que esto se estudió por la falla y la rama que se dedica a estudiar estos movimientos de la falla y la potencial ocurrencia de un terremoto, es una disciplina muy nueva de la geología, de la cual va a hablar en detalle Gabriel Easton y que se llama neotectónica (Figura B8). Ella se preocupa de la geología de un evento muy reciente, los últimos 20.000 años y que emplea técnicas especiales de carbono 14, luminiscencia de cuarzo,

estudios paleosísmicos, de los cuales también va a hablar Gabriel. Entonces, es una disciplina muy nueva dentro de la geología, hablar de los últimos 20.000 años, cuando se habla de millones de años en realidad, viene a ser casi el último segundo la geología y por eso no hay tantos especialistas.



Figura B7

NEOTECTÓNICA

GEOLOGÍA DE EVENTOS MUY RECIENTES, ÚLTIMOS 20.000 AÑOS.

EMPLEA TÉCNICAS ESPECIALES: CARBONO 14, LUMINISENCIA DE CUARZO.

ESTUDIOS PALEOSISMICOS.

Figura B8

Ahora, el país cuenta con especialistas en neotectónica y ustedes vieron, que aparecieron hoy día en El Mercurio, Daniel Melnick, al cual nosotros invitamos por primera vez a dar una conferencia en un encuentro Nacional de Ingeniería Sísmica. Daniel Melnick d'Etigny, es nieto de don Enrique d'Etigny, hijo de un destacado físico Melnick, así que una persona de mucha trayectoria y ha hecho grandes aportes en esta disciplina.

Para que entiendan la importancia de la neotectónica tienen que entender que a raíz del terremoto Tohuko de Japón en el 2011 y la falla de la planta de Fukushima, Dai-ichi, el gobierno japonés descubrió que los cuarenta y tres reactores nucleares del Japón no tenían estudios neotectónicos y, por lo tanto, no se sabía la amenaza que tenían con la falla y, a raíz de eso, de los 33 reactores que están operando, solamente se han habilitado tres y los otros treinta reactores están paralizados. En Japón, el 30% de la energía eléctrica se produce con energía nuclear, para que vean el impacto de la neotectónica en la ingeniería civil moderna. Nosotros tenemos una falla parecida a la falla de San Andrés, en la falla Magallanes-Fagnano, al sur de Chile, en la zona de Punta Arenas (Figura B9), allí el contacto entre la placa Sudamericana y la placa Scotia es, en realidad, una falla igual que se mueve en sentido horizontal y también tiene esta propiedad que nosotros podemos pasar en la superficie desde una placa a la otra placa a través de la falla.

Estados Unidos, está en una zona poco poblada. En Estados Unidos está en una zona muy poblada, así que por eso tenemos distintas maneras de estudiar los terremotos.



Figura B10



Figura B9

Esta falla produjo terremotos en Chile, en el año 1949, dos terremotos en la zona de Punta Arenas. Acá ustedes ven la falla, la falla es el estrecho de Magallanes (Figura B10), sigue igual como veíamos en el caso de California, la falla San Andrés, esa Bahía que veíamos en Punta Reyes, acá es igual y aquí vemos en el lado argentino, el lago Fagnano y ven que al igual que esa bahía es un lago muy largo y angosto porque es la traza de la falla, entonces el epicentro ocurrió justamente donde está la estrella verde, en una Estancia en la cual hubo bastantes dislocaciones. Nosotros tenemos nuestra falla San Andrés, pero a diferencia de

La sismicidad circumpacífica, está marcada por todos esos puntos violeta, que son los epicentros de temblores, que ocurren alrededor del Pacífico y eso corresponde a que hay subducción, que aquí están indicadas por estas puntas que indican que la placa se está hundiendo debajo de la otra placa y en general, la zona circumpacífica se caracteriza por tener terremotos de subducción. Todo es subducción excepto California y el sur de Chile que tiene esta característica de tener estos terremotos asociados a una falla (Figuras B11 y B12).



Figura B11

SUBDUCCION EN LATINO AMERICA

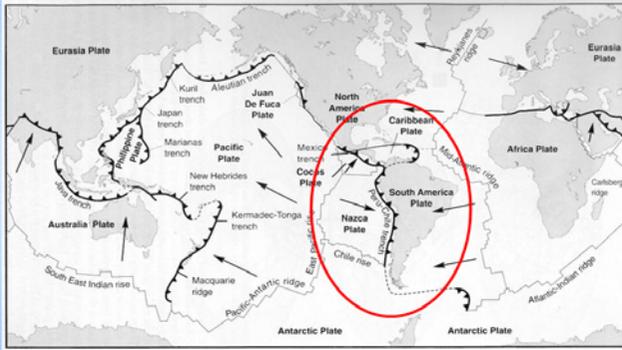


Figura B12

GRANDES TERREMOTOS ARGENTINOS

Figura B13

Esta zona de la placa de Nazca, en el caso chileno, nos hará interiorizarnos de los terremotos argentinos, en particular del terremoto de Mendoza 1861 (Figuras B13 y B14), esta es una descripción del doctor Wenceslao Díaz que mandó Chile a auxiliar en el desastre y los heridos, que hubo muchos en el terremoto.

Está el templo San Francisco, están las ruinas de la ciudad de Mendoza (Figura B15); cuando viajen ahí pueden pasar a verlo, esta es la antigua catedral (Figura B16), el terremoto ocurrió como a las 8 de la noche y murieron muchos hombres. En esa época no iban las señoras a la iglesia y como dicen los mendocinos: “se murieron nuestros patricios”, o sea los hombres de buena situación.

Este fue un tremendo terremoto y llama la atención que en Argentina haya más muertos por terremotos que en Chile, lo que parece una paradoja porque, ¿cómo va a haber más muertes en un país que no es tan sísmico como el de nosotros? Y eso es lo que voy a tratar de explicar, el porqué. Los terremotos en Argentina ocurren fundamentalmente asociados a fallas, entonces aquí tenemos un zoom de la placa de Nazca y vamos a comprobar que los tipos de terremoto que son de la placa de Nazca, son terremotos de contacto entre las placas (Figuras B17 y B18).

Lo que nosotros llamamos terremotos interplaca, son éstos que están marcados de verde (Figura B19), y son el terremoto del 27 febrero de 2010 y tenemos el terremoto intraplaca que es un terremoto de profundidad intermedia, que está marcado en azul, que están asociados a rupturas en la placa de Nazca y estos terremotos superficiales

**TERREMOTO DE MENDOZA
20 DE MARZO DE 1861**

“...Un estremecimiento ligero puso en conmoción todos los edificios haciéndolos oscilar suavemente de Este a Oeste. A la oscilación siguió sin la menor interrupción, un sacudimiento brusco y poderoso del Occidente, seguido de otro menos fuerte. Y todas las casas, todos los templos, la ciudad toda quedaron en dos segundos destrozados y tendidos por tierra. Los hombres y los animales no pudieron tampoco tenerse en pie y rodaron como las construcciones.

Dr. Wenceslao Díaz. Mendoza, marzo 1861.

Figura B14



Figura B15



Figura B16

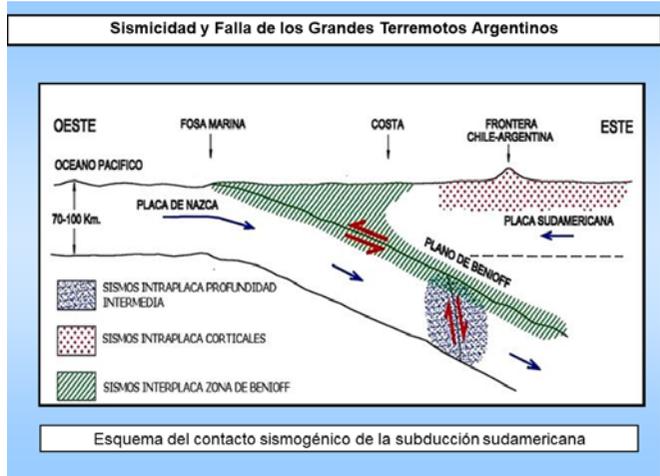


Figura B19



Figura B17



Figura B20



Figura B18

que ocurren que son intraplaca corticales o superficiales, ocurren en la zona que estamos viendo entre la frontera de Chile y Argentina, debido a la presión que produce la placa de Nazca sobre la placa Sudamericana.

Esta placa de Nazca es una placa muy veloz y que más o menos se está moviendo, nosotros medimos con GPS, diez centímetros por año. Así es que vamos a dedicarnos a ver estos terremotos que ocurren en Argentina y que son de tipo cortical superficial (Figura B20).

En el mapa de Argentina, ustedes ven que la parte roja está en la zona de Mendoza - San Juan, que es la zona donde ocurre la mayoría de los terremotos destructivos y acá tenemos un plano de la falla de Argentina (Figura B21) que

GRANDES TERREMOTOS ARGENTINOS

Terremoto de Mendoza
20/03/1861, Ms = 7.0

Terremoto de la provincia de San Juan
27/11/1894, Ms = 7.8

Terremoto de San Juan
15/01/1944, Ms = 7.4

Terremoto de Caucete
23/11/1977, Ms = 7.4

Figura B25

EL TERREMOTO DE SAN JUAN 1944



Figura B26

Terremoto de Caucete del año 1977, que lo inspeccionamos en un comité de la Universidad de Chile. Aquí tienen el terremoto en San Juan del año 44 (Figura B26), y acá tienen la falla La Laja, que produjo el terremoto, en el camino se produjo un ascenso de la parte posterior de dicho camino y se ve en la foto la traza de la falla que se movió (Figura B27).

En la Figura B28, tienen el sistema de fallas. La cordillera en Argentina es más ancha que la cordillera chilena, tenemos la precordillera, la mayoría de las ciudades están pegadas en la precordillera, la cordillera frontal y la cordillera principal, acá aparecen todos los terremotos asociados con la falla argentina y aquí aparece el pariente chileno, que es el terremoto de Las Melosas de 1958.

Entonces esto quiere decir que el sistema de fallas ha producido la mayor cantidad de fallecidos en Argentina, tiene un sistema de fallas similares en la cordillera chilena; entonces las fallas, son fallas inversas, de bajo ángulo en general, salvo la falla de rumbo del terremoto de 1894, esto que sea de bajo ángulo complica su ubicación, pero ustedes ven que todos los terremotos están asociados con fallas (Figura B29).

Lo que aparecía en el diario El Mercurio es un interferómetro; es una medida la detección de estas mil fallas, está hecho con tecnología de láser, con satélite. Este es un terremoto en California, en Landers en 1992 (Figura B30), y una zona poblada y aquí están las medidas hechas con el satélite haciendo la interferencia (estas son de interferencia radar) y el cambio de altura se produjo a raíz del terremoto,

FALLA LA LAJA



Figura B27

GEOLOGIA

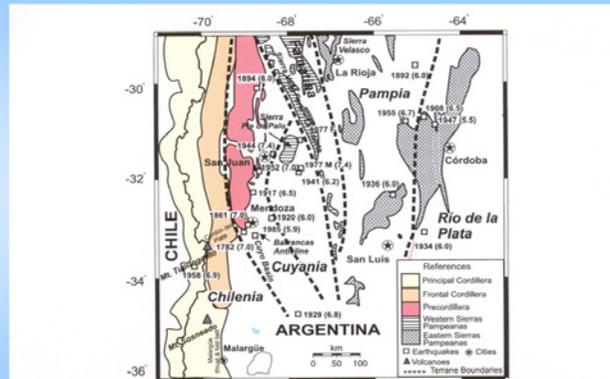


Figure 2. Main geological provinces, terranes and historical earthquakes (represented by the year of occurrence and magnitude in parentheses) are taken from all geological and seismic references cited in the text.

Figura B28

las curvas son elípticas en torno a la traza de la falla que es blanca y no es un modelo matemático, es el resultado empírico y muestra la variación del movimiento en una falla.

El terremoto de Las Melosas, ocurrió en El Cajón del Maipo, en un pueblo cercano, fueron tres terremotos, el mayor de 6,9; ocurrieron el 4 septiembre de 1958 (Figura B31), era día de elecciones presidenciales, estaba toda la gente esperando los resultados, ahí se eligió al Presidente don Jorge Alessandri.

Fue como a las 4:00 de la tarde. Ustedes ven los daños que hubo en El Cajón del Maipo, en tres terremotos asociados a fallas superficiales (Figura B32). En Chile, el terremoto con daños más significativos es este terremoto del año 58.

Acá está el registro de aceleraciones que se obtuvo en la Facultad de Ciencias, Físicas y Matemáticas, en el edificio de Física en el subterráneo, fueron tres eventos y la aceleración máxima fue de 5% de g en Santiago, pero está a 65 km de la falla, lo más importante para el daño es la cercanía a la falla(Figura B33).

Así que tenemos terremotos destructivos con este tipo de falla en Chile, y este fue el más representativo y no hubo más muertos porque hubo unos movimientos previos que ocurrieron en San Alfonso y San José de Maipo y Carabineros había evacuado la zona, así es que cuando ocurrieron los tres terremotos estaba evacuada la zona y por eso hubo tan pocos muertos en esa oportunidad (Figura B34).



Figura B29



Figura B31

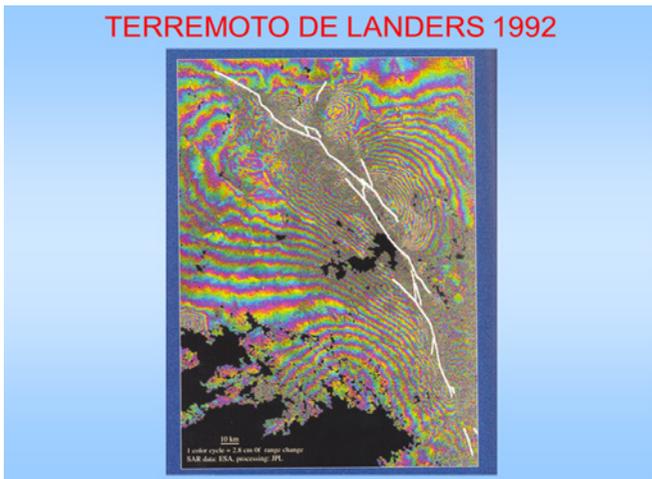


Figura B30



Figura B32

TERREMOTO DE LAS MELOSAS

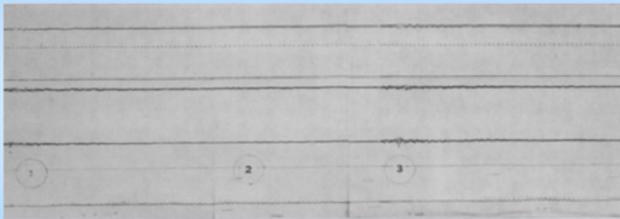


Figura B33

Sismicidad y Falla de los Grandes Terremotos Argentinos			
Tipo de Fuente Sísmica UBC 97			
Tipo de Fuente Sísmica	Descripción de la Fuente Sísmica	Definición de la Fuente Sísmica	
		Máximo Momento Magnitud, M	Razón de deslizamiento, SR (mm/año)
A	Fallas que son capaces de producir terremotos de gran magnitud y que tienen una alta sismicidad.	$M \geq 7.0$	$SR \geq 5$
B	Todas las fallas que no pueden ser clasificadas como A o C.	$M \geq 7.0$	$SR < 5$
		$M < 7.0$ $M \geq 6.5$	$SR < 2$
C	Fallas incapaces de producir terremotos de gran magnitud y que tienen además baja sismicidad	$M < 6.5$	$SR \leq 2$

Figura B34

Un terremoto muy importante en la zona en California el año 1994, ahí se descubrió que lo más importante es la distancia de la falla, se introduce en la norma un criterio de la distancia de la falla y que los primeros 2-5 km son vitales y la demanda sísmica son el doble de las normales que están la norma, así que el Uniform Building Code, el UBC 97 tuvo que ser cambiado completamente en Estados Unidos y clasificó la falla en tipo A, B y C. Para clasificar la demanda introdujo dos parámetros: el máximo momento de magnitud que estas fallas son de tipo 7 o mayores o entre 7 y 6 1/2 como vimos en Argentina, pero el más importante es el otro parámetro, asociado a si la falla se está deslizando, se está moviendo. Y aquí tenemos que el slip rate, es mayor de 5mm, entre 5 y 2, hay menores o iguales a dos.

Entonces, ésta es la clasificación y es muy importante (Figura B35), se hacen back-to-back estos dos parámetros y en una tesis doctoral en Argentina (Figura B36), tenemos clasificada las 27 fallas de Argentina; la mayoría son “B” pueden producir un terremoto 7 y mayor y pocas “A”, pero hay muchas fallas activas.

EN LA CALSIFICACIÓN SÍSMICA DE UNA FALLA, IMPORTAN DOS FACTORES:

- MAGNITUD DEL POTENCIAL TERREMOTO.
- RAZÓN DE DESLIZAMIENTO SR (mm/año).

Figura B35

FALLAS ARGENTINAS (FRAU, 2009)

Nº	Identif	Nombre	Tipo	Long km	Mag Max	Ancho km	Inclinación δ [°]	Ultimo Mov. años	Tasa Mov. mm/año	Cuant. Import.
1	AR-15	Piananta - Las Flores	Rancho	47	7.0	13.9	78E 7	<15000	<1*	B
2	AR-16	El Tigo	Rancho	153	7.6	19.8	78E	5200 IR	1 - 5	A
3	AR-18	La Dehesa	Inversa	62	7.2	21.9	58W 7	4000 IR	<1*	B
4	AR-19	Mardona - Acepcion	Oblicua	24	6.7	13.7	35E 7	4000 IR	0.2 - 1	B
5	AR-21	La Laja	Inversa	30	7.1	20.1	45SE	64 H	1 - 5	A
6	AR-22	Rincónada	Inversa	26	7.0	18.3	35E	46 H	1 - 5	A
7	AR-23	Las Barras	Inversa	19	6.6	12.2	35E 7	10000 IR	0.2 - 1	B
8	AR-25	Ampuésano - Niquetama	Inversa	6.7	7.4	22.7	72E-68W	31 H	<1*	B
9	AR-27	San Chacras - Valle Fértil	Inversa	69	7.2	23.0	52E	3000 IR	1 - 5	A
10	AR-28	Lan Pellan	Inversa	49	7.1	19.4	46E	<15000	<1*	B
11	AR-30	Cerro La Cal	Inversa	30.7	6.8	15.4	45W	1300 IR	1 - 5	B
12	AR-31	Capdevila - Borbollón	Inversa	15.9	6.5	11.1	70W	<15000	1 - 5	B
13	AR-32	Cerro de La Gloria	Inversa	7	6.5	9.5	76E	12500 IR	<0.2*	B
14	AR-33	Melocotón	Inversa	7	6.5	9.5	35W	<15000	0.2 - 1	B
15	AR-37	Barrancas Este	Inversa	18	6.8	15.2	70W	630 IR	1 - 5*	B
16	AR-38	Barrancas Oeste	Inversa	14	6.7	13.9	70E	630 IR	1 - 5	B
17	AR-42	Mantualitas	Rancho	35	6.9	12.7	75NS 7	<15000	<0.2*	B
18	AR-45	Las Malvinas	Rancho	68	7.2	15.5	75NE-58E 7	<15000	<0.2*	B
19	AR-48a	La Higuerita	Inversa	51	7.1	19.8	35E	<15000	<0.2*	B
20	AR-50	El Molino	Inversa	51	7.1	19.8	45E	300 IR	0.2 - 1	B
21	AR-51	Nano	Inversa	14	6.5	10.5	35W	<15000	0.2 - 1	B
22	AR-53a	Detorro de Garay - S. Pedro	Inversa	45	7.0	18.6	43E	<15000	<0.2*	B
23	AR-53b	Santa Rosa	Inversa	44	7.0	12.4	38E	<15000	<0.2*	B
24	AR-54	Stampacho	Inversa	14	6.5	10.5	70NE	<15000	<0.2*	B
25	AR-56	Lago Fagnano	Rancho	165	7.9	42.7	70E	61 H	5	A
26	AR-60	Zorilda	Inversa	45	6.7	14.2	56E	<15000	0.2	B
27	AR-61	Blancos, Sst. De Falla	Inversa	16.5	6.5	8.5	58E	<15000	<0.2*	B

(*) Tasa de Movimiento determinada a partir del diagrama de Skemnos.
IR: Intervalo de Recurrencia
H: Histórico

Figura B36

La falla San Ramón que es motivo de esta Conferencia (Figura B37), es una falla pariente de la falla que produjo el terremoto de Las Melosas en el año 58, la diferencia es que la falla del terremoto de Las Melosas es una falla ciega, no tiene expresión en superficie. Cuando pasó el gasoducto por ahí y se buscó la falla, se gastó un millón de dólares en inspección y no se pudo encontrar. En cambio, la falla San

Ramón, y estas figuras están tomadas del trabajo de Gabriel Easton Vargas, de su paper y él va a hablar más detalles de esto, es una falla cuya traza se extiende entre el río Mapocho y el río Maipo, tiene como 30 km de largo y va por la calle Paul Harris, por el costado del cerro Calán. Los que suben por la Calle General Blanche y llegan a un semáforo y la calle se pone horizontal; eso que se pone horizontal es el escarpe de la falla, la falla cruza una zona poblada y una zona sin poblar, y ese es uno de los grandes problemas, pero ésta es una gran contribución de la neotectónica chilena del grupo de geología de la Universidad de Chile.

gran destrucción, en cambio en el footwall o la pared de apoyo no hay daños. En la falla San Ramón el daño sería muy fuerte en el lado de la cordillera (Figura B39).



Figura B37

Esta es una trinchera que hizo Gabriel Easton Vargas (Figura B38), cerca de donde está la universidad Adolfo Ibáñez y se ve ahí una pequeña línea, es la traza de la falla. Él ahí encontró la falla, pero encontró, además, que esta falla se movió alrededor de 4-5 metros, usando estas técnicas luminiscentes y de carbono 14, (lo va a explicar en más detalle), este terremoto hizo una falla inversa, según este bloque que está hacia el lado de la cordillera, se levanta como 4-5 metros, pero han pasado 5.000 años entonces la erosión borró esta expresión en la superficie de ese lugar en que ocurrió ese terremoto.

Entonces, estas fallas tienen un problema con la magnitud y la intensidad que producen en zonas muy próximas a la falla en Santiago. El centro de Santiago no tendría tanto problema.

Aquí tenemos un terremoto en Pakistán la línea roja muestra la traza de la falla y el lado del hangingwall hay

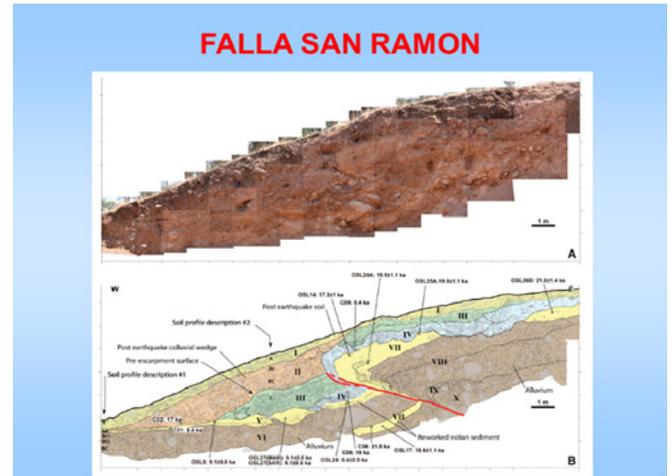


Figura B38



Figura B39

Vamos a ver terremotos similares que hemos inspeccionado. He inspeccionado como 8 de estos terremotos en el mundo, acá hay uno con 309 muertos en Italia en L'Aquila (Figura B40), este lo estudiamos en una tesis del Politécnico en Milano, la destrucción fue tremenda, en la foto se ve un colapso, porque las intensidades son muy altas, alcanzan a 10, cosa difícil de ver acá en Chile. Aquí se muestra el sistema de fallas (Figura B41), la falla que produjo este terremoto es la falla Paganica que está en el plano (Figura B42); el terremoto The L'Aquila, 6,3.

**The L'Aquila earthquake – 6th April 2009,
Mw=6.3**



Figura B40

**The L'Aquila earthquake – 6th April 2009,
Mw=6.3**



Figura B41

**The L'Aquila earthquake – 6th April 2009,
Mw=6.3**

The Paganica Fault

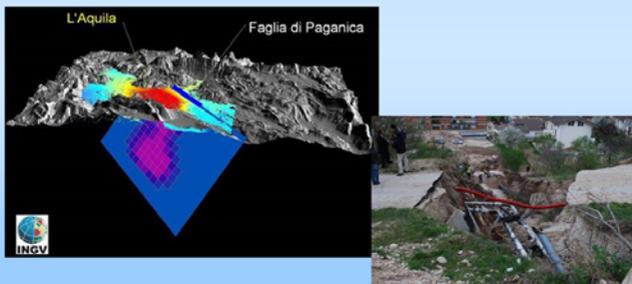


Figura B42

Un plano en la falla y como se corrió, aquí tenemos la falla que tiene como 30 km de largo sería como la falla San Ramón y es normal no es inversa, y acá tienen los corrimientos sacados por inversión por los sismólogos (Figura B43).

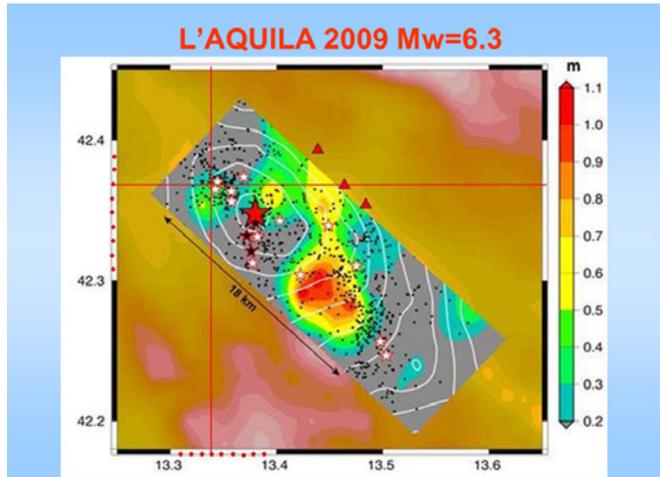


Figura B43

Entonces, aquí tenemos una diferencia en la ingeniería sísmica moderna y en la sismología, el epicentro es donde se inicia el terremoto, pero donde se emite la mayor energía es en la aspereza, que es el punto que está acá. Entonces no hay una concordancia entre epicentro y asperezas.

Esta es la inspección que estábamos haciendo en el terremoto L'Aquila, está todo reforzado para que no se caigan con las réplicas, todo el centro de L'Aquila, yo acabo de ir en el 2018, y todavía, casi diez años después, está prácticamente igual (Figuras B44 y B45).

La tesis que hicimos en el Politécnico de Milano, que comparamos con el terremoto de Chile (Figura B46).

Tenemos la sismicidad que está siempre asociada a fallas con distintos terremotos que ocurren, en este caso en Italia (Figura B47).

Comparamos el terremoto de subducción del 2010 con el terremoto de L'Aquila y como la falla es parecida a la falla de San Ramón, tiene 26 km de largo por 11 y el terremoto de Chile, del 2010 tiene 450 km por 200, entonces hay una diferencia muy grande, porque estos terremotos afectan un barrio, prácticamente una ciudad (Figura B48).



Figura B44

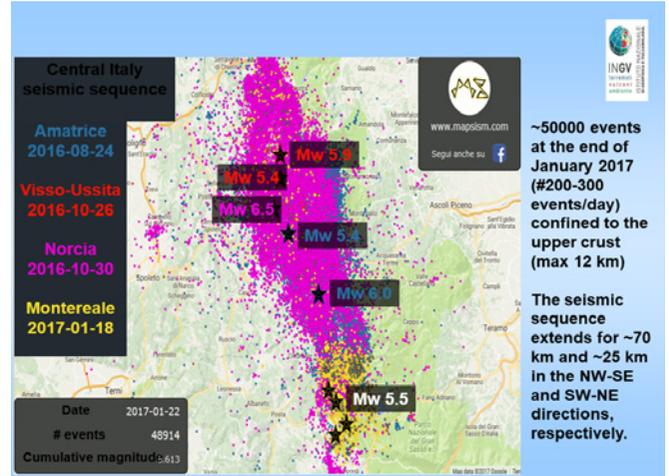


Figura B47



Figura B45

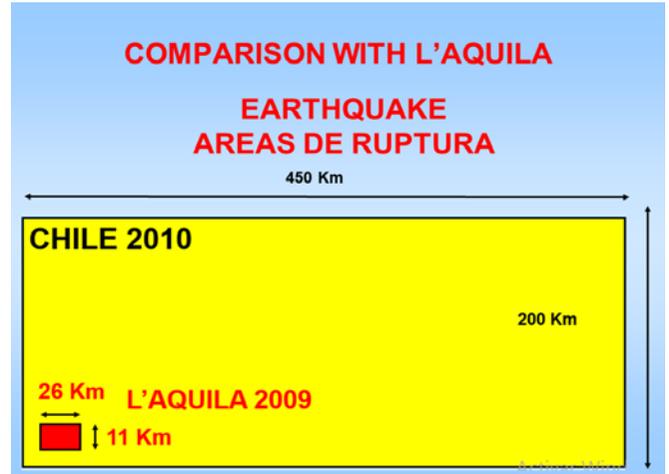


Figura B48



Figura B46

Cuando nosotros hablamos de terremoto de L'Aquila, es como hablar del terremoto de San Bernardo en Santiago, afecta un sector, pero con mucho daño, ese es el problema. En cambio, este terremoto del 2010, que tuvo una ruptura de falla 450 km, tiene una complejidad para nosotros mayor, porque afectó a las 3 principales ciudades de Chile: Concepción, simultáneamente a Viña del mar y Valparaíso y Santiago, entonces desde el punto de vista del riesgo sísmico este es un terremoto muy complejo por la extensión, pero estos otros terremotos asociados a fallas, son muy complicados por la gran destrucción que producen localmente.

Acá hicimos una comparación, esto teníamos que explicárselo al congreso italiano, al que nos invitaron en una oportunidad,

como aporte del gobierno chileno para distinguir esta diferencia entre los terremotos de Italia y Chile (Figura B49), y ustedes ven que el problema de los terremotos italianos es que están asociados a fallas y, por lo tanto, a una baja profundidad y que produce una gran destrucción; en cambio, en el caso chileno, tenemos magnitudes mucho mayores, acá es 7-8, 8 ½, 8,8, pero el epicentro es en el mar y con eso ya estamos lejos de la falla y generalmente están un poco más profundos, a 40 km y por eso a veces nosotros no entendemos cuando nos hablan un terremoto California que fue 6½ y hay una gran destrucción, eso porque acá un 6½ no produce grandes daños en general.

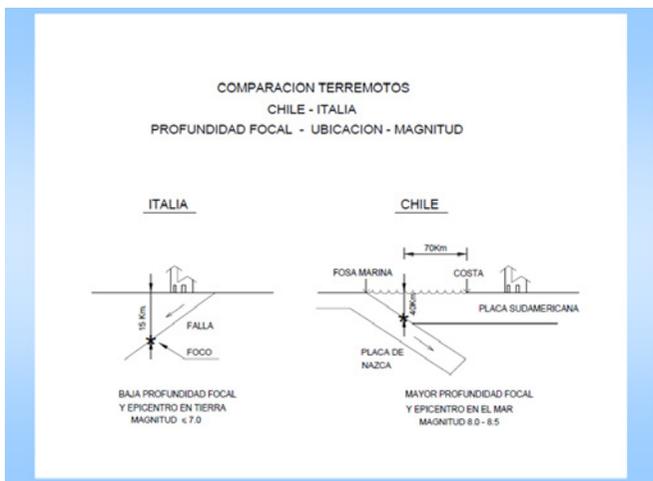


Figura B49

En la discusión de cómo incorporamos la falla a la normativa, porque la norma es la que da las regulaciones de cómo se deben construir las viviendas y los edificios en Chile y la de Magallanes Fagnano (Figuras B50 y B51), la cual hablamos de que produjo el terremoto del año 49, acá vemos está línea blanca que es la traza de la falla que se las mostré con el lago Fagnano que está acá, esta es una falla de rumbo, pero contacto de placa, no está dentro de la placa como es el caso de los terremotos anteriores.

Y esa falla está incorporada en la Norma Chilena, ésta es la Norma 433 y la 2369, la falla va a caer a la zona tres y está separada por distancia a la falla (Figura B52), hacia los dos lados, en cambio en la zona de subducción es toda hacia un lado y es hacia la cordillera. Porque aquí estamos reconociendo la presencia de la falla, entonces esto hace que Punta Arenas tenga la sismicidad similar de Santiago hasta zona dos.

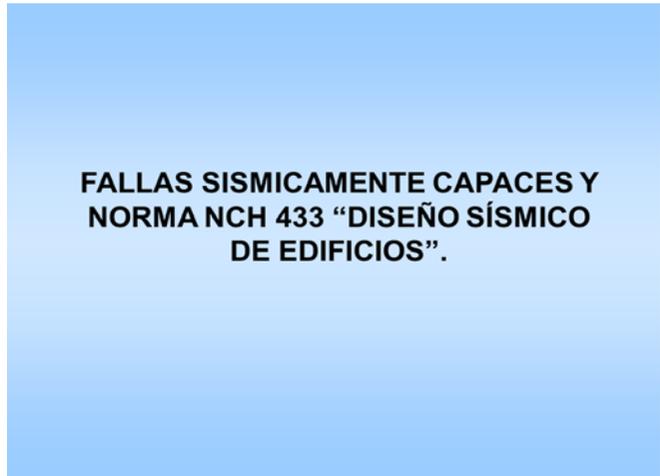


Figura B50



Figura B51

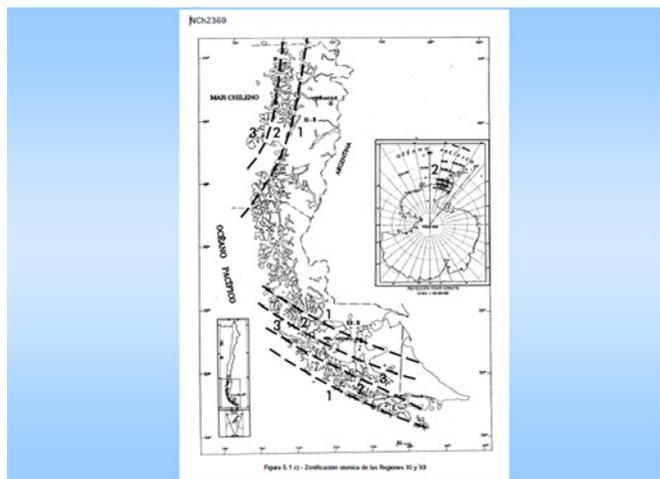


Figura B52

Ahora, la razón del deslizamiento. Esta falla en Magallanes estuvo en un estudio muy reciente que hizo el departamento de geología en la Universidad de Chile, midió con GPS y otras técnicas que se mueve a diez milímetros por año (Figura B53), en cambio la falla San Ramón es una falla lenta, de menos de un milímetro por año (Figura B54), entonces esto hace que la falla San Ramón o como la mayoría las fallas que se han encontrado, que salen hoy día, son fallas cuaternarias, que son muy lentas, menos de 1mm por año lo que se movía la falla.

Entonces, esto es lo que ha dificultado incluir el riesgo sísmico de la falla San Ramón en la norma de diseño de edificios, ¿pero por qué ocurren estos problemas?

Nosotros tenemos que mejorar la estimación del efecto la falla San Ramón, la evaluación de la falla tiene que basarse en la neotectónica, la fecha del último terremoto, eso en ingeniería es el dato más importante y con las técnicas que hemos copiado a Estados Unidos, en general se pierde esa información. Entonces cuando aplicamos técnicas de importadas de Estados Unidos, con fallas mucho más rápidas de las que tenemos en Chile, tenemos problemas. Y ese método es el método probabilístico poissoniano que no tiene memoria, tenemos que usar un método semimarkoviano de probabilidades conjuntas, para estimar mejor la probabilidad de terremotos futuros que puedan ocurrir en la falla San Ramón, y si lo hacemos con estas técnicas nos da la probabilidad de que ocurra el terremoto es mucho más alta y probablemente quedaría incorporado en la Norma.

Hubo una cosa que se manejó bien cuando se descubrió esta falla: que no se consideró que esta zona está poblada, es distinto si nosotros hubiéramos descubierto esta falla en una zona no poblada en que va a haber construcción en el futuro y eso queda cubierto por la norma, se declaró esta zona de riesgo y una vez que el Gobierno declara que es una zona de riesgo la Contraloría no permite sacar el riesgo de la zona por razones legales. Entonces, hay que considerar medidas de mitigación para las zonas pobladas que están en la traza de la falla, y la razón es que cuando uno anuncia esto hay un impacto negativo y es que baja el valor económico de la vivienda y a lo mejor no hay razones para que ello ocurra, porque puede ser que nosotros determinemos que el terremoto va a ocurrir en 500 años más y ¿por qué vamos a estar castigando el valor de las propiedades en este momento? Ese es un tema que son de las tareas futuras de riesgo sísmico de la falla de San Ramón (Figura B55).

RAZON DE DESLIZAMIENTO SR DE LAS FALLAS

- FALLA MAGALLANES FAGNANO: 10 mm/año
- FALLA SAN RAMÓN: < 1mm/año

ESTA CARACTERISTICA CUATERNARIA DE LA FALLA SAN RAMÓN NO HA PERMITIDO INCLUIRLO EN LA NORMA.

Figura B53

FALLA SAN RAMON

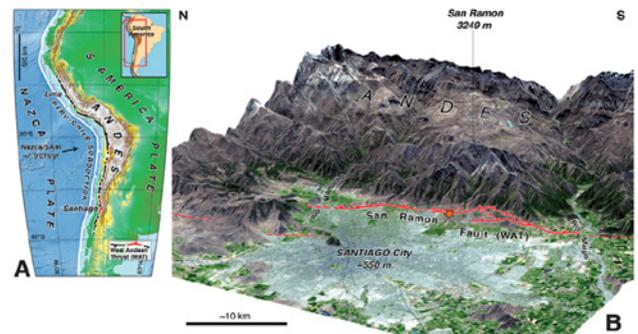


Figura B54

ELEMENTOS DE ESTUDIO FUTURO DEL RIESGO SÍSMICO DE LA FALLA SAN RAMÓN

- EVALUACION DE LA AMENAZA DE LA FALLA BASADO EN LA OCURRENCIA DEL ULTIMO TERREMOTO.
- NO CONSIDERAR MÉTODOS PROBABILÍSTICOS POISSONIANO (SIN MEMORIA) PARA EVALUAR LA AMENAZA.
- CONSIDERAR MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA LAS ZONAS POBLADAS DE LA TRAZA DE LA FALLA NO CONSIDERADAS POR LA NORMA.

Figura B55

Muchas gracias.

Al término de la Conferencia, los expositores respondieron consultas y comentarios de los asistentes. A continuación, reproducimos lo más relevante de estas intervenciones.

Sr. Nicolau.

—Muchas gracias, Profesores Saragoni e Easton, por una interesantísima charla, ha sido fantástico escucharlos; les puedo comentar que tuvimos un máximo de 415 personas conectadas, lo que es un récord para una conferencia del Instituto y que demuestra también el interés que despierta este tema, que por lo que ustedes han planteado es un tema al cual la autoridad de Gobierno debe abocarse de manera inmediata.

Sr. Luis Valenzuela.

—El hecho que la falla San Ramón muestre deslizamientos mínimos de un milímetro por año, no se puede incorporar a la norma sísmica, pero no impide que se tomen medidas de precaución, por ejemplo, elaborar recomendaciones urgentes a los colegios, universidades construidas en la falla, así como el reactor de La Reina, que sí está absolutamente cercano, porque no estamos hablando de normas de diseño, sino de tomar medidas de mitigación de daños para estructuras que acogen a muchas personas.

Sr. Easton.

—Muchas gracias por la pregunta. Quisiera reforzar que me parece que, más que la tasa de deslizamiento, lo importante es cuándo han ocurrido los últimos terremotos y hace cuánto tiempo ocurrió ya el último. La neotectónica se preocupa por ejemplo de las tasas de deslizamiento a escala cuaternaria, pero la paleosismología buscar profundizar en la datación de terremotos discretos en tiempos prehistóricos. En el caso de la Falla San Ramón el penúltimo gran terremoto ocurrió hace 17.000 años y el último hace 8.000 años, por lo que el escenario cambia radicalmente, es decir, no importa mucho que la falla tenga una tasa de deslizamiento moderada, que es del orden de unos 0,6 milímetros por año, sino que lo relevante es que ya ha pasado mucho tiempo desde el último gran terremoto en

esta falla y es ese el escenario y la probabilidad que debe ser considerada, de tipo tiempo-dependiente.

Sr. Martín Collin.

—¿Cómo debería la Autoridad nacional, regional y comunal regular el emplazamiento de obras y construcciones en zonas de fallas y que pueden hacer las personas en los lugares habitados en las zonas de las fallas que ya existen?

Sr. Saragoni.

—Hay fallas que son activas y se movieron en el Holoceno en los últimos 10000 años, fallas cuaternarias que son muy lentas, entonces esta falla está como en el límite, por eso tienen estos slip rate, estas tasas de deslizamiento tan pequeñas. Lo normal y lo que se hace en Estados Unidos, en las zonas que no están pobladas se recomienda que la franja en torno a la traza no sean zonas donde exista construcción, sino que se construyan parques, cosas por el estilo, pero en Estados Unidos están esperando un gran terremoto en la falla de Hayward que es al otro lado de la falla de San Andres de la bahía, y ahí la falla pasa por Berkeley, por la Universidad de California, ahí vemos los desplazamientos que están ocurriendo. Entonces el tratamiento tiene que ser distinto, uno de los que yo mencioné es para lo que está poblado, y eso hay que ser muy cuidadoso con respecto a la mitigación de la normativa, subsidio para reforzar lo que haya que reforzar, esa sería la actividad recomendable del Gobierno, pero tampoco impactar y provocar una reducción en la plusvalía de la propiedad, eso ocurrió en un terremoto que se anunció en Lima, donde no se vendieron propiedades en dos años y el terremoto no ocurrió, entonces hay que tener mucho cuidado en el manejo de esto. La norma lo único que cubre son las nuevas construcciones, entonces por eso yo separé, la mitigación de lo existente y plano regulador puede incluir eso, pero hay muchos desarrollos inmobiliarios que están aprobados, porque el plano regulador no considera la falla.

Sr. Easton.

—Nos parece muy relevante que el Plan Regulador Metropolitano de Santiago incorpore la Falla San Ramón; es algo que recomendamos ya en el informe de la Seremi

Minvu RM del año 2012, lo cual no ha ocurrido. ¿Por qué es importante eso? Entre otros porque los planes comunales requieren lineamientos regionales. Cuando hemos conversado con alcaldes de algunas comunas, las respuestas han sido “¿cómo nosotros vamos a incorporar la Falla San Ramón en nuestra comuna si el Plan Regulador Metropolitano de Santiago no la tiene incorporada?, inos van a tirar esto por la cabeza!” Entonces, efectivamente aquí falta una política pública ordenada que sea ambiciosa, relevante para la población, para lo cual se necesita la promulgación de una normativa regional de modo tal que en paralelo avancen también las medidas a escala comunal.

Sr. José Luis Arumi.

—¿Es efectivo que el terremoto de terremoto de Chillán de 1939, fue originado por una falla?

Sr. Saragoni.

—No, el terremoto de Chillán de 1939 es el terremoto que ha causado más muertos en Chile. Se ha estudiado, en detalle y es de estos terremotos en que se rompe la Placa de Nazca, son terremotos intraplaca, de profundidad intermedia, generalmente tiene una profundidad de 80-90 km, pero el epicentro ocurre bajo la ciudad, ese es el gran problema y alcanzan intensidades muy altas, grado 9 y es por lejos un terremoto de interplaca. Pero no está asociado a una falla, porque hubo ruptura de la Placa de Nazca. El terremoto de Tarapacá del 2005 es de esa familia también.

Pregunta.

—¿Será necesario agregar cambios urgentes a la nueva norma 433 considerando este tipo de falla?

Sr. Saragoni.

—Quiero explicarles que se hizo un esfuerzo muy grande en la norma, estudiándola en un comité que trabajó como dos años, donde están todas estas fallas activas que mencionó Gabriel, pero al calcularle el slip rate con los criterios que

se usan, salían de muy baja probabilidad, y se trató de ver si la falla San Ramón se podía incorporar. Se entregó el anteproyecto que está modificando la Norma 433 al Ministerio de la Vivienda y Urbanismo en enero del 2019 y ahora se entregó al Instituto Nacional de Normalización, pero no se ha incorporado la falla por este tema que he relatado, lo cual no quiere decir que no se puede, siempre se están estudiando de nuevo estas situaciones.

Sr. Easton.

—Quisiera enfatizar que tenemos una visión bien distinta en esta materia. Nuevamente, pensamos que no se trata de un asunto de tasa de deslizamiento, sino de la consideración de los eventos discretos que deducimos a partir del registro geológico y, más específicamente paleosismológico, que nos señala un escenario de amenaza muy preocupante para Santiago ante la potencial activación de la Falla San Ramón, que por cierto ocurrirá en algún momento. La tasa de deslizamiento de la Falla San Ramón es del orden de 0,6 milímetros por año. A lo anterior se suma el nuevo conocimiento que cada vez más tenemos sobre las fallas activas en nuestro país. Hoy día por ejemplo sabemos que la Falla Lliquiñe-Ofqui, que tampoco está considerada en la norma, tiene velocidades altísimas de deslizamiento, estimadas en hasta 24 mm por año en la parte sur y del orden de 18 milímetros por año hacia el norte. Por otro lado, de nuevo, no es lo mismo estimar una probabilidad a partir de una distribución normal que hacerlo considerando los antecedentes paleosismológicos que nos dicen cuándo fue el último evento, y luego la probabilidad tiempo-dependiente pasa a ser relevante. Nos parece que esta es una vía por donde se podría retomar la discusión para una modificación que priorice la seguridad de la población e infraestructura crítica.

Sr. Saragoni.

—Esa es la conclusión y, en todo caso, en los grandes proyectos de ingeniería, para que vean los cambios que ha habido en la Ingeniería, en la llamada a propuesta de grandes proyectos de ingeniería en Chile, se pide un estudio neotectónico, tiene que estar en el paquete a estudiar la actividad de las fallas vecinas a los proyectos, y yo estoy de acuerdo con que hay que cambiar la óptica, pero como ustedes vieron, la mayoría de aportes que se han hecho, son

todos muy recientes, no tienen más de diez años, entonces hay que incorporarlos.

En el último congreso nacional de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica realizado en Valdivia en 2018 se invitó a los neotectónicos para que expusieran los avances que había en la materia. Puedo contarles que cuando volví de Estados Unidos hace 50 años atrás, dije que las fallas se movían en Chile y los geólogos me decían que no, y un profesor de neotectónica tenía allá un programa de magister, pero hace 50 años los geólogos pensaban que las fallas no se movían en Chile, y no es que estuvieran equivocados, es que se mueven, pero muy lento. Con esta nueva disciplina que la explicó muy bien Gabriel, que nació en los 80-90, ahora hay técnicas que permiten ver estos movimientos y ubicar terremotos prehispánicos y, los paleosismológicos que ocurrieron hace miles de años, así que no hay una diferencia, yo creo que hay que visitar la falla San Ramón con los nuevos antecedentes, pero como dice Gabriel no solo esa falla porque ahora hay planos de otras fallas, porque tiene que haber planos de todas las fallas.

Pregunta.

—¿Cuál sería la magnitud del desplazamiento vertical esperado en un próximo sismo para la falla de San Ramón?

Sr. Easton.

—De acuerdo con las trincheras paleosismológicas estudiadas hasta ahora, estas muestran o permiten inferir desplazamientos del orden de 5 metros en cada terremoto a lo largo del plano de la falla, lo cual se traduce en desplazamientos verticales de 2 a 3 m en cada terremoto.

Pregunta.

—¿Y eso podría producir aceleraciones en torno al 08G que ustedes mencionaron?

Sr. Easton.

—Eso es lo que arrojan los resultados de las simulaciones, aceleraciones del orden de 0,8g o más en las cercanías de

la falla, y aceleraciones superiores a lo que considera actualmente la norma sísmica para buena parte de Santiago.

Pregunta.

—¿Hay estudios similares en el lado poniente de Santiago?

Sr. Easton.

—No hay ninguna evidencia aún de una falla activa en superficie en el sector poniente de Santiago, aunque sí hay alguna sismicidad y fallas propuestas desde la cartografía geológica, que sin duda tenemos que estudiar mejor; pero por ahora no hay evidencias.

Pregunta.

—La falla de San Ramón y la falla de Cariño Botado, ¿qué pasa entre ambas?

Sr. Easton.

—Al parecer, entre las fallas San Ramón, en Santiago, y Cariño Botado, en la depresión de la ciudad de Los Andes, hay fallas de transferencia y la deformación se torna difusa. No está claro que ambos sistemas se conecten en profundidad, o que se puedan conectar ante un sismo mayor, pero tampoco se puede descartar sobretodo, considerando el terremoto de Kaikoura en Nueva Zelanda en 2016, cuando varias fallas distantes varios kilómetros entre sí se activaron y se conectaron, generando una tremenda ruptura sísmica. No tenemos que visualizarlas las fallas geológicas como planos regulares, sino que son superficies irregulares en donde tenemos distintos segmentos que no necesariamente tienen que estar conectadas en superficie pero que pueden funcionar juntos produciendo grandes terremotos.

Sr. Juan Carlos Ulloa.

—¿Qué es interesante porque la relaciona con otra falla que también estaba a veces en las noticias. Sobre la continuidad de la falla, ¿si al norte tiene relación con la probable actividad de la falla Pucuro?

Sr. Easton.

—La Falla Pocuro fue conceptualizada como una falla distinta, probablemente de naturaleza normal, con evidencias muy antiguas de actividad, es decir, que afecta rocas de muchos millones de años. La Falla Cariño Botado se sitúa en el área de la Falla Pocuro, pero no es el mismo tipo de falla, no es el mismo concepto y, por lo tanto, junto con el equipo de la profesora Luisa Pinto, decidimos llamarla de otra manera, Cariño Botado, que es donde se manifiesta en superficie como una falla inversa y en donde además hemos logrado fechar el último terremoto que denota su carácter activo.

Sr. Nicolau.

—Bueno, hay una algunas preguntas, acerca de si esta presentación va a estar disponible. Sí, va a estar en la próxima revista del Instituto de Ingenieros, y ahí también vamos a dar respuesta a algunas otras preguntas que no tuvimos tiempo para responderlas en vivo.

No queda más que agradecer la extraordinaria, interesante y apasionante charla que ustedes nos han entregado, también es importante enfatizar la calidad de la investigación que se está haciendo en Chile en estos temas es a nivel internacional.

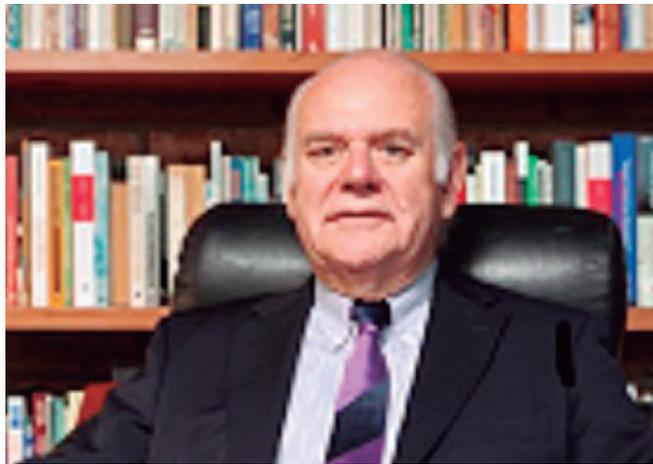
Ahora, el problema está en cómo usamos esta información para beneficio de nuestra sociedad y todo lo que tenga que ver con nuestras comunidades, nuestras ciudades, que sean más seguras y sostenibles, así que queda tarea por delante. Muchas gracias a los participantes y asistentes, llegamos a tener 415 personas conectadas, en este minuto hay un poco más de 300, ha sido un éxito completo, es lo que pretende siempre el Instituto de Ingenieros de Chile: difundir el conocimiento y los problemas del país, muchas gracias y muy buenas tardes.

Fin de conferencia.

EL DESARROLLO SOSTENIBLE Y LA PRESIÓN DE LOS STAKEHOLDERS

El ejemplo de los recientes cambios en la gobernanza de los depósitos de relaves en la industria minera mundial y el significativo impacto a nivel global

Conferencia del Sr. Luis Valenzuela Palomo, Consultor Geotecnia y Presas Relaves.



Sr. Luis Valenzuela Palomo.

El día jueves 27 de mayo de 2021 a las 11:00 horas, vía Zoom, se dio inicio ante una gran cantidad de asistentes, a la conferencia del Sr. Luis Valenzuela Palomo con el tema: “El Desarrollo Sostenible y la Presión los Stakeholders. El ejemplo de los recientes cambios en la gobernanza de los depósitos de relaves en la industria minera mundial y el significativo impacto a nivel global”.

El Sr. Valenzuela es Ingeniero Civil Estructural de la Universidad de Chile. Master of Science en Mecánica de Suelos del Imperial College of Science and Technology de Londres, tiene más de 45 años de experiencia profesional en proyectos de infraestructura pública, industrial y minera, estudios geotécnicos y fundamentalmente en presas de agua y de relaves mineros. En 1981 junto a dos socios fundo Geotécnica Consultores, empresa de ingeniería reconocida en Chile e internacionalmente, hoy día Arcadis Chile. Desde el año 2016 actúa como consultor independiente, especialmente en relación a presas de relaves en Canadá, Brasil y Chile. Fue presidente de la Sociedad Chilena de Geotecnia, Vicepresidente para América del Sur de la Sociedad Internacional Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica y Presidente del Instituto de Ingenieros de Chile en los años 2004-2005, además de otras entidades.

Actualmente es miembro del ICOLD International Commission on Large Dams, y hoy día Presidente del Comité de Seguridad de Presas de ICOLD Chile. Es miembro de número de la Academia de Ingeniería de Chile y miembro correspondiente de la Academia de Ingeniería de Argentina. En 2015 presentó la Conferencia Casagrande, un honor que pocos mecánicos del suelo en el mundo tienen. En 2011 recibió el Premio de Infraestructura del Colegio de Ingenieros de Chile y en 2015, la Medalla de Oro del Instituto de Ingenieros de Chile.

El Presidente.

—Muy buenos días a todos los que hoy, hoy tenemos el honor de tener a don Luis Valenzuela Palomo, Ingeniero Civil, en una charla que creo que va a despertar un gran interés en ustedes, se titula: “El Desarrollo Sostenible y La Presión de los *Stakeholders*”, con un ejemplo reciente de la minería mundial.

Sr. Luis Valenzuela.

—Buenos días, señor Presidente, muchas gracias por su presentación, quisiera agradecer también al Directorio del Instituto de Ingenieros de Chile por haberme dado la oportunidad de presentar esta conferencia y agradecer la presencia de todos los que hoy están asistiendo a la conferencia (Figura 1).



Figura 1

El tema requiere una explicación primero de que se entiende por *stakeholders* (Figura 2).

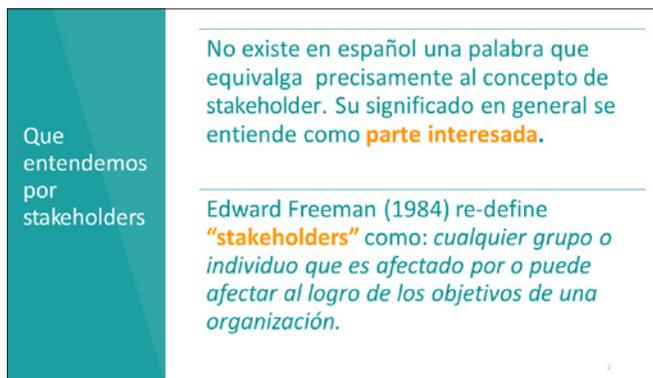


Figura 2

La definición del significado de *stakeholder* que vamos a usar en la conferencia es la de Edward Freeman en el año 1984: *stakeholder* se refiere a cualquier grupo o individuo que es afectado por o puede afectar al logro de los objetivos de una organización. En este caso hoy día hablaremos de empresas. Y aquí, vale una explicación, si bien el ejemplo que vamos a dar es de minería me ha parecido conveniente presentar ese ejemplo dentro de un contexto más amplio, que es el contexto de la empresa industrial y su relación con el entorno y los *stakeholders*.

En general se acepta que la empresa industrial es aquella que realiza un proceso de transformación. El inicio de las empresas industriales está asociado con la Revolución Industrial, alrededor de la década de los años 1750, con la invención de los primeros telares semiautomáticos que permitían producción en gran escala y eso, en conjunto con el invento de la máquina de vapor por Santiago Watt, que permitió motorizar distintos equipos o máquinas (Figura 3), inclusive los telares, y que llevó a una explosión en la producción de muchos bienes. Sin embargo, hay que tener presente que no es totalmente cierto que la empresa, en su concepto más amplio comenzó con la Revolución Industrial, ya que existía otro tipo de empresas desde mucho antes, principalmente las empresas comerciales. Lo que trato de establecer es que la Revolución Industrial permitió un nuevo tipo de empresa, la industrial, que tuvo una muy rápida expansión y crecimiento.

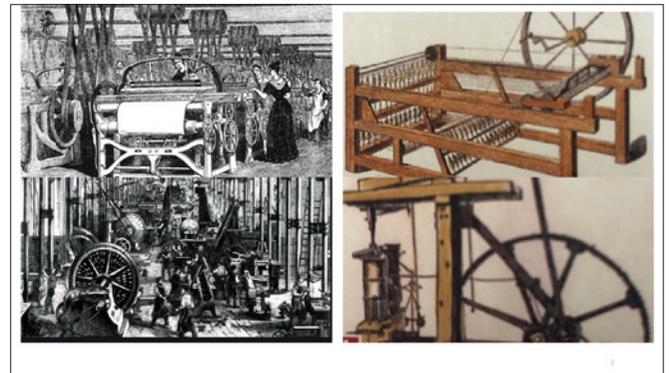


Figura 3

Entre los siglos XVII-XVIII había un fuerte desarrollo de la actividad comercial (Figura 4), principalmente alrededor de Europa y de algunos países asiáticos, y un desarrollo bastante grande de empresas comerciales. Había empresas comerciales importantes en varios países del mundo

y también en el desarrollo de la banca, pero es a fines del siglo XVIII e inicios del siglo XIX que comienza a tener una presencia significativa la empresa industrial, como consecuencia de la Revolución Industrial que ya comentamos. La Revolución Industrial se expandió por toda Europa, Inglaterra, Alemania, Francia principalmente y a Estados Unidos a los pocos años.

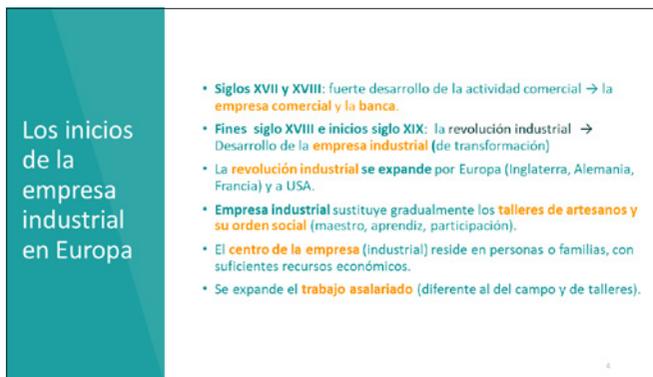


Figura 4

Cuando me refiero a Alemania, debemos recordar que no existía como un solo país en la época a que referimos en este momento, fines siglo XVIII y siglo XIX, ya que tuvo muchos cambios, desde el Reino de Prusia, y varias otras denominaciones.

La empresa industrial en su inicio sustituye gradualmente a los talleres de artesanos y, lo que es importante, los talleres de artesanos y la organización social asociada. Estaba el maestro y los aprendices y todos ellos, como parte del taller, participaban en la ejecución de los productos y en la participación inclusive de los beneficios de esa sociedad. Al inicio, el centro de la empresa se forma con personas o familias que tuvieron los suficientes recursos económicos para iniciar esas primeras empresas industriales.

Una de las características de estas nuevas empresas industriales es el cambio social evidente frente a los talleres de artesanos, representado por el trabajo asalariado, que comienza por primera vez a existir en forma importante llegando a constituir una gran masa de trabajo que labora en estas empresas por un salario, lo que representa un cambio social importante.

¿Cuáles fueron las reacciones? Cualquier empresa o cualquier organización en realidad siempre tiene un impacto o

un efecto en el entorno, y a veces, y principalmente en el caso de la empresa industrial, ese impacto en el entorno produce o puede provocar una reacción hacia la empresa. La primera reacción importante frente a la empresa industrial se relaciona con el trabajo asalariado y su impacto en la relación de la empresa con los trabajadores. Esto despierta el interés por la parte social, sobre todo de parte de los intelectuales y religiosos, preocupados por mejorar las condiciones de trabajo.

También hay reacciones de parte del Estado que trata de controlar los movimientos sociales que se manifiestan, pero también restringiendo con leyes o edictos el quehacer de la empresa para, por ejemplo, prohibir prácticas consideradas inaceptables, para determinar impuestos, etcétera. O sea, hay una relación importante entre la empresa y el Estado, y este último puede considerarse un *stakeholder* que puede poner condiciones o presionar por condiciones. Debido a eso nacen los sindicatos o movimientos políticos, con orientación en general negativa respecto a la empresa industrial, precisamente por las condiciones de trabajo. Sólo para dar un ejemplo, en los inicios de este proceso en los años 1800, en lo que llaman el capitalismo de Manchester, en la ciudad de Manchester se formaron muchas industrias que tuvieron problemas con sus trabajadores y en el año 1802, Manchester penaliza el trabajo nocturno infantil, algo que hoy nos parece súper evidente. En el año 1824 se aprueba el derecho a huelga y el derecho de agrupación de los trabajadores, dando origen a lo que serían los futuros sindicatos y en 1842, se prohíbe el trabajo en las minas a niños y mujeres. La industria minera existía desde antes de que naciera la empresa industrial, pero tuvo un crecimiento explosivo de sus actividades por las demandas, precisamente de la nueva empresa industrial (Figura 5).

Es interesante ver que todo el desarrollo de la empresa industrial a fines del siglo XVIII y durante todo el siglo XIX se dio en un contexto extremadamente complejo, en donde existían movimientos filosóficos, políticos y económicos importantes. Esto se ha reseñado en la Figura 6.

Cabe destacar, por ejemplo, la publicación de Adam Smith, en 1776, junto con el nacimiento de la empresa o en la misma época, de su famoso libro La Riqueza de las Naciones, que se asocia con el nacimiento del liberalismo y que influye hasta el día de hoy. Luego otros filósofos y economistas como David Ricardo, ambos absolutamente vigentes en las discusiones hasta hoy. Se puede decir que el concepto del capitalismo nace como consecuencia del

desarrollo de la economía y en cierto modo apoyado por las ideas del liberalismo.

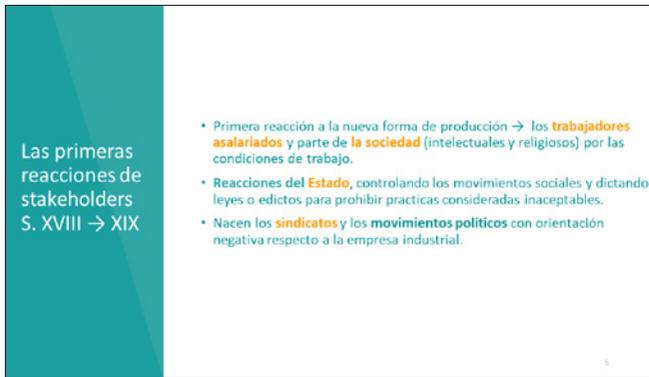


Figura 5



Figura 6

Y como resultado de los movimientos sociales, se comienza a formar el movimiento socialista. Los economistas y sociólogos Karl Marx y Friedrich Engel publican en 1848 el libro Manifiesto Comunista, que va recogiendo lo que ellos estimaron eran los efectos negativos del capitalismo y lanzan este manifiesto en defensa del movimiento laboral. Más tarde, Karl Marx, en 1867, publica el libro de economía El Capital, donde se analizan los detalles relacionados con la empresa industrial y sus defectos, a pesar de que reconoce las ventajas económicas de la organización de las empresas en torno al capital. Uno de los aspectos que Karl Marx destaca es la cantidad de accidentes que había en esas industrias, donde no había preocupación por la seguridad de los trabajadores. Eso lo ha superado la industria y hoy día es un tema prioritario en las empresas, pero como veremos más adelante, todavía subsisten algunas manifestaciones.

Vale la pena destacar lo compleja que era la época de la que hablamos, fines de siglo XVIII y siglo XX. En el año 1789 estallaba la Revolución Francesa; las guerras Napoleónicas entre el año 1792 hasta 1814; la Independencia de Estados Unidos y luego la primera Constitución de Estados Unidos en el año 1787; en el año 1806 se disuelve el Sacro Imperio Romano-Germánico; y en 1830 se produce la Revolución de Julio en París.

En el año 1848 había revoluciones y revueltas en toda Europa y, en 1861 la Guerra Civil en Estados Unidos, que tiene como una de sus consecuencias la abolición de la esclavitud. La esclavitud estaba asociada a la producción de algodón y Estados Unidos era el principal proveedor de esa materia para la industria textil, que estaba en expansión en esa época.

Ya a fines del siglo XIX se aproximaba lo que serían los movimientos revolucionarios en Rusia.

A pesar de lo extremadamente complejo del contexto en que se desarrollaba la empresa en estos primeros 100 años, desde principios del siglo XVIII al siglo XIX, ya los diferentes *stakeholders* se van manifestando y ejerciendo presión sobre la empresa industrial haciéndola adaptarse o modificarse. Algunos de los *stakeholders* que ejercían presiones en esa época son: los trabajadores, los sindicatos, los Estados, los proveedores de materia prima, y el mercado. En esa época hay un gran desarrollo de una burguesía capitalista, que además constituye una nueva demanda, al mismo tiempo que invierte en nuevas empresas. Además, crece un nuevo gran mercado alimentado por las frecuentes guerras y el crecimiento de las propias empresas que demandan acero para las máquinas, cañones, armas, barcos y otros medios de transporte que sustentaban las invasiones y las guerras a través de Europa con textiles y alimento para las tropas (Figura 7).

En resumen, podemos decir que la empresa industrial se desarrolla en forma relativamente rápida y en gran forma, pero dentro de un contexto de gran inestabilidad política, social y económica, que implicaba que la empresa recibiera múltiples presiones de los *stakeholders* involucrados en esas acciones. A pesar de esto, las empresas y el capital crecen y se expanden y ya a mediados del siglo XIX la expansión de la industria en Estados Unidos es muy importante.

En general ya a partir del siglo XIX, se puede observar que hay en un proceso de evolución de la empresa (Figura 8) en

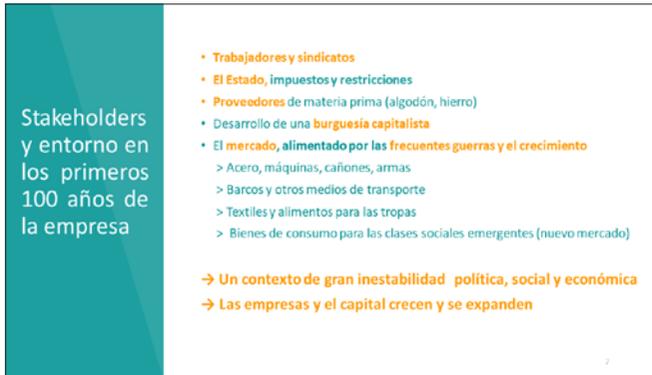


Figura 7



Figura 9

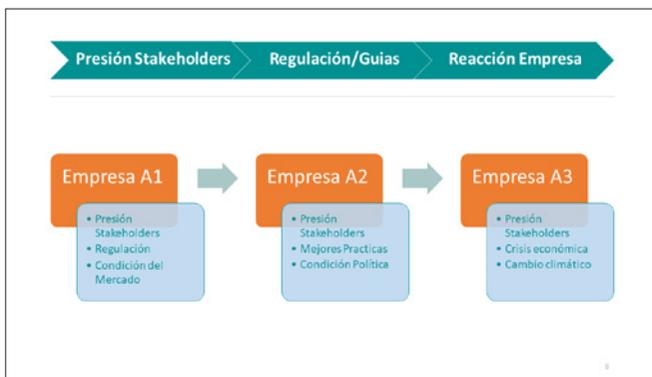


Figura 8

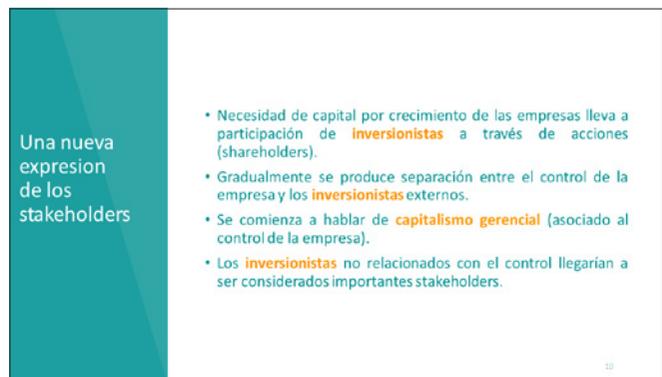


Figura 10

que en una empresa A en su fase 1, la presión de *stakeholders*, regulaciones de parte de la autoridad y condiciones del mercado hacen que se modifique o adapte a una conformación en una fase siguiente, fase 2, pasando a ser la empresa A2. Estas presiones son de diferente índole por ejemplo la presión de los *stakeholders* por mejores prácticas, condiciones políticas e internacionales como restricción al acceso a determinados mercados, guerra entre los países de Europa. En ocasiones se pierden mercados, en otras se ganan nuevos mercados. Esto representa una presión constante que va haciendo que la empresa vaya evolucionando en algún sentido. El esquema simple de la Figura 8 muestra que en general el proceso se inicia con la presión de los *stakeholders*, lo que luego puede incidir en nuevas regulaciones, leyes o guías o alguna otra acción restrictiva. La empresa rara vez toma una iniciativa de modificación, anticipándose a la presión de los *stakeholders*, sino que en general está en una posición de reacción, lo cual es una posición desventajosa, ya que no siempre puede anticipar de forma correcta los problemas que va a tener a futuro.

Veamos nuevas presiones de la sociedad que se manifiestan principalmente en el siglo XX (Figuras 9 y 10), independientemente de que, en ese siglo, tenemos todavía la acción de las guerras mundiales en el 1914 y en el año 1938, por las cuales se mantiene la misma inestabilidad que había en el siglo anterior, pero ya con la empresa industrial mucho más desarrollada. Recordemos que a inicios del siglo XX la industria Ford y otras empiezan a producir vehículos de transporte, además de equipo de guerra. Esto marca un cambio, hacia una empresa industrial mucho más sofisticada y el crecimiento de estas empresas hace necesario mayor capital, lo que lleva a un gran crecimiento de las sociedades por acciones, donde inversionistas individuales o agrupaciones aportan dinero a un cierto grupo para que lleve adelante una empresa, pero sin que los múltiples inversionistas, tengan ahora el control de la empresa, sino que hay un grupo que controla la empresa y parte del capital y el otro son inversionistas que aportan capital adicional pero no acceden al control, ahí nace lo que se llama el capitalismo gerencial.

Es decir, el manejo de esas empresas capitalistas lo decide el grupo gerencial que tiene el control, los inversionistas actúan desde fuera como *stakeholders* como veremos más adelante. A partir de las tres primeras décadas del siglo XX empieza a haber presiones del tipo social generalizado, es decir no enfocadas en un aspecto específico sino más bien una preocupación de los niveles académicos, intelectuales e inclusive de grupos religiosos, sobre el impacto negativo que tendría el quehacer de muchas empresas, en relación a la sociedad en general. Por ejemplo: en el medio ambiente, en situaciones de disconformidad social. Ya en las décadas de los años 30-50 se discute la posible responsabilidad social de las empresas y algunas empresas comienzan a adoptar algunos elementos de responsabilidad social empresarial, pero, principalmente como un elemento de marketing y no como la adopción de una filosofía o de política real. Entre los años 50-80 hay mucha más discusión e inclusive hay varios casos de denuncias del uso del concepto de responsabilidad social por parte de algunas empresas en acciones de marketing, existiendo abundante bibliografía al respecto.

Sin embargo, siguió la presión de parte de la sociedad y muchas más Compañías fueron adoptando el concepto de responsabilidad social empresarial, pero había detractores; siendo el más conocido Milton Friedman, y su conocido artículo en el New York Times en el año 1970 que decía: “La responsabilidad social de los negocios es aumentar sus beneficios o sus utilidades, no es papel de la empresa estar preocupándose del aspecto social” (Figura 11).

Una nueva "exigencia" o presión de la sociedad: responsabilidad social de las empresas (RSE)

- Etapa 1930 a 1950, mucha literatura y discusión y sólo algunos **ejemplos de aceptación** más global de RSE.
- Entre 1950 y 1980 el concepto y aplicación de **RSE toma forma y fuerza**, pero también detractores.
- M. Friedman (1970). *The social responsibility of business is to increase its profits*. New York Times.
- R.E. Freeman (1984). *Strategic management: A stakeholder approach*. Contribución a la discusión de **ética de negocios**.
- BSR (1992). *Business for Social Responsibility*, agrupación ejecutivos por **Implementación de RSE**.
- ONU (1999). *UN Global Compact*. Los 10 principios.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). 2001. *Corporate Responsibility: Private Initiatives and Public Goals*. Paris: OECD.

11

Figura 11

Sin embargo, a pesar de estos detractores el movimiento de responsabilidad social de las empresas siguió adelante y hay algunos hitos importantes como el de R.E. Freeman que,

en 1984, edita una publicación sobre manejo estratégico con el enfoque de los *stakeholder*, reconocida como una contribución a la discusión de la ética del negocio. En el año 1992 una agrupación de ejecutivos de empresas forma la sociedad Negocios para la Responsabilidad Social, que trata de difundir dentro de sus pares, los conceptos de implementación de la responsabilidad social (CSR), demostrando que era un buen negocio adaptarse a la CSR, no sólo por razones morales sino también económicas. Finalmente, Naciones Unidas acoge algunas de estas propuestas y algunas publicaciones como la de la OCDE en el año 2001 que habla de la responsabilidad social corporativa de las iniciativas privadas y los objetivos públicos.

El concepto de responsabilidad social de las empresas es algo que está vigente hasta el día de hoy y es adoptado por muchas empresas y tiene ciertas características especiales como se indica en la Figura 12. T.M. Jones en el año 1980 indica que la responsabilidad social corporativa es un concepto en que se reconoce que la empresa tiene una obligación con los grupos que componen la sociedad. Esta definición incluye 2 aspectos críticos: primero, que la responsabilidad social de la empresa tiene que ser voluntariamente adoptada; segundo, se trata de una obligación de carácter amplio que se extiende más allá del tradicional deber frente a los accionistas, ya que tiene que incluir a otros grupos de la sociedad, tales como, clientes, empleados proveedores, comunidades vecinas y el entorno a la empresa. En el fondo durante el siglo XX o la segunda parte del siglo XX, la empresa ya está reconociendo la importancia de la licencia social para poder operar. Adoptar la responsabilidad social por parte de su empresa, le permite tener la licencia o permiso social para seguir actuando en el campo en que esa empresa opera.

Responsabilidad social de las empresas RSE

T. M. Jones (1980)

- Responsabilidad Social Corporativa responde al concepto que las empresas o corporaciones **tienen una obligación** con los grupos que componen la Sociedad, además de los accionistas y más allá de lo que prescriben la ley y los contratos sindicales.
- Dos aspectos de esta definición son críticos:
 - > Primero, la obligación debe ser **voluntariamente adoptada**; comportamientos influenciados por las fuerzas coercitivas de la ley o contratos sindicales no son voluntarios.
 - > Segundo, se trata de una **obligación de carácter amplio**, que se extiende más allá del tradicional deber frente a los accionistas al incluir otros grupos de la Sociedad, tales como clientes, proveedores, empleados y comunidades vecinas.

Se reconoce la importancia de la licencia social para operar

12

Figura 12

Estos son conceptos que hoy día están plenamente vigentes. En la Figura 13 se incluye un esquema que muestra la importancia de la obtención de esa licencia social, en este caso para un caso particular de la minería en el norte de Canadá, donde me tocó participar en un proyecto en la provincia de Yukon en Canadá, cerca de la frontera con Alaska. El esquema da una idea además de los varios stakeholders involucrados en un proyecto, y ya en la etapa de factibilidad y de aprobación ambiental, muchos años antes de que el proyecto comience a operar.

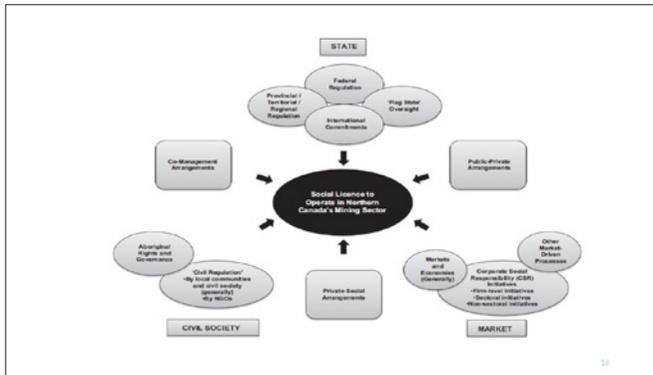


Figura 13

El concepto de responsabilidad social de la empresa evolucionó gradualmente a lo que es el concepto de sustentabilidad (Figura 14), que primero se aplicó como un análisis de la sustentabilidad económica referida a un determinado negocio o proyecto y después, a partir de los principios de H. Daly, de los cuales cito uno: “ningún recurso renovable deberá utilizarse a un ritmo superior al de su generación”, que por supuesto no es totalmente aplicable, pero nos da una idea de las preocupaciones del año 1938. Más tarde, el concepto de sustentabilidad se amplió desde una proposición económica referida al uso correcto de los recursos naturales al concepto de sostenibilidad, que es más amplio en su objetivo que el concepto de sustentabilidad. A pesar de que las dos palabras etimológicamente son muy similares, el concepto de sostenibilidad incluye no solamente los recursos naturales, sino a todos los procesos humanos, sociales, educativos, culturales, económicos, que se desarrollan en un ambiente de equidad y globalidad.

El concepto amplio de sostenibilidad partió con el Informe Brundtland en la reunión del World Council for

Environmental Development (WCED), en el año 1987, concepto que rápidamente va adoptando la sociedad cuando crecen las preocupaciones ambientales, que involucraron diferentes ámbitos y organismos internacionales, como el WCED y la propia ONU (Figura 15), que participan activamente en desarrollar y difundir estos principios. El hito más importante es la asamblea de Naciones Unidas del año 2015 que aprueba los objetivos del desarrollo sostenible (ODS). Fueron aspectos sociales, culturales y económicos, los que sustentaron los conceptos del desarrollo sostenible, entendiendo este, no como un objetivo fijo, sino como una ruta; una ruta al futuro a través de la sostenibilidad. También se van incorporando, a medida que aparecen, nuevos elementos como el cambio climático, la biodiversidad, la reducción de desastres naturales y el consumo sustentable, llevando a que el concepto de sostenibilidad sea cada vez más complejo, pero más amplio y cada vez va obteniendo un mayor apoyo a nivel global, precisamente a través de organismos como Naciones Unidas.

Figura 14

Figura 15

En Chile hay una Ley Orgánica Constitucional del Medio Ambiente, la N°19.600 del año 1994, y por medio de un instructivo presidencial del año 1996, indica la estrategia de desarrollo sustentable en Chile y las condiciones básicas que permiten compatibilizar el proceso del crecimiento económico con la protección del medio ambiente y el uso sustentable de los recursos naturales. Destaca los tres pilares que soportan el desarrollo sostenible: desarrollo económico, desarrollo social y desarrollo ambiental.

En la Figura 16 se muestran los 17 objetivos del desarrollo sostenible ODS, sobre el grado de cumplimiento de ellos, Chile informa anualmente a la CEPAL, consignándose el grado de cumplimiento alcanzado en cada uno de ellos.



Figura 16

La imagen de la Figura 16 está en un Informe del Consejo Minero en el que, para su evaluación de la industria minera en un cierto año, se explicita cómo van avanzando en la obtención de los ODS. Este es un elemento que, si bien no es una ley en términos formales, sí es un compromiso que ha aceptado la sociedad y que está cumpliendo gradualmente.

Se verá ahora a un caso de la industria minera, que es la industria cuyo impacto en el entorno es el más fuerte. Hay otras industrias como la forestal, de la celulosa, por ejemplo, que también tienen un impacto grande, territorial, social y que tienen un claro impacto en el medio ambiente. Sin embargo, nos vamos a referir específicamente a la industria minera mundial (Figura 17) cuya importancia económica es enorme.

La industria minera está presente prácticamente en todas las regiones del mundo y las reservas mineras son cuantiosas en muchos continentes. En algunos de ellos su

explotación está recién empezando a niveles importantes como es el caso de África. Hay regiones como Mongolia donde actualmente se están descubriendo yacimientos muy importantes, inclusive algunos que podrían competir con sus reservas con los yacimientos cobre en Chile.

A continuación, se verá lo referente a las producciones de cobre y hierro en el mundo y la posición relativa de Brasil y Chile en la explotación de esos minerales y después volvemos a lo mundial. La Figura 18 presenta el caso del cobre y la posición destacada de Chile.



Figura 17

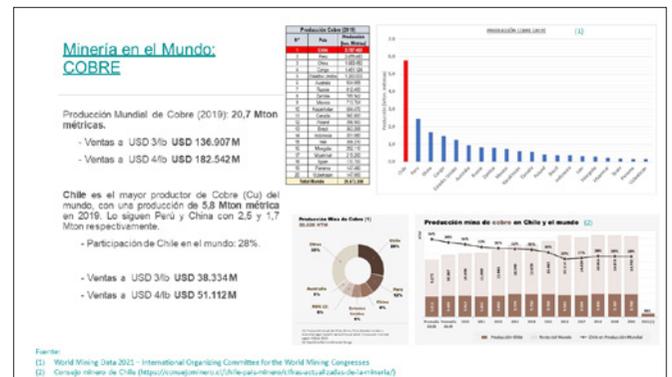


Figura 18

Chile es el mayor productor de cobre a nivel mundial y como se ve la producción de Chile (al año 2019) representa más o menos el 28 por ciento de la producción mundial total de 20.7 millones de toneladas métricas. El valor de mercado de ese metal se presenta para dos niveles de precio, de 3 dólares la libra y 40 dólares la libra. Para un precio de 4 dólares, los ingresos corresponderían a 51.000 millones de dólares.

El otro caso que es importante para la región de América del Sur es la minería del hierro (Figura 19), en la que Brasil ocupa el segundo lugar, después de Australia, con 255 millones de toneladas y una producción total mundial de 1.500 millones de toneladas. El valor de las ventas del hierro al precio de hoy día, le producirían a Brasil del orden de 43,00 millones de dólares.

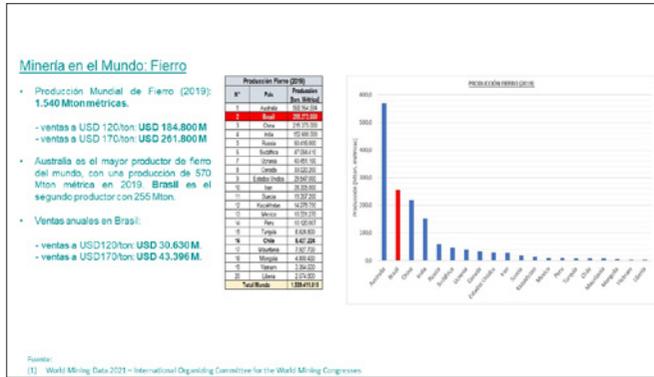


Figura 19

Se comentará sobre la producción de relaves mineros en la industria (Figura 20).



Figura 20

En los últimos años ha estado en la discusión pública la seguridad de los depósitos de relaves mineros, principalmente por lo que ha ocurrido en Brasil. Si bien hay otros impactos significativos de la minería, como la contaminación de los suelos, el impacto de los relaves ha tenido una especial atención, por el efecto que tiene sobre el territorio, ya que en general ocupa una cantidad de terreno importante y, por lo tanto, puede tener un gran impacto sobre las comunidades aledañas.

En general junto con el aumento del volumen y profundidad de la explotación, en la medida que se va extrayendo el cobre, van disminuyendo las leyes y para los efectos de mantener el nivel del negocio, hay obligación de tener una mayor producción de roca mineral para poder compensar la caída en ley (Figura 21).

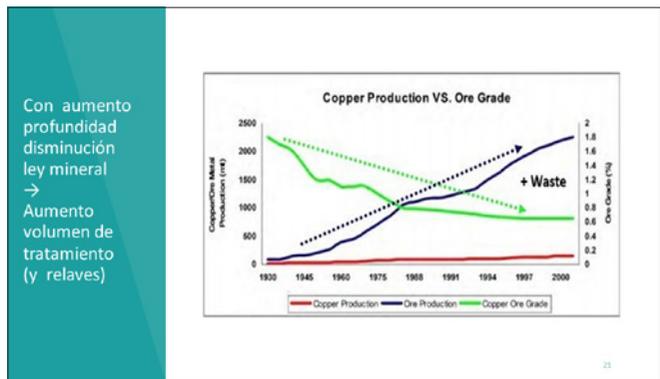


Figura 21

Por lo tanto, la consecuencia inmediata es el aumento del volumen de producción del tratamiento del mineral y por lo tanto del volumen del relave, aun manteniendo el mismo nivel de producción de cobre fino.

Para dar una idea de las cantidades de las que se está hablando (Figura 22); una mina mediana de cobre en Chile que trata mineral 100.000 toneladas/días (Escondida trata más de 400.000 toneladas por día). Ahora, si consideramos que las leyes son del orden del 1% y que cerca de un 8% de ese porcentaje queda remanente en el concentrado, de cada 100.000 toneladas de mineral tratado, se producirían 97.000 toneladas de relave, que es una roca molida, que es almacenada con agua en un depósito.

Las cantidades de relaves depositadas son enormes. Si tomamos la producción de cobre de Chile, que es el 28% de la producción mundial, se depositan del orden de 2.000.000 de toneladas de relaves al día en nuestro país, lo que significa del orden de 700.000.000. millones de toneladas de relave al año y estos valores crecen año a año por la disminución de las leyes del mineral y el aumento del volumen del mineral, que es necesario tratar para mantener el nivel de producción de cobre.

En la Figura 23, se muestra un gráfico, sacado del Servicio Nacional de Geología y Minas, en que las barras verticales

muestran el volumen de los depósitos de relave autorizados y la línea con los círculos blancos indica el volumen acumulado de los depósitos autorizados.



Figura 22



Figura 23

Hasta la fecha hay un volumen total autorizado de depósitos de relave de 18.000 millones de metros cúbicos y se estima que ya están depositados entre 8.000 a 10.000 millones de metros cúbicos, que es una cantidad enorme

A continuación, se muestra una proyección que hizo el Ministerio de Minería comparando la producción de relaves desde el año 2014 (Figura 24), que era de 525 millones de toneladas por año; con el año 2026 en que se estarían produciendo 915 millones de toneladas de relaves por año, por lo que habría un aumento del 74% en relación al año 2014.

En el año 2021 se tiene una producción de más o menos 700 millones de toneladas de relaves por año, por lo que todavía se va a tener un aumento del 30% para el año 2026

por lo que habrá necesidad de seguir expandiendo estos depósitos o construir nuevos depósitos.

En el caso de Brasil, para dar el contexto de un caso que interesa para la discusión que seguirá, se producen 255 millones de toneladas de hierro, pero hay que considerar que el caso del hierro en Brasil, mucho de él se exporta sin procesar, y es embarcado sin ningún procesamiento porque las leyes pueden llegar a ser tan altas como al 65% (Figura 25). Por lo tanto, no todo el hierro tiene relaves como resultado de su procesamiento.



Figura 24



Figura 25

Ahora, del mineral del hierro procesado o sea en que se aplica algún sistema de concentración, se estima que el 50% del mismo corresponde a relave depositado convencionalmente, en un reservatorio con una presa. Se ha estimado en 100 millones de toneladas al año de relave depositado.

¿Cuál es la condición de estos relaves? Primero, en general son menores en tamaño, comparados con los de Chile.

Esto se debe a que estos yacimientos están diseminados en muchas minas distribuidas en todo el país. En el caso de VALE, que es la mayor Compañía productora de hierro del mundo, tienen del orden de 140 depósitos, de una sola Compañía en un solo país, eso indica que las presas no serían tan altas como en Chile; presas en general con alturas máximas de 60 metros de altura, mientras que en Chile estamos con algunas de 200 metros de altura. Una característica específica de Brasil es la alta pluviometría, con hasta más de 2.000 milímetros por año de lluvia.

Nos referiremos ahora a la ruptura de presas de relaves. Los depósitos de relaves, por ocupar una importante superficie del territorio y estar cercanos en muchos casos a comunidades, ya representan un impacto significativo. El impacto es mucho mayor si existe el riesgo de ruptura y desgraciadamente la estadística nos ha mostrado que ha habido un gran número de rupturas de presas de relaves.

En relación al tipo de presa de relaves, desde el punto de vista constructivo, se tienen las presas: i) aguas arriba (Figuras 26 y 27), estas pequeñas presas se van construyendo apoyándose en un relave ya depositado, ii) aguas abajo, en que la presa de contención se va construyendo siempre fundándola sobre terreno adecuado, y su estabilidad no depende de la resistencia del relave y iii) línea central, se trata de un caso intermedio.

En la estadística, resumida, que muestra el número de presas que han sufrido ruptura (Figura 28), se puede ver que a partir del crecimiento económico importante que tuvo el país y el mundo, a partir de la década del 50, hubo un gran crecimiento de la explotación minera, el que trajo consigo también un número enorme de presas que no fueron construidas adecuadamente y que sufrieron rupturas.

Este grafico muestra, que el número totales de fallas de presas de relaves, aumenta significativamente en la década entre 1960 y el año 1969 que corresponde a la década en que comienzan a materializarse grandes proyectos mineros, número de fallas que se mantiene hasta la década de 1980 a 1989, para luego comenzar a disminuir en las décadas siguiente (tendencia mostrada con la flecha negra) debido a que las industrias toman medidas y desarrollan nuevas prácticas e investigaciones. Sin embargo, el estudio de Bowker & Chambers de 2015, constata que, al analizar en detalle los casos, si bien el número total de fallas ha disminuido, el número de rupturas con consecuencias serias, entre ellas pérdida de vidas humanas, ha aumentado.



Figura 26



Figura 27



Figura 28

Según Bowker & Chambers (Figura 29), las fallas con serias consecuencias (curvas azul oscuro y azul claro) van aumentando y ellos predicen en 2012 en base a la información disponible a 2009, que hasta el año 2020 ocurrirían 3 o 4 rupturas importantes, lo que desgraciadamente ocurrió.

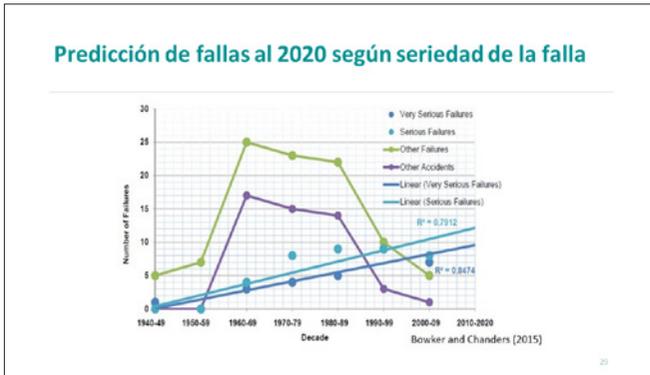


Figura 29

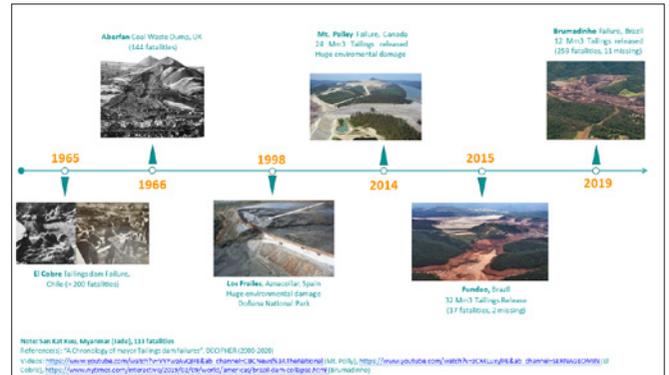


Figura 30

En la Figura 30 estamos mostrando solamente algunas de ellas destacando aquellas que más interesa en relación al tema que veremos más adelante, comenzando por una ocurrida en 2014, que es Mount Polley en Canadá y dos ocurridas en Brasil, Fundao y Brumadinho, la primera en 2015 causando la muerte de 19 personas y gran daño ambiental y la segunda en enero de 2019 que causó la muerte de 270 personas. Solamente como referencia, se incluye en la Figura 30 en el año 1965, la falla de El Cobre en Chile que produjo más de 200 muertos, con una presa construida por el método de aguas arriba. Esta falla llevó a que en el año 1970 el Estado de Chile prohibiera la construcción de presas de relave por ese método, También llamamos la atención en esa Figura sobre el desastre de Aberfan, en Gales en 1966, que es un depósito de carbón fino que debido a intensas lluvias sufrió una liquefacción y alcanzó una escuela donde murieron 144 niños. Se muestra también la falla de Los Frailes en España en 1998, que si bien no era una presa muy alta, falló en su fundación liberando parte del depósito que tenía un alto contenido de pirita y presentaba un ph de 2, es decir extremadamente ácido, flujo que impacto al parque nacional más importante de España (Doñana) que era un centro de migración de aves de toda Europa, provocando un desastre ecológico enorme.



Figura 31



Figura 32

A continuación, comentaré el caso de las tres rupturas que impactaron en los importantes movimientos de *stakeholders* que ha habido últimamente y que son parte de lo que se discutirá más adelante.

La falla del depósito de relaves de Mount Polley en Canadá en 2014 (Figuras 31 y 32). Si bien no tuvo pérdidas humanas, tuvo un daño ambiental muy grande, también un daño en términos de la imagen de la industria minera, porque

esto ocurrió en la provincia de British Columbia que se vanagloriaba de ser el lugar considerado mundialmente, como el que aplicaba las mejores prácticas en el manejo de depósitos de relaves y que tenían gran participación en organismos como el MAC y el CDA, que han editado manuales y guías de diseño, construcción y manejo o gestión de depósitos de relaves.

Esto tuvo un impacto grande porque muchos se preguntaron: “son los que tienen los mejores manuales, las mejores prácticas y les pasa esto, ¿Qué se puede esperar de los demás?”. En este caso como se puede ver en la sección de la presa (Figura 33), el centro del muro (eso que se ve azul oscuro), es el núcleo impermeable que contiene los relaves y agua del depósito de relaves y lo que está en café es el macizo de enrocado que soporta la presa, pero ustedes ven que está inclinado hacia aguas arriba; el proyecto original era con el núcleo centrado o sea crecía verticalmente (construcción por línea central), y debido a que no tuvieron suficiente enrocado o roca estéril para construir ese talud de soporte fueron cambiando el diseño original a medida que construían, resultando con un talud aguas abajo más empinado que el talud del proyecto original. Desgraciadamente en una parte de la presa, en el sector norte, había un nivel de suelo de un depósito glaciar no consolidado, mientras que en el diseño se había considerado que todos esos suelos eran preconsolidados.

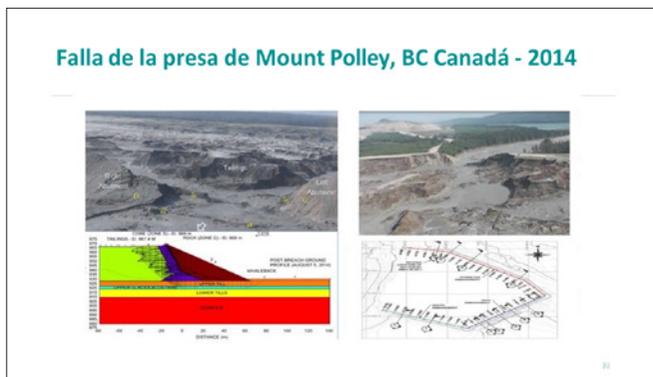


Figura 33

Ese factor sería la causa técnica de por qué ocurrió la falla, Sin embargo, en estudios posteriores a la falla se comprobó que si no se hubiera cambiado el diseño original, el factor de seguridad adoptado en el diseño original habría sido suficiente (es decir, factor de seguridad superior a 1.0) aún para este nivel de fundación más débil (sin carga de preconsolidación) y un talud de aguas debajo de la presa más empinado. Es decir, si bien el detalle técnico de la falla es la presencia de esa capa de glaciar no consolidada que no fue considerada en el diseño, finalmente una modificación del diseño durante la operación, aprobada por el Ingeniero de Registro y el responsable del depósito, hizo posible la falla. La pregunta es: ¿Fue evaluado adecuadamente el riesgo de la modificación del diseño original?

La segunda ruptura, que se comentará es la de la presa Fundao, ocurrida en noviembre de 2015 parte de la Mina Germano de la Compañía Samarco (Figura 34) que causó la muerte de 19 personas y la desaparición del pueblo de Bento Goncalves en Brasil.



Figura 34

El volumen de relaves liberado por la falla, de 46 millones de metros cúbicos, es el volumen originalmente informado. Sin embargo, recientemente se ha hablado de un volumen de 32 millones de metros cúbicos, que debe estar entre los mayores volúmenes liberado por una presa de relaves que haya fallado El daño ecológico es tremendo, ya que este relave llegó hasta el océano atlántico y va a tardar muchos años recuperar las condiciones ambientales en todo ese trayecto, de más de 100 km hasta el mar.

El otro impacto que tuvo esta ruptura es relacionado nuevamente con el prestigio de la industria minera, ya que la Compañía Samarco es un consorcio entre BHP y VALE, o sea dos de las cinco mayores empresas mineras El impacto en la comunidad mundial y en la industria minera dura hasta el día de hoy y la pregunta que se hacía era cómo Compañías entre las más grandes del mundo pueden estar asociadas a una ruptura con estos tremendos impactos.

Sabemos qué en el caso de estas rupturas, se forma un comité técnico que estudia en detalle qué es lo que explica la falla, para lo cual se dedican grandes esfuerzos en investigaciones y análisis técnicos de lo ocurrido. En la Figura 35 hay una fotografía del depósito de Germano y las dos presas: Germano y Fundao, siendo esta última ocurrida en noviembre de 2015, la que falló. En la Figura 36 se muestra el diseño original, que corresponde a un esquema denominado “dry sand stack”, y en la parte

superior de esa figura se muestra la falla del dren basal, dren que debía mantener el nivel freático en la base del cuerpo de arena supuestamente seco (*dry*).



Figura 35

en la galería antes de que fuera necesario seguir construyendo la presa, y como no quisieron parar la producción de hierro y, por lo tanto, del relave producto del proceso, decidieron cambiar el eje del muro a partir de un cierto punto y desviarlo hacia aguas arriba según la línea roja que se indica en la (Figuras 38 y 39).

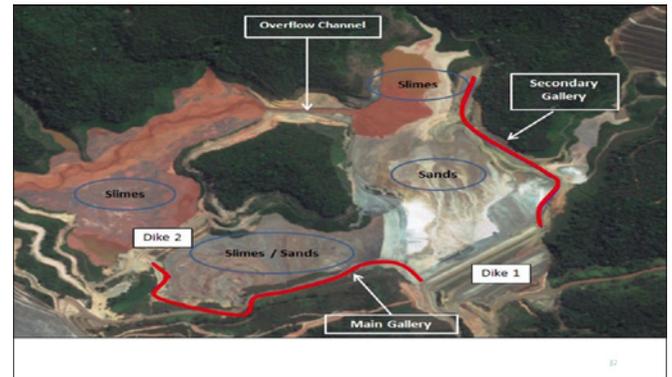


Figura 37



Figura 36

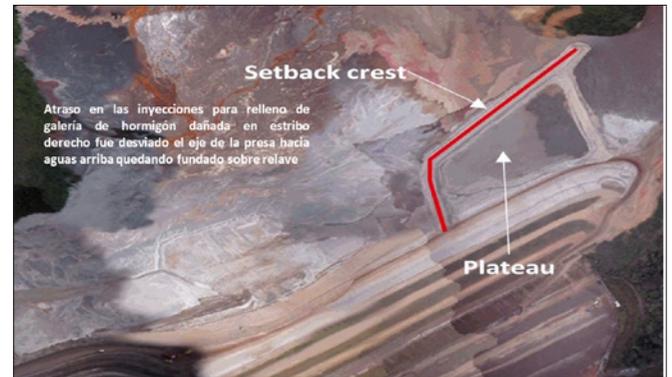


Figura 38

Al fallar ese dren, como se ve en la foto superior, y se quedaron sin dren, la solución adoptada fue construir un dren a nivel más alto (Figura 37); pero se demostró que no podía ser tan eficiente como el con que se había diseñado en la base. En la fotografía la galería roja de la derecha (*secondary gallery*) es una galería de desvío de agua de la zona vecina y esa galería mostró signos de una posible ruptura ante la carga de la presa y llegó a significar un riesgo importante, por lo tanto, la Compañía decidió inyectar hormigón en esa galería, de tal manera que no se fuera a producir su ruptura en el futuro, provocando un problema mayor.

Las consecuencias de esa decisión fueron de que no hubo tiempo suficiente para completar ese trabajo de inyección



Figura 39

¿Qué es lo que pasó con estos cambios? Que un diseño original que tenía como base la construcción de un prisma de arena compactada y drenada de 200 m de ancho, finalmente pierde su dren basal y luego continúa su construcción en el nuevo eje, pero ahora apoyando el prisma de arena no sobre la parte inferior del prisma de arena, sino que sobre un relave relativamente fino y de poca resistencia. O sea, este desvío del eje de la presa dejó que la presa estuviera apoyada sobre el material débil, provocando, junto a las deficiencias del drenaje, la falla de la presa de Fundao.

En todos los estudios llevados a cabo por estos Comités Técnicos para estudiar las causas de la falla hubo investigación de los detalles técnicos más mínimos, buscando definir el mecanismo de falla, pero al final ¿Dónde está la respuesta? ¿En los detalles técnicos o en las decisiones que se tomaron? El Profesor Norbert Morgenstern, uno de los grandes especialistas en presas de relaves en una conferencia en 2018, o sea después de Fundao y antes de Brumadinho dice que existiría una crisis en relación con la preocupación sobre la estabilidad de las presas de relaves y una falta de confianza en el diseño y en el comportamiento de estas presas (Figura 40), pero no deja explícito el profesor Morgenstern, cuál es el impacto en esas fallas, de lo que es la gobernanza y de las decisiones tomadas por los responsables de esas operaciones.

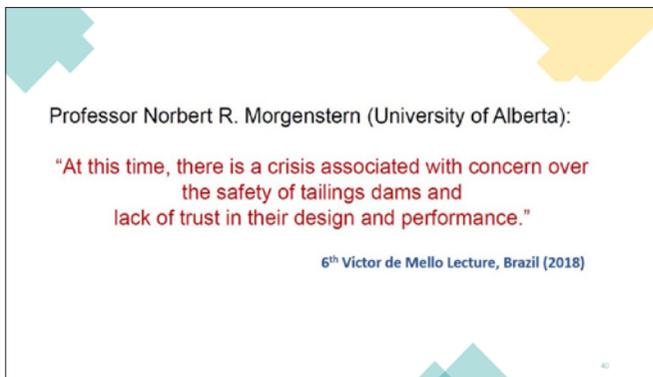


Figura 40

En enero del 2019 ocurre la falla de Brumadinho (Figura 41), perteneciente a una operación de VALE, que ya tenían la experiencia de Fundao, por lo tanto, uno hubiera esperado que estuvieran más preparados; de hecho, la compañía estaba formando un equipo de análisis de riesgo para poder controlar los riesgos asociados a casi 140 depósitos

de relaves que tienen en Brasil. Pero, mientras tanto, la operación continuaba y esto es lo que aconteció con una presa que ya llevaba 3 años sin recibir relaves y que se preparaba para trabajos de refuerzo.

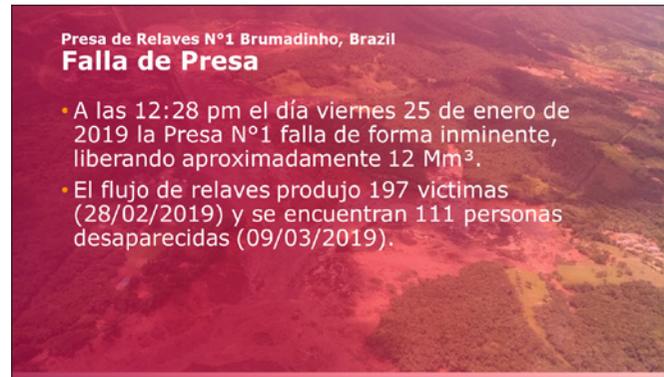


Figura 41

La presa B1, es una presa relativamente pequeña (Figura 42) construida con el método aguas arriba (que no se acepta en Chile), que considera la construcción de pequeños prismas resistente que se van fundando sobre los propios relaves que en general corresponden a suelos muy blandos: Se trata de una presa que había dejado de operar hace 3 años, por lo tanto, se confiaba en que como había dejado de operar, las condiciones deberían ser mejores que durante la operación donde diariamente se depositaban relaves. De hecho, ya habían empezado con ciertos trabajos de mejoramiento, entre ellos el desvío de agua de algunas quebradas que llegaban al área de la presa. Se denomina la falla de Brumadinho por el nombre del pequeño poblado ubicado inmediatamente aguas debajo de la presa.



Figura 42

La Figura 43 presenta una sección de la presa. En la sección las diferentes capas amarillas y café indican materiales de distintas características granulométricas, de distinta resistencia incluyendo algunas capas muy débiles en varios lugares. Esta presa había sido construida inicialmente por una Compañía Minera menor, hasta cierta altura. VALE había comprado esa mina y había continuado por algún número de años con el mismo depósito de relaves, peraltando la presa con el mismo método original. Tanto la empresa como las autoridades estaban conscientes de que la presa presentaba condiciones críticas.



Figura 44

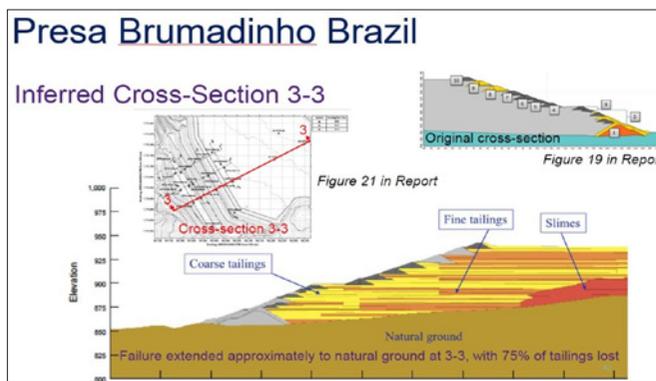


Figura 43



Figura 45

Muestra en su parte superior el lugar donde estaba la presa y luego como fluyó aguas abajo por el valle pasando por varias pequeñas poblaciones, pero la gente que murió en un gran porcentaje eran empleados de la propia Compañía que tenían su casino a los pies de la presa, a pesar de que se sabía que la presa estaba en condiciones marginales de estabilidad (Figuras 44 y 45).

La operación de salvataje fue algo impactante. Pero ¿Qué ha pasado con VALE entre tanto? VALE y las autoridades tuvieron que reconocer que mantiene varias otras presas de ese mismo tipo, también en condiciones similares y hasta ahora han tenido que evacuar tres valles para poder efectuar las remociones de esas presas, inclusive han tenido que colocar obras secundarias que pudieran controlar eventuales fallas durante los trabajos de remoción. En otras presas han tenido que construir obras de contención y de refuerzo (Figura 46).

¿Qué ha significado todos estos desastres al final? El desprestigio de la industria minera a nivel mundial. Aquí hay un informe que salió en el Wall Street Journal que fue

Descaracterizar barragens a montante é o nosso trabalho diário! Veja abaixo o andamento dos projetos em que trabalhamos para garantir a segurança dos trabalhadores e das comunidades próximas.

- Barragem B8 (Nova Lima):** Descaracterização concluída em 2019.
- Barragem B3/B4 (Nova Lima):** conclusão da obra de contenção em outubro de 2020; remoção de pilha de estéril em andamento.
- Barragem Fernandinho (Nova Lima):** obra de descaracterização na fase de conclusão. Previsão de término no primeiro semestre de 2021.
- Complexo Itabira:** descaracterização do dique Rio de Peixe concluída em 2020. Obras de reforço do Dique 2, da Barragem do Pontal, concluídas em março.
- Barragem Sul Superior (Barão de Cocais):** conclusão da obra de contenção em dezembro de 2019. Obras preliminares para início da descaracterização.
- Contenção para barragens Grupo, Forquilha I, II e III (Ouro Preto e Itabirito):** obra em fase final. Previsão de término no primeiro semestre de 2021.
- Barragem Doutor, da Mina Timbopéba (Ouro Preto):** construção do novo vertedouro em andamento, previsão de término desta primeira etapa no final de 2021.

Figura 46

reproducido por El Mercurio (Figura 47) con la leyenda” Las presas de desecho como las mineras cada vez son más peligrosas”, y debemos reconocer que tienen razón. El desprestigio a nivel mundial es una de las grandes consecuencias de estos hechos, fuera de todas las otras consecuencias que han debido soportar las empresas y principalmente las comunidades aledañas (Figuras 48 y 49).



Figura 47

En los tres casos mencionados hay detalles técnicos que explican el mecanismo de la falla, pero también en los tres casos hubo antecedentes, que existían antes de la falla, que explicaban que algo no iba por el buen camino. Eso podrá indicar que no hubo probablemente análisis de riesgo detallados al momento de tomar ciertas decisiones por parte de los ejecutivos responsables, análisis que pudieran haber permitido eventualmente que esas fallas no hubieran ocurrido. Estos análisis son particularmente importantes cuando se trata de presas cuya ruptura tiene grandes consecuencias (Figura 50).

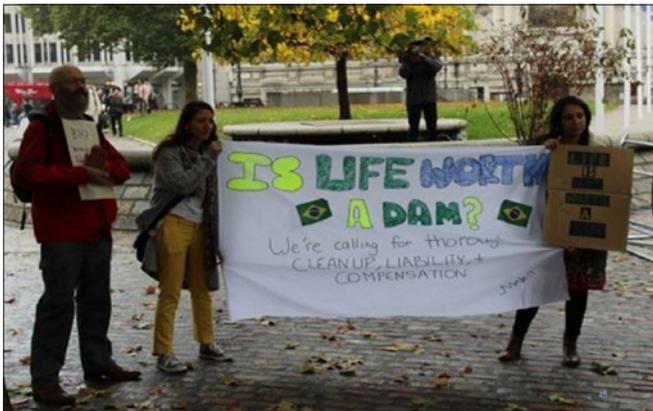


Figura 48

Tailings dams
Classification system by consequences CDA 2014

CDA consequence category	Potential loss of life	Environmental and cultural values	Infrastructure and economics
Extreme	More than 100	Major loss... Restoration impossible	Extreme losses...
Very high	100 or fewer	Significant loss... Restoration impractical	Very high economic losses...
High	10 or fewer	Significant loss... Restoration probable	High economic losses...
Significant	Unspecified	No significant loss...	Loss to recreational facilities
Low	0	No long term loss...	Low economic loss...

Figura 50



Figura 49

Hay otro importante impacto, tanto en el caso de las empresas Samarco (Fundao) como VALE (Brumadinho) en Brasil. En ambos casos existen acusaciones con responsabilidad penal a directivos de las Compañías y en el caso de Brumadinho incluso a miembros de algunas empresas de ingeniería.

Ahora lo más extraño es que la mayor parte de las recomendaciones técnicas y de manejo de los depósitos de relaves que se han hecho después de estas fallas ya existían, pero no siempre eran aplicadas. Considero que una de las más importantes recomendaciones o desarrollo que se aplica actualmente, y que ya se habían aceptado con anterioridad a estas fallas, es el sistema de clasificación de estos depósitos de relaves en base a las consecuencias de una posible ruptura. Es decir, se clasifica una determinada presa no por su altura o volumen, que pudieran ser factores relevantes, sino principalmente por las consecuencias que pudieran producir sus fallas. Determinar esas consecuencias hace necesario simular una ruptura posible, independientemente de su probabilidad. Ese análisis se denomina Dam Breach Analysis. Dependiendo de la magnitud de esas consecuencias se aplican condiciones especiales de diseño y operación y de los análisis de riesgo que se tengan que efectuar.

En 2003 ya existían los conceptos de análisis de riesgo, así como definición de los límites de riesgo socialmente aceptables para algunos países, pero que pueden ser usados

como referencia por otros países, que como Brasil y Chile no tienen establecidos tales límites.

En la Figura 51, se puede ver el caso de Australia en que para una presa que no tenga población en riesgo un nivel relativamente aceptable es el de una probabilidad de falla de 10^{-4} o sea 1:10.000 aproximadamente, pero si aumenta el número de potenciales víctimas, esa probabilidad tiene que bajar, por ejemplo, a 10^{-6} o 1:1.000.000 si hay 100 personas en riesgo.

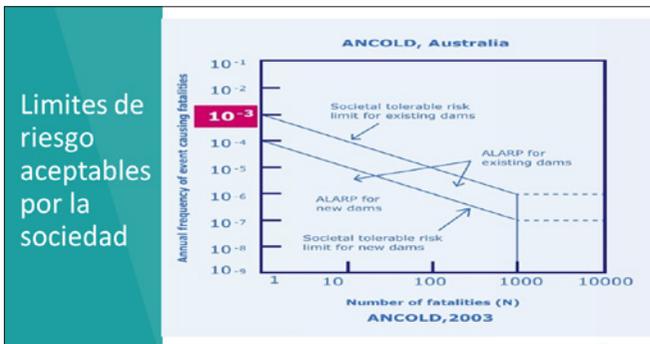


Figura 51

Ese tipo de análisis tendría que ser efectuado y tomado en cuenta al tomar las decisiones relativas al diseño y operación de depósitos de relaves.

Existen, además, otras aproximaciones recientes que relacionan casos empíricos y que intentan relacionar el factor de seguridad, generalmente utilizado en las normas y legislación como medida de la seguridad que ofrece una determinada presa, con la probabilidad de falla de la misma dependiendo de la calidad del diseño y la construcción (Figura 52). No se trata de una relación teórica, sino de un cuadro empírico que tiene sus imprecisiones, pero sirve para clarificar las ideas respecto a la probabilidad de falla. La mayor parte de las legislaciones, relacionan la estabilidad con un factor de seguridad y en Chile varían entre 1,4 y 1,5 dependiendo de la legislación, en el caso de Brasil varía entre 1, 3 y 1,5, pero esos factores de seguridad tienen un significado “real” dependiendo de cómo fueron diseñadas y construidas las presas. Si fuera el caso en que no hubo una buena construcción y buenos controles, esos factores de 1,5 pueden estar relacionados con una probabilidad de falla tan alta como de 1:10, y si fuera bien construida, bien diseñada, cumpliría más o menos con la recomendación de ANCOLD, es decir del orden de 10^{-4} (Figura 53).

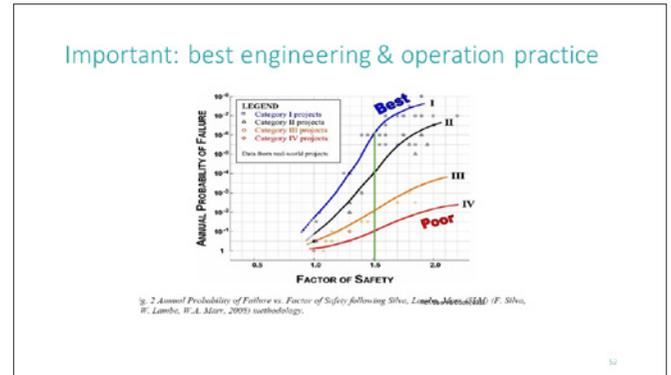


Figura 52

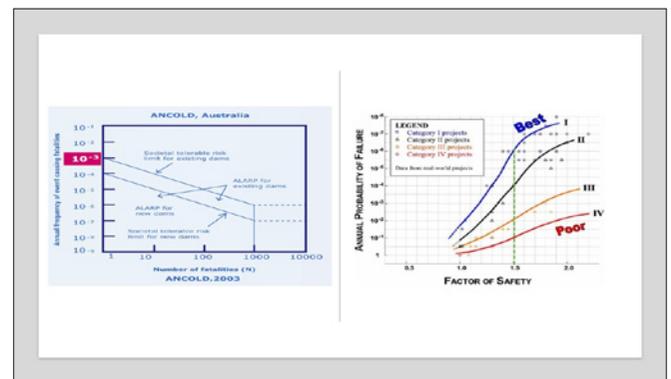


Figura 53

En los últimos años se ha visto que las fallas muestran que no sólo detalles técnicos están involucrados sino que también pueden tener gran importancia los esquemas de gobernanza; cuando las organizaciones son tales que no les es posible advertir a tiempo las señales de que pudiera haber un riesgo mayor del que se suponía inicialmente (Figura 54) y también se ha visto que no hay una clara aceptación de que las decisiones tienen que ser basadas en la información del riesgo asociado, es lo que se denomina “Risk Informed Decisions”.

Por lo tanto, la pregunta que surge es, reconociendo que es difícil preguntarlo después de que ocurrió el desastre. ¿Se podría haber evitado el desastre? Quizás en la mayoría de los casos la ruptura no se podía haber evitado, pero sí las pérdidas humanas; por ejemplo, mediante la evacuación, como pasó en el caso de Oroville Dam en Estados Unidos hace pocos años, en que ante la falla del vertedero que parecía eminente las autoridades evacuaron a 180.000 personas.

Cual es la causa de la falla y desastre?

Las comisiones de estudio de todas las fallas se enfocan principalmente en entender el **mecanismo de falla** y el cumplimiento o no de estándares y practicas reconocidas.

El aspecto que sólo en los últimos años se le ha abordado con más detalle es la responsabilidad que pudiera tener la organización de la empresa y su **esquema de gobernanza** en el manejo de los relaves.

No siempre el análisis de riesgo es parte del esquema de toma de decisiones en la empresa → **Risk informed decisions**.

La pregunta que no siempre se investiga o difunde es ¿se habría podido **evitar el desastre** o disminuido los efectos de la falla?

Figura 54

En la Figura 55 se resume lo dicho anteriormente, y aparecen relacionadas las fechas en que ocurrieron las rupturas comentadas y las fechas de publicación de varias guías, recomendaciones y manuales disponibles.

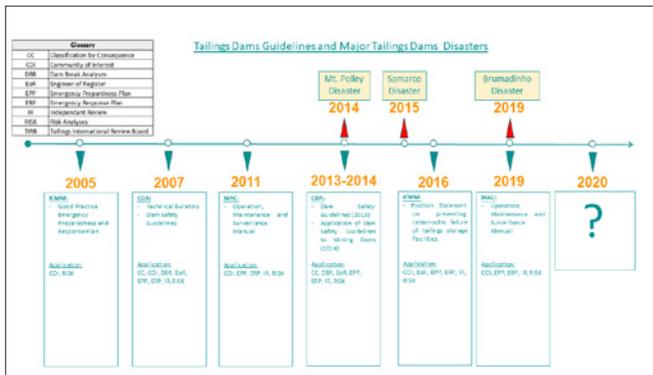


Figura 55

Ahora estamos en condiciones de hablar sobre **La presión de los stakeholders**, después de haber comentado el contexto en que se ha dado una inusual reacción de uno de los *stakeholders* de la minería (Figura 56) pero es precisamente el contexto comentado el que explica que se presente una condición tan especial y no habitual, como es la presión de los inversionistas accionistas o tenedores de bonos. Generalmente esta presión se hace en forma interna y directa, con los inversionistas conversando con las empresas o se hace a través de entidades financieras como el Banco Mundial el FIC, y otros organismos que proveen financiamiento. Pero en este caso, unos 2 a 3 meses después del 25 de enero en que ocurrió el desastre de Brumadinho, la Iglesia de Inglaterra y el Consejo de Ética de los Fondos de Pensiones Suecos enviaron una carta

inédita, marcando un hito inesperado, a ciento y tantas Compañías Mineras (Figura 57). Ahí explican que escriben esta carta a nombre de noventa y seis inversionistas del sector minero que en conjunto representan 10,3 trillones de dólares de activos que están manejando entre ellos y que este pedido urgente que ellos hacen está liderado por la Iglesia de Inglaterra y el Consejo Sueco, y respaldados por el grupo Principles for Responsible Investments que es apoyado Naciones Unidas, y que, precisamente por las pérdidas de vidas, en los casos que hemos comentado, hacen ver que es necesario que esto cambie y lo primero que hacen es pedir que, en un plazo de 45 días, todas esas empresas hagan una declaración (*disclosure*) sobre el estado de sus depósitos de relaves y lo más impresionante es que un gran número de empresas, entre las cuales las mayores del mundo responden y lo han continuado haciendo hasta ahora ante solicitudes de mayor información de detalle.



Figura 56

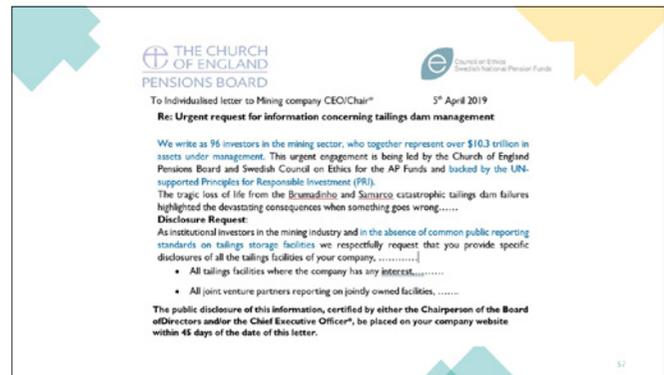


Figura 57

Internamente ellos tienen una página *web* de la propia Iglesia de Inglaterra) The Church of England (Figuras 58 y 59).

Inclusive se puede ver que hay una sección de Prayer and Worship. La página es muy grande, e incluye reflexiones sobre la fe cristiana, lo que nos lleva a concluir que detrás hay un compromiso, no solamente de este grupo de los fondos de pensiones sino también está comprometida la iglesia de Inglaterra, que es una de las iglesias más poderosas del mundo. Ellos informan que han recibido las repuestas de parte ya de 86 empresas y van aumentando.

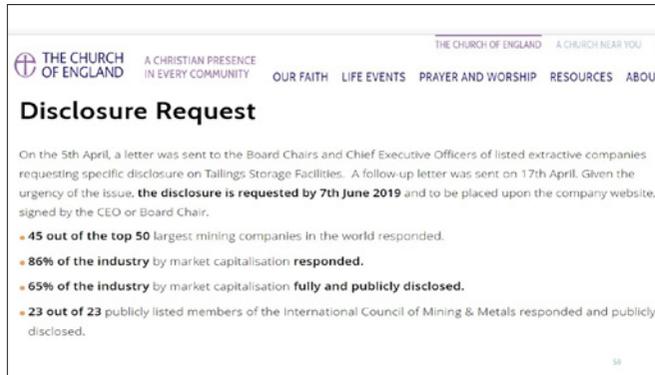


Figura 58



Figura 59

Lo que piden es que definan qué tipo de presas tienen, nivel de riesgo según la clasificación por consecuencias que ya mencionamos. Un ejemplo de la información que presentó BHP está en la Figura 60. Sobre esta información, además, se pide que se haga en forma pública, y ustedes pueden entrar a la página web de BHP, y esa es la respuesta de lo que informaron y aquí hay un resumen de la situación de los depósitos de BHP (Figura 61) donde se ven cinco depósitos de relave que corresponden a una clasificación de riesgo extremo y que tienen 29 presas aguas arriba, del tipo que son prohibidas en Chile.



Figura 60



Figura 61

En base a esta iniciativa y a la respuestas de las empresas mineras, este grupo de stakeholders deciden lanzar, en conjunto con el ICMM (International Council of Mining & Metals) que reúne a más de 23 Compañías Mineras importantes del mundo, más Naciones Unidas Medio Ambiente, un nuevo estándar global para la gestión de los depósitos de relaves denominados Global Industry Standard on Tailings Management (GTS), que si bien no tiene un carácter legal a nivel de país, al estar respaldada por instituciones de carácter global, estos estándares que propuestos por organizaciones de carácter global pasan a formar parte de ese conjunto de documentos que soportan lo que se entiende por la Mejor Practica Internacional (Best Applicable Practice). Estos estándares han sido puestos en conocimiento, además de las empresas mineras, de todas las Compañías de Seguros y organismos de financiamiento asociados a la minería (Figura 62), por lo tanto, tiene un gran efecto e impacto prácticamente desde el día de su lanzamiento.



Figura 62

La Figura 63 es una impresión de pantalla del día del lanzamiento del GTS y aquí quería recalcar la presencia de Adam Matthews, que es el que representa en esta iniciativa a la Iglesia de Inglaterra y que lidera todas estas reuniones y que es la persona que da la palabra final. El Sr. Mathews ha anunciado que el grupo que ha iniciado todo este movimiento como inversionistas en la industria minera formarían un Instituto junto con los organismos financieros y de seguros, para seguir acompañando el cumplimiento de estos estándares por parte de las empresas mineras.

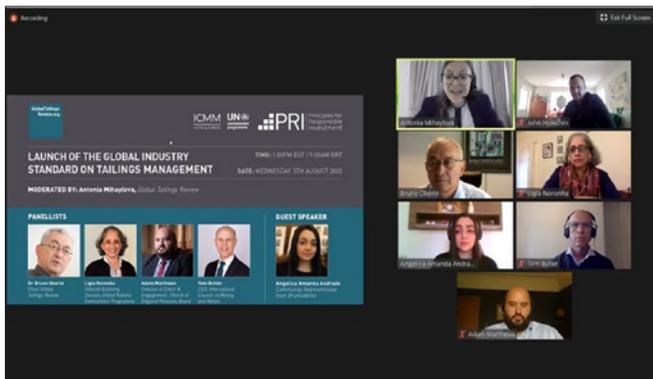


Figura 63

Debo destacar que al lanzamiento de estos estándares, que ocurrió el 5 de agosto de 2020, fue invitada una sobreviviente de la falla de Brumadinho, una chica que perdió en ese desastre a parte de su familia.

¿En qué consisten estos nuevos estándares para la gestión de los depósitos de relaves? Estos estándares se ordenan de acuerdo a seis principios organizados como se ve en la Figura 64, y que se muestran más claramente en la

Figura 65. Quisiera destacar que la forma que se presentan en la Figura 64, muestra claramente que las comunidades afectadas están en el centro de los principios en que se basa el nuevo estándar. Es un estándar que pone en el centro de su preocupación a las comunidades.

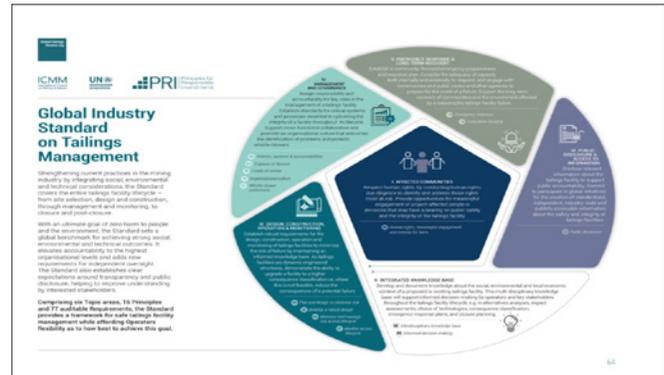


Figura 64



Figura 65

Los grandes en principios incluyen la necesidad de que las empresas mantengan una base de información completa e interdisciplinaria de todo lo referente al depósito desde el diseño, su construcción, y operación, y que esa información debe ser actualizada periódicamente, incluyendo la periódica actualización del impacto que sobre el entorno tiene el depósito (Figura 65).

El GTS indica que tanto el diseño como la construcción y la operación del depósito tienen que ser siempre enfocados en minimizar los riesgos, desde el inicio. El concepto que ha tenido repercusiones inmediatas, es la necesidad de mejorar el manejo y la gobernanza de los relaves en las empresas mineras, introduciendo recomendaciones sobre

la organización y gobernanza incluyendo la necesidad de incluir la participación de entes independientes en revisiones periódicas, pero también en el acompañamiento y registro permanente de la operación.

Incluye además la necesidad de tener proyectos o planes de respuesta de emergencia, inclusive tener ciertas nociones del plan de recuperación por si llegara a ocurrir alguna falla. Otro aspecto muy importante es la necesidad de poner toda la información disponible al público y que, además, haya una responsabilidad mayor, en términos de dar cuenta al público de todas las situaciones extraordinarias que pudieran ocurrir. Este ejemplo de la presión de *stakeholders* sobre una determinada industria o empresa es el caso más radical y de mayor impacto que yo he visto, comparable sólo quizás a lo que ha pasado con las empresas y proyectos de energía nuclear. Me parece que este es un caso que muestra muy claramente lo que puede llegar a representar la presión de los *stakeholders*, y no creo que esto sólo puede pasar en la minería, pero en realidad en cualquier empresa que pueda tener un impacto significativo sobre la comunidad.

Los grandes objetivos de estos estándares, que se resumen en la Figura 66 son de enorme importancia y demandarán grandes esfuerzos de la industria minera para poder alcanzarlos. En la Figura 67 se resumen las recomendaciones sobre los roles y responsabilidades en la organización de la empresa incluyendo la participación de entes independientes como paneles revisores; Ingeniero de Registro, y revisión periódica de estabilidad. La presencia del Ingeniero de Registro, es muy importante ya que se trata de un ingeniero (en general respaldado por una empresa) que debería acompañar permanentemente la operación de los depósitos de relaves, aprobando los diseños y toda modificación de estos, y verificando que se cumpla lo especificado por el diseño.

La repercusión de los requerimientos ha sido muy importante y la Figura 68 muestra en forma esquemática el impacto que ha tenido en la gobernanza de los relaves en CODELCO, esquema que ha sido facilitado por el Gerente Corporativo de Relave, quien permitió compartir esta lámina.

El cambio producido para atender el GTS, es que se han incorporado elementos independientes externos a la organización (bloques color verde) y además un Gerente Corporativo de Relaves que está al nivel 3 con relación al Gerente Ejecutivo, garantizando las comunicaciones con

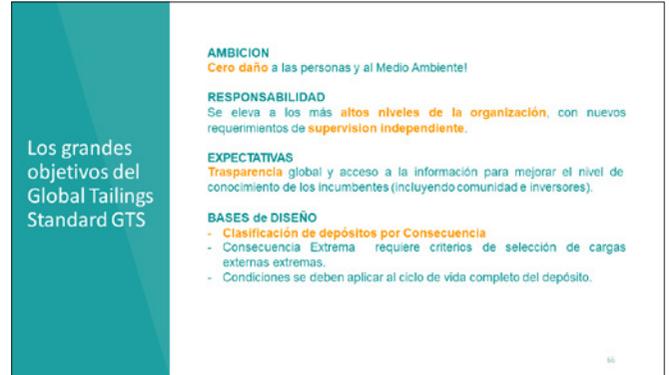


Figura 66



Figura 67

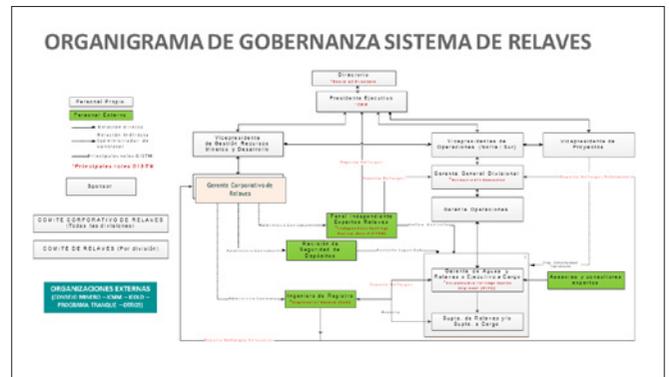


Figura 68

los niveles superiores. El panel independiente de expertos en relaves revisa anualmente el sistema de relaves, y reporta también directamente a los niveles superiores de la organización. Todo esto corresponde a un cambio fundamental. Se debe felicitar a CODELCO y otras empresas mineras en Chile que ya están incorporando muchas de estas recomendaciones.



Figura 69

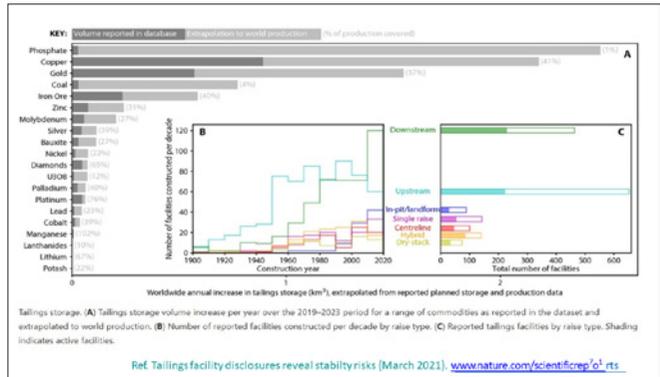


Figura 71

Investors Mining & Tailings Safety Initiative disclosure

- La base compilada incluye **1743 depósitos (725 activos)** e incluye métodos de construcción, estabilidad, consecuencias de falla, volumen depositado y la razón de adopción de nuevas tecnologías.
- Un **10% de depósitos** mostraron notables preocupaciones por su estabilidad o falla, condición a ser certificada como estable en algún momento, de acuerdo a condiciones (tipo, edad, altura, vol, sismos).
- Las catastróficas fallas han afectado la **reputación** de la industria minera y erosionado la **confianza** del público y están **redefiniendo los cálculos de riesgo** hechas por las instituciones financieras y los inversionistas. **Resultados de datos compilados (5 Mayo 2021)**

Figura 70

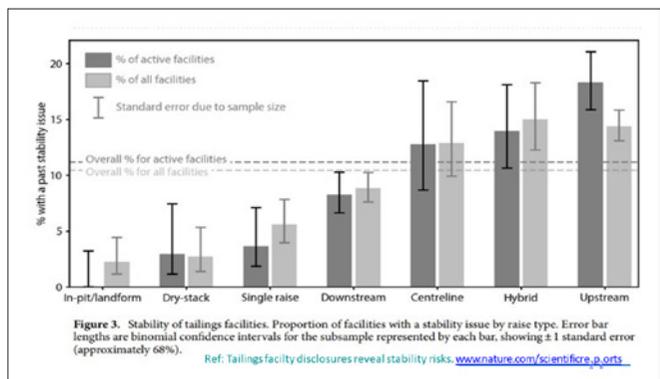


Figura 72

La iniciativa de este grupo de *stakeholders* no ha parado con el GTS. Recientemente la Iglesia de Inglaterra se ha encargado, a través de un artículo (Figuras 69 y 70), de publicar las estadísticas relativas a la información que recibió de parte de las empresas mineras. En ese artículo comentan que han recibido información sobre aproximadamente 1700 depósitos, y que en un 10% de los depósitos informados habría notables preocupaciones de estabilidad y de posible falla en algún momento. Estas nuevas actividades son recientes, del 5 de mayo de 2012, o sea hace 3 semanas. En la Figura 71 se desprende, por ejemplo, que las presas aguas abajo son mayoritarias y han ido aumentando significativamente respecto de las presas construidas aguas arriba.

La información de la Figura 72 en base a la información enviada por las empresas, muestra claramente que las presas construidas aguas abajo han tenido muchos menos eventos de problemas de estabilidad que las construidas aguas arriba.

Al día siguiente de aparecer la información recién comentada ocurrió el lanzamiento de otros documentos que complementan el GTS. El lanzamiento lo hace el ICMM junto al MAC, pero lo hace con el respaldo de la Iglesia de Inglaterra; este señor, el segundo de izquierda a derecha, es Adam Mathews (Figura 73).

Y los documentos que fueron presentados se resumen en las Figuras 74 y 75.

¿Qué podemos concluir? Que las empresas, y no sólo mineras, continuarán recibiendo presiones de diferente índole con relación a intereses individuales y globales, o sea, la presión de los *stakeholders* continuará como lo ha demostrado la historia desde fines del siglo XVIII, pero posiblemente con mucho mayor fuerza y poder (Figura 76).

La falta de confianza entre los *stakeholders* y las empresas es el cultivo para que algunas de las presiones que ejercen puedan llegar en algún momento a ser exagerados, sin



Figura 73



Figura 75



Figura 74

¿Qué podemos concluir?

- Las empresas **continuarán recibiendo presiones** de diferentes stakeholders en relación a sus intereses individuales o globales. Es el proceso visto desde el inicio
- La **falta de confianza** entre stakeholders y las empresas es un cultivo para algunas presiones que pudieran llegar a ser exageradas o sin fundamento.
- La **transparencia** (disclosure/información) es indispensable para que la empresa recupere o mantenga la confianza de los stakeholders y la sociedad.
- La empresa debe hacer especiales esfuerzos en **detectar a tiempo** las inquietudes y preocupaciones del entorno y no esperar tardíamente y en forma reactiva la manifestación de las mismas en forma de presiones.
- Las empresas deben dar espacio para hacer **participar a los stakeholders** y comunidades en aquellas iniciativas que tienen impacto en el entorno.
- El **desarrollo sostenible** debe convertirse en un **objetivo común** de las empresas y los stakeholders, en especial la sociedad y comunidades interesadas o afectadas.

Figura 76

fundamentos, pero en general es debido a que no se tiene la información completa. La transparencia es, por lo tanto, indispensable para que la empresa mantenga o recupere la confianza de los *stakeholders* y de la sociedad en general. Hay un Informe del Instituto de Ingenieros de Chile, que indica que uno de los problemas para avanzar en el desarrollo sostenible es resolver el problema de confianza entre los diferentes sectores (“Construyendo confianza para el desarrollo sostenible”, Instituto de Ingenieros de Chile, 2016).

Creo que podemos concluir que la empresa debe hacer especiales esfuerzos en detectar a tiempo las inquietudes del entorno y no actuar tardíamente y en forma reactiva: No esperar la manifestación de esas inquietudes en forma de presiones, porque cuando las presiones ya han llegado a un cierto límite puede producirse situaciones extremas que pueden afectar en forma importante a la empresa, incluso situaciones tales que sea difícil para la empresa poder absorberlas sin un gran sacrificio.

Las empresas deben dar espacio para hacer participar a los *stakeholders* y comunidades en aquellas iniciativas que tienen impacto en el entorno o los intereses de otros grupos.

El desarrollo sostenible debe convertirse en un objetivo común de las empresas y los *stakeholders*, considerando entre ellos a la sociedad y comunidades interesadas y afectadas directamente con el quehacer de la empresa o de sus proyectos.

Muchas gracias.

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

Sr. Ricardo Nicolau.

—*Gracias por compartir Ingeniero Valenzuela tu extensa, pero interesantísima presentación, nos paseaste por la historia de la empresa, lo que reconocemos, y nos diste la visión de la importancia de la responsabilidad social empresarial, para desembocar finalmente en el concepto de sostenibilidad; nos ilustraste sobre los riesgos de los embalses de relave, y como un ejemplo de las consecuencias de ello, finalmente cómo las empresas mineras están siendo presionadas por los stakeholders para mejorar sus estándares y además en tu conclusión nos mencionas que todas las empresas, no solo las empresas mineras, deberían adherirse a estos beneficios de la sostenibilidad. Muchas gracias por esta notable presentación que va a quedar registrada en los anales del Instituto. Tenemos algunos minutos aún y hay bastantes preguntas así que voy a tratar de escoger algunas.*

Eduardo Muñoz.

—*¿En su opinión debiese existir una ley de responsabilidad social de las empresas?*

Sr. Luis Valenzuela.

—No creo, el tema de la responsabilidad social de las empresas, les costó un tiempo a las empresas aceptarlo, pero finalmente reconocieron que era algo que tenían que desarrollar ellas mismas, y así ha sido e inclusive han sido organizaciones empresariales las que han fomentado la responsabilidad social de las empresas. En el caso de la sostenibilidad y el desarrollo sostenible, que involucra en forma mucho más amplia la responsabilidad social, está ya a nivel de organismos internacionales y es así como los tratados y compromisos internacionales que tiene Chile lo han hecho adoptar estos conceptos, por ejemplo, con la agenda 2030 de Naciones Unidas.

Una Comisión del Colegio de Ingenieros de Chile está preparando Informes para ser considerados en la nueva constitución en temas económicos, sociales y ambientales y se propone que la responsabilidad del Estado respecto el desarrollo sostenible, considerado como la integración conjunta del desarrollo económico, social y ambiental quede establecido.

Pregunta.

—*¿Cómo está asumiendo el Consejo Minero el rol de la gestión de los riesgos mineros?*

Sr. Luis Valenzuela.

—No sé muy bien como lo está haciendo el Consejo realmente, pero las empresas mineras, a algunos de cuyos miembros tenemos acceso, por ejemplo, Codelco, AngloAmerican, BHP y Teck, están tomando éstas recomendaciones en forma seria y mucho más rápido de lo que se esperaba. Yo participo en algunos paneles de revisión externa independiente, de depósitos de relaves en Brasil, Canadá y Chile y lo que visto es que este proceso se está tomando en serio y muy rápidamente y eso tiene consecuencias importantes. Hemos visto que, a partir de la sola discusión de los temas levantados por el GTS, incluyendo lo de la importancia de los análisis de riesgo introduce cambios al proyecto que va en camino y se le incorporan mejoras encaminadas a la disminución de riesgos de falla.

Por otro lado, hay una señal muy interesante del Ministerio de Minería y el Servicio Nacional de Geología y Minas, que actualmente están revisando el decreto DS 248 que regula la aprobación de los depósitos mineros y están, según se ha visto en la consulta pública que se está realizando que estarían incorporando un alto porcentaje de las recomendaciones del nuevo estándar global. Sin embargo, se han producido algunos problemas por ejemplo con el hecho de que no existan suficientes profesionales en el mundo que puedan entregar el servicio de Ingeniero de Registro o de revisores independientes y, en este momento, algunas universidades e institutos se han puesto en campaña de preparación mediante diplomados y cursos intensivos a diversos profesionales. También ya existen universidades extranjeras que han preparado programas de certificación de profesionales para algunos de estos nuevos roles.

Sr. Claudio Bermúdez.

—*¿Deben las empresas financiar estudios que queden disponibles para los stakeholders independientes en su opinión?*

Sr. Luis Valenzuela.

—Yo creo que ese es el paso que viene, y tengo la impresión que algo se está haciendo ya. El señor que les presenté en dos de las láminas, Andrew Mathews, que representa a la Iglesia de Inglaterra, ha informado que están preparando un Instituto para difundir toda la información relacionada a depósitos de relaves que, según el espíritu del estándar, tiene que ser pública. Así es como están solicitando a todas las empresas y están recibiendo información relacionada además publicando los resultados de los primeros análisis. Esto está en progreso y hay otras cosas; están abriendo un canal de comunicación para que personas ajenas o no a las Compañías Mineras puedan pasar información relativa a los depósitos de relave, o sea se está abriendo una válvula complicada y yo creo que las Compañías Mineras tienen que reaccionar para hacer todo lo posible para que den la información antes que la den externos que pudieran darla en forma no adecuada.

Sr. Alejandro Steiner.

—¿Cómo cambia la situación de las presas con relaves espesados?

Sr. Luis Valenzuela.

—Las condiciones de seguridad mejoran, con el depósito de relaves espesado, mejoran, pero evidentemente se está en proceso de aprendizaje, a pesar de que en Chile ya se tienen como tres casos en que se están aplicando relaves espesados. Hay un trabajo enorme para mejorar el conocimiento del comportamiento reológico de los relaves; se trata de una cuestión absolutamente técnica sobre la cual existían ciertas teorías o información que cuando se iniciaron los primeros depósitos de relave espesados no se cumplían. En Chile hay una Compañía que ha llevado el liderazgo a nivel mundial en este desarrollo, que es Centinela, que con mucho esfuerzo y recursos ha logrado poner en operación un gran proyecto. La industria minera mundial y la comunidad en general, tienen mucho que agradecer a esa iniciativa de Antofagasta Minerals, de aplicar esta metodología con un proyecto de alta producción, porque había depósitos de menor producción, pero los problemas se producen cuando son producciones grandes. Yo creo que el camino es ese y, más adelante,

el de los relaves filtrados, que son tremendamente caros todavía, y donde hay problemas logísticos serios para las grandes producciones. Chile, hasta hace poco, tenía el depósito de relave filtrado más grande del mundo que era la Coipa, pero ahora se están construyendo algunos mayores en otros lados, pero también avanzando en forma progresiva y aprendiendo según avanzan

Sr. Ricardo Nicolau.

—*A propósito de los 2 millones de toneladas al día que se generan en Chile en relave, a veces las personas no lo cuantifican, yo hice un cálculo y es más o menos un Cerro Santa Lucía al día, eso es lo que generamos de relaves en Chile, para que tengan una idea de la magnitud de lo que hablamos.*

La última pregunta: ¿Se realiza la supervisión remota en tiempo real en los depósitos de relaves?

Sr. Valenzuela.

—Se está iniciando; ha habido mucho avance en la parte de inspección remota, inclusive se han hecho algunos análisis de fotografías de satélites para analizar la falla de Fundao de Samarco y revisaron todas las imágenes de satélite y tratar de interpretarlas. Esto ha servido para mejorar la técnica de interpretación y también para que las Compañías se preocupen de contratar con mayor frecuencia la imagen de satélites, con determinadas precisiones. También, se ha aplicado en el análisis de la falla de Brumadinho y hoy hay varias Compañías que están implementando este monitoreo.

Sr. Ricardo Nicolau.

—*La tecnología debería también concurrir y mejorar sin duda.*

Sr. Luis Valenzuela.

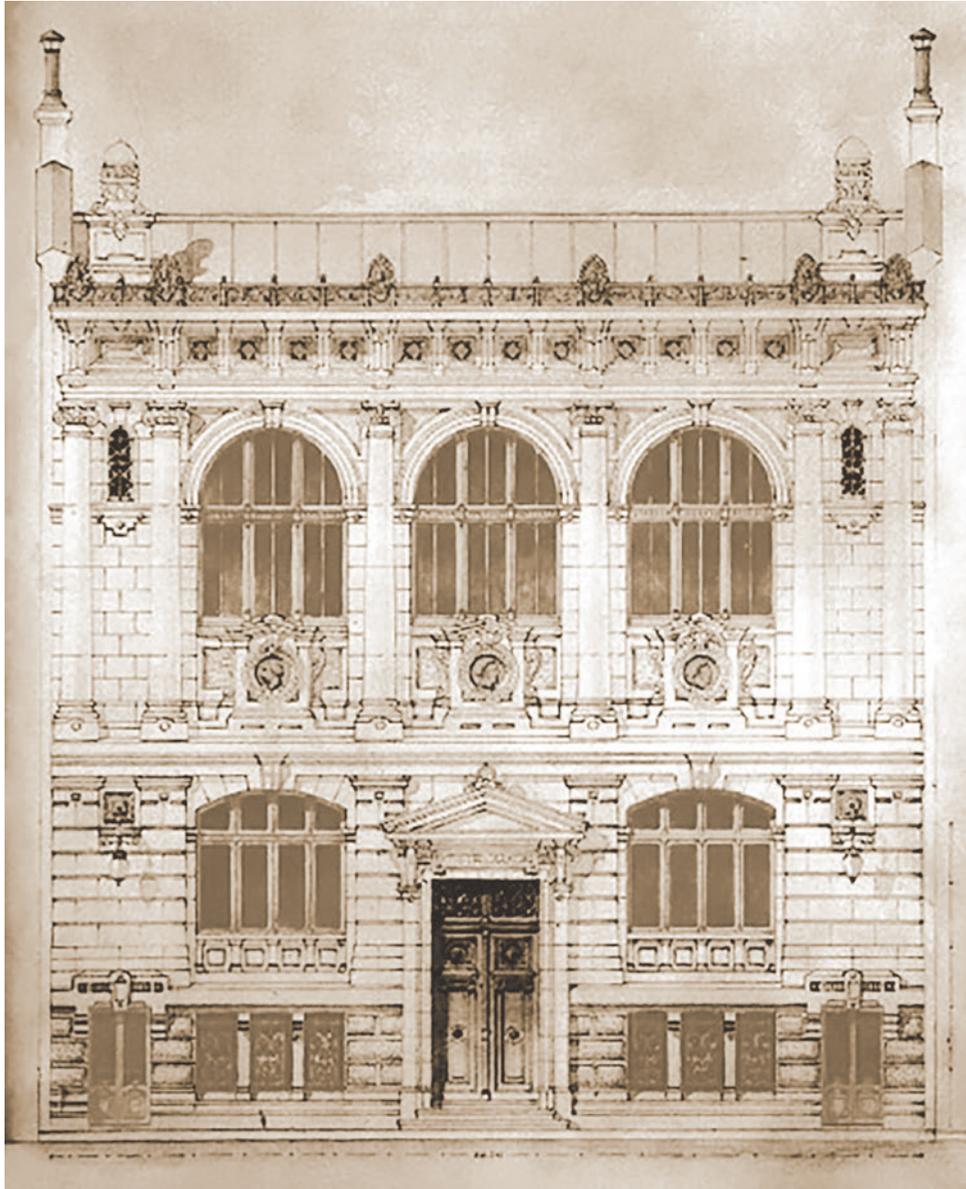
—Quería terminar con unas palabras, fuera de agradecer a todos, la paciencia, pues la conferencia fue un poco más larga de lo que pensaba, pero quiero confirmarles que Chile tiene un récord mundial, es uno de los países mineros más grandes del mundo, que no ha tenido un accidente serio

en los últimos 55 años, siendo al mismo tiempo el país más sísmico del mundo. Uno de los factores que explica eso, es el gran conocimiento de los aspectos sísmicos que se tiene en Chile y los excelentes ingenieros geotécnicos y sísmicos de Chile. Esto nos ha permitido diseñar adecuadamente algunas de las presas más altas del mundo que han demostrado ser seguras, pero lo otro es el hecho de que en el año 1970 el Ministerio de Minería y el Ministerio de Obras Públicas en un decreto conjunto el DS86 prohibieron la construcción de presas de relave por el método de aguas arriba, siendo el primero en el mundo, en 2014 lo hizo

Perú, que tenía problemas no sólo con los sismos, pero también con la lluvia. Brasil lo hizo el 2019, después de la falla de Brumadinho. Pero ese método de construcción sigue siendo aplicado en países como Australia, Canadá y Sud África. Pero, el que tengamos un buen récord, no significa que podemos quedarnos tranquilos, tenemos que estar vigilantes porque ese récord lo podemos perder en cualquier minuto con cualquier descuido o falta de atención a las lecciones aprendidas.

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 presentan dos extractos de las entrevistas realizadas a los ingenieros Sergio Bitar Chacra y Patricio Meller Bock. Estas entrevistas, como las que se hagan en el futuro, serán objeto de una publicación especial.

SERGIO BITAR*Como una hoja al viento.*

Estudió en el Instituto Nacional desde el final de la Preparatoria hasta el fin de las Humanidades. En un momento dudó entre la Escuela Militar o la Universidad, y también, entre estudiar leyes o ingeniería, pero en lo que no dudó a la hora de decidir, fue en elegir la Universidad de Chile. Ya estando en el tercer semestre, recuerda haber sido ayudante de Trigonometría, luego de Cálculo, después de Mecánica Racional, con el profesor Arturo Arias, de quien conserva la imagen de un profesor excelente. Después le atrajo la Economía, pues esa formación ampliaba su capacidad de estudiar los problemas del país. Estando en cuarto año de Ingeniería ingresó en paralelo a primer año de Economía en la misma universidad, aunque finalmente desistió. Entre sus profesores recuerda a Joaquín Undurraga y a Julio Melnik, en evaluación de proyectos, también a Pedro Godoy, y a Jorge Cauas, en programación lineal. Ellos influyeron en su formación. Hizo su memoria en Hidráulica con Francisco Javier Domínguez y simultáneamente hizo clases de economía en 5° y 6° año de Ingeniería. Durante el 6° año terminó su tesis, adelantó su examen de grado y se recibió. Entonces, lo invitaron a trabajar al Centro de Planeamiento. El profesor Undurraga le pidió ayuda para escribir un texto de enseñanza de Economía para los estudiantes de Ingeniería. A los pocos meses de terminar el texto, se casó y partió a París, al Centre d'Études de Programmes Economiques, con una beca del Gobierno francés, dependiente de su Ministerio de Hacienda. Tiempo después regresó a la Escuela de Ingeniería resuelto a volcarse al tema del desarrollo de Chile, y estudiar proyectos energéticos, industriales y de transporte.

Estando aún en Francia, recibió una carta del Decano Enrique d'Etigny ofreciéndole asumir como director del Centro de Planeamiento. Ahí le encargaron diseñar cursos nuevos para formar ingenieros en esas disciplinas. En ese entonces había dos centros: el Centro de Planeamiento y el Centro de Administración Industrial, dirigido por el profesor Yudelevich. El Decano resolvió fusionarlos, crear el Departamento de Industrias y contratar gente a jornada completa. En ese momento se le ofreció ser director del Departamento de Industrias, cargo que ocupó entre 1966 y 1968. A la vez, se presentó a concurso y fue elegido profesor titular.

Los aportes a la ingeniería los ha realizado contribuyendo a la formación de ingenieros con nuevos cursos de economía,



evaluación de proyectos, economía de empresas, aplicación de programación lineal y métodos matemáticos a la economía. Impulsó un gran número de tesis, donde recuerda a destacados alumnos, entre ellos a Víctor Pérez, ex rector de la universidad de Chile, Javier Etcheberry, ex Ministro de Obras Públicas, Carlos Vignolo, Alejandro Gómez y varias otras personas que ocuparon cargos de profesores y directores de empresas. En esos años, publicó el texto de estudios “Economía de Empresas” que sirvió durante muchos años como texto de referencia.

En 1968, cuando gobernaba Eduardo Frei Montalva, se produjo una crisis económica y el entonces Ministro de Hacienda, Sergio Molina, dejó el Ministerio y Frei lo nombró vicepresidente de CORFO. Invitado por Jorge Cauas ocupó el cargo de Planificación Industrial en la CORFO y empezó a trabajar en el diseño de un plan industrial para la década de los 70. A mediados de 1970 lo invitaron a integrar el equipo que preparaba la campaña de Gobierno de Radomiro Tomic. Trabajó en la parte económica e industrial.

Por esos meses surgió otra posibilidad, lo invitaron a postular a la Escuela de Gobierno de Harvard. Obtuvo una

beca y partió a completar los estudios que había iniciado en Francia.

En 1971, estando aún en Harvard y durante el Gobierno de Salvador Allende, seguía los acontecimientos en Chile. Decidió regresar a Chile y tomó la decisión de ingresar a un partido político, la Izquierda Cristiana. En esas circunstancias, le pidieron formar un grupo de economistas que preparara un informe de la situación económica y propusiera medidas para presentar al presidente Allende, antes de que la Izquierda Cristiana se integrara a la Unidad Popular, el partido de Gobierno. Unos años después, en 1973, fue su Ministro de Minería. Le correspondió enfrentar una crisis mayor, la primera huelga minera de los trabajadores de El Teniente, la primera de trabajadores contra el Gobierno, en un momento en que ya se hablaba de golpe militar a diario. La huelga terminó el día del “Tanquetazo”, el primer intento de golpe militar en agosto de 1973. Luego vino el golpe del 11 de septiembre y fue apresado.

Fueron 14 meses de detención. Un año en Dawson, después en dos o tres campos de concentración y luego arresto domiciliario, hasta que finalmente partió al exilio. Esa experiencia la dio a conocer en el libro Dawson Isla 10, que después inspiró la película Dawson, producida por Miguel Littin. También dejó registro de su experiencia anterior en el libro “El Gobierno de Allende”, que se ha publicado en varios idiomas.

El exilio y el desarraigo de la patria ha sido para él un castigo implacable, más todavía cuando nadie podía dar una explicación, ni inició un proceso en algún tribunal donde se pudiera defender.

Todos esos años iba junto a otros exiliados a protestar a las embajadas de Chile pidiendo que les dieran un pasaporte que los permitiera retornar, lo que pudo hacer en 1984. Diez años de exilio que forjaron su carácter y definieron las causas por las cuales ha querido luchar.

Para Bitar, han sido tres los factores que influyeron en el despertar de su vocación política. Primero, el Instituto Nacional, donde había discusiones políticas sobre los problemas nacionales. Segundo, la Escuela de Ingeniería en los años del término del Gobierno de Jorge Alessandri y el comienzo del Gobierno de Eduardo Frei, donde las disputas eran intensas y había mucha efervescencia por los cambios que iban a ocurrir en Chile. Tercero, la influencia de su madre, una mujer muy sensible socialmente que le

transmitió los valores que lo acercaban a preocuparse por lo social y a combatir la miseria que en esos tiempos asolaba a un gran número de familias.

No obstante, considera que son pocos los ingenieros en organizaciones dedicadas a los temas políticos o de políticas públicas, pero cree que ello cambiará rápido a futuro. Con el impacto de la pandemia y por el proceso constituyente, piensa que emergerá una nueva generación de políticos mejor formados o profesionales que dediquen tiempo a la función pública, donde también los ingenieros puedan contribuir al diseño y la ejecución de los planes de Gobierno, en particular en desarrollo económico-tecnológico y proyectos.

Para definirse en pocas palabras, recurre a su currículum, que dice: ingeniero y político. De sus momentos memorables, uno es su matrimonio, reconociendo que su esposa le ha dado estabilidad para construir una familia y respaldo para asumir riesgos. También lo han marcado el Instituto Nacional, y la Universidad de Chile; por ello es partidario de mejorar la educación pública. En los momentos dolorosos, no puede dejar de mencionar el desenlace del Gobierno de Salvador Allende, la violencia del golpe militar, la dictadura, el dolor de los crímenes de algunos de sus amigos, el sufrimiento de la prisión y el exilio.

El plebiscito de 1988 fue para él un momento de esperanza, donde se abrió la posibilidad de iniciar un proceso democrático y gozar de libertad. Logró el triunfo electoral como Senador y se llenó de energía y compromiso.

Una de las decisiones que le ha reportado más satisfacción es haber creado, cuando era Senador, la Corporación Museo del Salitre, que preside desde 1995. Ahí han logrado proteger y restaurar las salitreras Humberstone y Santa Laura, que fueran reconocidas por la UNESCO como patrimonio mundial. En ellas se puede conocer cómo surgió una industria mundial, el nacimiento del movimiento obrero y de nuevos partidos políticos a comienzos del siglo XX.

En 2003 regresó a Isla Dawson siendo ministro de Educación, junto a tantos otros que estuvieron presos y querían volver para cerrar ese trauma. Un día antes del reencuentro en la isla, fue invitado al aniversario de la creación de Puerto Williams. Hubo un desfile de efectivos de la Armada saludándolo como representante del Gobierno. En lo más reciente, también ha sido memorable para él, haber votado “Apruebo” en el plebiscito de 2020 para escribir la nueva Constitución.

Quiere ser recordado por el aporte realizado para recuperar la democracia y afianzarla con más igualdad y participación. Y también, por saber diseñar estrategias de desarrollo para Chile con una mirada amplia y gobernar bien, ser eficaz y cumplir, en la medida de lo posible, explicando siempre con transparencia a tus conciudadanos. También le gustaría ser recordado por haber actuado con honestidad y coherencia, dialogante, respetando el pluralismo y la diversidad, rechazando la violencia.

A los más jóvenes les diría: “piensen y miren a su país, ocúpense de los demás, de la gente que los necesita, ustedes tienen que hacer un aporte para vivir en un país con igualdad y democracia. Resuelvan problemas concretos de los chilenos, identifíquenlos y júéguelos. Piensen como ciudadanos globales para resolver el gran problema de la humanidad: el cambio climático. Fórmense en disciplinas

distintas, más allá de lo que les enseñan en la escuela. Tienen que ser multidisciplinarios y siempre curiosos, porque para innovar deberán innovar en equipo. Y sean vanguardia en el campo tecnológico, para acrecentar la capacidad de Chile”. Considera que la prioridad es formar a los nuevos profesionales para desplegar su capacidad emprendedora y creativa, su relación con empresas, su continua capacitación, y un énfasis en su preparación para gobernar, y gestionar un Estado más capaz, que convoque a todos para fijar un rumbo compartido.

Al finalizar la entrevista, el mismo se asombra de haber tenido la oportunidad de ser ministro de los tres presidentes socialistas en la historia de Chile hasta 2021, y reflexiona: “Uno es como una hoja al viento. Lo importante es tener consistencia, no engañarse a sí mismo ni engañar a los demás, no hacer trampa ni buscar atajos”.

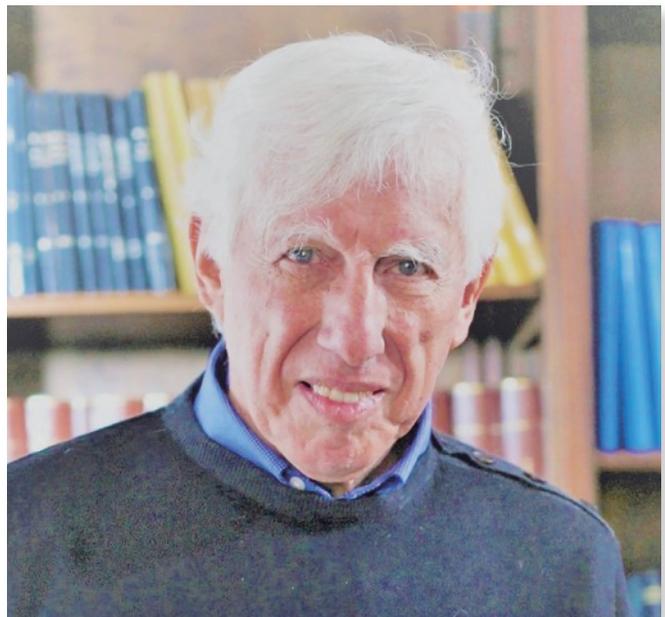


Patricio Meller

El centro son las estrellas.

Cuando tenía que tomar la decisión de qué estudiar, para él sólo había tres alternativas relevantes: medicina, derecho e ingeniería. A los que eran buenos para las matemáticas no les quedaba más que escoger ingeniería, y así lo hizo.

En el listado de profesores que influyeron en él, en primer lugar, señala al profesor Arturo Arias, quien además fue su guía de Tesis. También menciona a Jaime Michelow y a Domingo Almendras, por su calidad docente y motivación que transmitían. Recuerda a Rodrigo Flores al final de la carrera por su doble calidad, como gran profesor de ingeniería estructural y como gran maestro de ajedrez. Por último, menciona a un profesor de un ramo electivo que le influyó después para el cambio de carrera; fue Julio Melnick, quien le motivó en la dirección que tomaría después, la economía. Aclara, que no solo fueron profesores quienes lo influyeron, fue también la Escuela, el ambiente. Y habla de la Escuela, no de la Facultad, ni de Beauchef como hablan los estudiantes de hoy. En esa época se hablaba de la Escuela con mayúscula y eso



suponía que era la Escuela de Ingeniería y por supuesto la de la Universidad de Chile. También lo influyeron algunos compañeros, como Tomás Guendelman, a quien conoció

en 1956 en un viaje que hicieron para dar la prueba de admisión en la Universidad Santa María. Luego, hicieron toda la carrera de ingeniería juntos y posteriormente, se fueron a Berkeley a sacar el Master de ingeniería.

Al finalizar, buscó empleo en una empresa grande que estaba en Oakland y cuando llegó a hablar con el Jefe de Ingenieros, se sorprendió de que por tener un Master en Ingeniería de Berkeley era mirado de otra forma. El jefe le recomendó ir a San Francisco, donde según él, podía destacarse de mejor forma. Allí lo contrataron en una oficina de ingeniería chica, donde los dueños eran dos ingenieros. Un ruso que había emigrado y un norteamericano. Cuando empezó a trabajar le sorprendió el interés por transmitirle toda la información y la preocupación por capacitarlo en cómo se hacían las cosas en una oficina de ingeniería; le daban todo el *know-how* que tenían. Por primera vez sentía lo que es la ingeniería, adquiriendo una visión holística de cómo funciona una estructura. San Francisco es una zona sísmica y por ello aprendió a sentir cómo se va a mover una estructura y donde ejercen mayor presión las ondas sísmicas, para poner mayor refuerzo. Esa doble visión de una empresa pequeña le marcó, en el sentido de cómo una empresa privada se preocupa de que sus profesionales aprendan todo y la lógica de por qué lo aprenden. Fue para él una experiencia pedagógica muy importante donde nunca le negaron información relevante.

En Berkeley vivía en una villa universitaria donde interactuaba con alumnos de distintas carreras, ahí fue descubriendo que podía estudiar cualquier cosa. Se dio cuenta que la economía es una disciplina que utiliza mucho las matemáticas, muy afín a la ingeniería, así que se decidió a hacer un doctorado en Economía. En el desarrollo de su profesión ha aprendido qué en la investigación, hacer preguntas es lo más importante y buscando temas relevantes, se fue moviendo hacia otras áreas y transformó la investigación en un procedimiento para ir aprendiendo más de lo que ignoraba de economía, sobre todo, para alguien que no ha hecho el pregrado en esa área. Esto le sirvió cuando hizo clases en pregrado, ir cambiando de ramo en ramo para aprender de todos algo. Partió en el Instituto de Economía de la Universidad Católica, donde hizo diez ramos distintos en un periodo de cinco años. De ese modo aprendía enseñando y se iba encantando con lo que hacía en la vida académica.

Después de haber estado haciendo clases durante cincuenta años, se ha dado cuenta, qué según su parecer, no lo estaba

haciendo bien y en los últimos años empezó a pensar una pregunta que siempre le perseguía mientras hacía clases: ¿cuánto aprenden los estudiantes?, ¿con qué se quedan después de una de sus clases o de un curso? Es delicado para un profesor ver que cuando usa material del curso anterior los estudiantes no recuerdan nada. Entonces, él les decía a sus estudiantes, “¿Cómo?, si esto lo vieron en el ramo anterior.” “¿Qué pasa, por qué no lo recuerdan?” Puede ser que los profesores que enseñaron la materia que era previa, no lo enseñaron bien. Entonces decidió experimentar dando los ramos previos y después los ramos que quería enseñar. Para su sorpresa, el resultado seguía siendo el mismo. No recordaban lo que se les había enseñado. Ya no podía culpar a los profesores anteriores. Su reacción con los estudiantes era de molestia, incluso interrogando a los mejores estudiantes del curso. Se dio cuenta de algo que ahora le resulta obvio: “una cosa es lo que uno enseña y otra cosa es lo que los estudiantes aprenden”. Entonces, se preguntó cómo lograr que los estudiantes aprendan y además tengan criterio. Esa cuestión, nos señala, no ha sido fácil, no es trivial, y eso lo llevó a involucrarse en un área que no había explorado, la educación escolar. Si los escolares no aprenden, ¿cómo desarrollan la capacidad de aprendizaje los estudiantes universitarios? En su paso por la Fundación Chile, donde estuvo por cuatro años interactuando con el grupo de educación, entendió el cambio de paradigma que hay en la educación. Se está sustituyendo la educación basada en la enseñanza, por la educación basada en el aprendizaje. La diferencia entre ambos paradigmas, acota, es como la diferencia que hay entre la astronomía ptolomeica y la copernicana. Eso le estimuló a darse cuenta de que había que apuntar al principio, no a la educación superior, sino a kínder, y desde allí cambiar el paradigma. Lo expresa así: “Así como en la astronomía de Ptolomeo la Tierra es el centro del universo, el profesor es el centro de la clase; en cambio en la astronomía copernicana, *las estrellas son el centro de la clase y las estrellas son los estudiantes*. Hay que dejar que los estudiantes hagan la clase y se tienen que preparar para eso; el profesor es el director de orquesta, los músicos son los estudiantes y ellos tocan la música”.

Cuando habla de su actividad como investigador, señala que su atractivo es que nunca se agota, siempre hay más para investigar. Ha publicado numerosos libros, entre ellos, “Universitarios: ¡El problema no es el lucro, es el mercado!” y otro titulado: “Las claves para la educación del futuro: Creatividad y pensamiento crítico”. Estuvo varios años escribiendo ese libro dirigido a los profesores,

para decirles que la metodología de enseñanza que están aplicando es del siglo XIX y que funciona en base a la trilogía de memoria, repetición y resolver problemas conocidos. Hoy se requiere solucionar problemas desconocidos. Entonces, “¿cómo se enseña a resolver problemas desconocidos y quién lo puede enseñar?” Las habilidades para este siglo hablan de pensamiento crítico, creatividad, trabajo en equipo y facilidad de comunicar cosas complejas. Para cambiar la educación escolar, nos dice, hay tres posibilidades. Una, modificar el currículo de las Facultades de pedagogía y entrenar a los profesores del futuro. Pero eso toma cinco años hasta que los profesores ingresan al pedagógico y luego tienen que irse a estudiar afuera. Opina que la mitad de las becas para ir a estudiar afuera, siendo la educación tan importante, debiera ser destinada a profesores. Dos, que aprendan cómo enseñar el pensamiento crítico, pero eso tomaría al menos diez años. Entonces, surge la tercera opción, donde aprovecha lo aprendido de la ingeniería para atacar el problema en forma inmediata. La forma de hacerlo, señala, es a través de la PSU y del SIMCE. Los tres componentes básicos de la educación son: El currículo, vale decir: qué es lo que se enseña; la metodología de la enseñanza y finalmente, la evaluación, que debe responder a lo que se ha hecho antes, es decir el currículo y la metodología de la enseñanza.

Pero, ¿cómo funciona el sistema en Chile? El SIMCE y la PSU determinan cómo se enseña y lo que se enseña, determina que los estudiantes estén estudiando facsímiles para contestar preguntas rebuscadas, irrelevantes que no sirven para nada y que a los estudiantes se les olvidan al día siguiente. Sugiere, entonces, cambiar el test y usar la prueba internacional que se llama el Test PISA, para compararse con los mejores. Comenta que, en la carrera de doctorado de economía, había que hacer ensayos todas las semanas en cada ramo. Los ensayos no se evaluaban por la capacidad de sintetizar información conocida, sino por ir más allá, plantear cosas desconocidas interesantes. Si en todos los cursos empiezan a hacer ensayos, ¿a qué obliga eso a los estudiantes? Los obliga a leer. Nos recuerda que en Chile sólo el 7% lee por gusto versus el 70% en Alemania. El costo de la ignorancia, nos dice, es muy superior al costo de superar la ignorancia.

Cuando volvió a la Facultad, al Departamento de Ingeniería Industrial, se dio cuenta de que los estudiantes no entran a la Universidad de Chile, los estudiantes entran a una Facultad. La Universidad de Chile es un conjunto de facultades y no hay interacción entre ellas, ni a nivel de

estudiantes ni a nivel de profesores. Además, dentro de la Facultad también hay un conjunto de departamentos disjuntos. Y luego, ¿dónde trabajará el grueso de los estudiantes? En empresas y generalmente privadas y a veces en emprendimientos creados por ellos. Sin embargo, lo que se enseña de empresas es muy poco, es insuficiente. A su juicio, lo que tiene que estar presente en la enseñanza, es preparar a los estudiantes para trabajar o crear empresas, el tema de fondo, nos señala, es la creación de empleos. La evidencia empírica de esta falencia en la formación ingenieril se aprecia en los MBA de Ingeniería Industrial; ¿de dónde vienen los estudiantes de los MBA?, de todas las otras especialidades que no son Ingeniería Industrial. No solo de la Universidad de Chile sino del resto de las Facultades de Ingeniería de Chile. Cuando fue director del Departamento de Ingeniería Industrial, estuvo en el Consejo de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas interactuando con los otros directores de todos los otros Departamentos. Ahí observó el sesgo que existe en la formación ingenieril, donde no hay otras visiones para enseñar; se enseña como siempre se ha enseñado.

Le pedimos que se defina en dos palabras y nos responde con sencillez: Pato Meller. Luego vuelve rápidamente al tema de la educación para hablarnos de las diferencias entre las universidades norteamericanas y las latinoamericanas. Se refiere a la creación de profesiones aisladas de otras. Los norteamericanos crearon el College hace cien años atrás para iluminar y clarificar a los estudiantes sobre cuáles son sus preferencias, y por otro lado, adquirir información sobre distintas especialidades y disciplinas, ¿qué es la ingeniería?, ¿qué es la economía?, ¿qué es la filosofía? En el College y después de dos años tomando una diversidad de cursos, los alumnos tienen más claro qué escoger. Es algo fundamental introducir en Chile esta modalidad para evitar que a los dos años del ingreso a la Universidad, el 30% de los estudiantes se retiren. Varios se retiran porque no les fue bien, pero varios se retiran frustrados porque no les gusta la carrera; tienen que pasar dos años para darse cuenta que no les gusta algo y perder todo lo que estudiaron.

En su constante búsqueda, ha cambiado el formato de sus clases, deja que los alumnos hablen, que aprendan de sus compañeros, que participen. Les hace preguntas cada cierto tiempo. El otro procedimiento que está aplicando, es darles las preguntas con una semana de anticipación para que estudien preparando el examen. Pero, va más allá; desde la primera clase empieza a decirles, cuáles serán

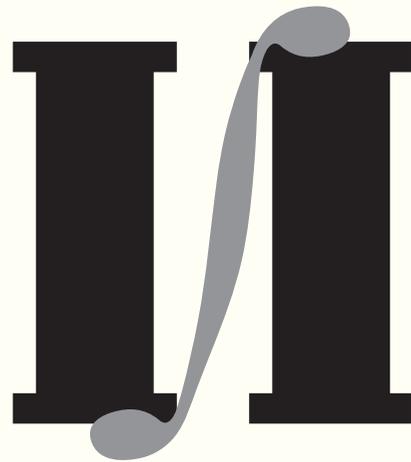
las preguntas del examen, para que empiecen a pensar y elaborar sus respuestas. Ahora tiene mejores evaluaciones que las que tenía antes y ha mejorado la calidad de lo aprendido. Está aplicando pensamiento crítico.

Al finalizar la entrevista y frente a la universalización de la ingeniería, señala que la revolución tecnológica 4.0 ha pasado a ser relevante en el incremento de la competitividad de los países y también de las personas. Sabemos que hoy no se puede estar fuera de internet, fuera del mundo digital, o bien se queda obsoleto. Pero al mismo tiempo, nos dice que hay que tener presente la preocupación respecto a la fascinación que tenemos con la tecnología. Es necesario ver

sus peligros, particularmente con la inteligencia artificial, pensando que eso es lo que viene y que la robotización va a sustituir empleos futuros. Entonces el problema de fondo que tenemos que ver en las escuelas de ingeniería, es cómo los robots se transforman en complementos y no sustitutos de la actividad laboral humana. Ese es el tema crucial para el futuro. La tecnología, no como amenaza, sino como complemento, y concluye diciendo: “La Inteligencia Artificial funciona con algoritmos. Son los seres humanos quienes los producen. No debemos transformarnos en robots ingenieriles si no en *seres humanos que usan robots*. Esto es lo que debiéramos estar enseñando en ingeniería y en la formación individual de cada persona”.



ISSN 0716 - 2340



**ANALES
DEL INSTITUTO
DE INGENIEROS DE CHILE**

Vol. 133, N° 2 - AGOSTO 2021

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

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

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

Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 133, N° 2, agosto de 2021.

Contenido

APLICACIONES DEL HIDRÓGENO VERDE EN EL SECTOR MOVILIDAD. Pág. 43

Lorenzo Reyes-Bozo, Carlos Fúnez Guerra, Claudia Sandoval Yañez y Guillermo Schaffeld.

COMPETENCIAS DE LOS INGENIEROS EN LA EDUCACIÓN 4.0 Pág. 53

Esteban Sefair Vera.

LA IMPORTANCIA DE LA HUELLA DEL AGUA Pág. 61

Yenifer González, Yannay Casas-Ledón y Gladys Vidal.

Editor

Raúl Uribe Sawada, Instituto de Ingenieros de Chile.

Comité Editorial

Rodolfo Saragoni H., Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA)

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

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

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

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

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

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

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

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

APLICACIONES DEL HIDRÓGENO VERDE EN EL SECTOR MOVILIDAD

Lorenzo Reyes-Bozo^{1,5}, Carlos Fúnez Guerra², Claudia Sandoval Yañez^{3,5}, Guillermo Schaffeld^{4,5}

Resumen

A nivel mundial, diferentes estudios de investigación revelan que los sistemas de transporte son responsables del 25% de las emisiones de CO₂. En el contexto de la movilidad sustentable, uno de los desafíos se asocia a la investigación y mejora de los combustibles alternativos, que permitan un rápido descenso en la generación de gases de efecto invernadero producido por nuestros desplazamientos y, en este sentido, el hidrógeno verde puede jugar un rol fundamental. El hidrógeno verde es la base para producir combustibles sintéticos, que pueden reemplazar al petróleo y sus derivados. Los combustibles sintéticos o e-fuel son hidrocarburos producidos a partir de dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno verde (H₂) como únicas materias primas. El H₂ o los combustibles sintéticos pueden ser utilizados en distintas aplicaciones: manufactura, transporte, minería, sector residencial, entre otras. La principal variable que afecta la producción de H₂ y sus derivados es el precio de la electricidad. Considerando el potencial renovable de Chile, es posible la producción de hidrógeno verde y su aplicación como vector energético, técnica y económicamente viable y con beneficios socioambientales. En este trabajo, diferentes aplicaciones del hidrógeno son evaluadas por medio de análisis técnicos y económicos, tomando en cuenta las variables principales de producción de H₂ verde.

¹ Ingeniero Civil Químico, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chile.

² Ingeniero de Minas, Centro Nacional del Hidrógeno, Calle Prolongación Fernando el Santo, 13500, Puertollano, España.

³ Químico, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chile.

⁴ Ingeniero Civil Bioquímico, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chile.

⁵ Grupo de Investigación en Energía y Procesos Sustentables, Ingeniería Civil Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chile, Av. Pedro de Valdivia 425, Providencia, 7500912, Chile.

1. INTRODUCCIÓN

La densidad poblacional y la escasa planificación territorial de las grandes urbes, ha tenido históricamente como centro de la movilidad el uso excesivo de transporte privado y, en muchos casos en los últimos años, con un uso unipersonal. Sin duda, bajo el contexto de pandemia de COVID-19, el uso de vehículos particulares se ha incrementado en desmedro del transporte público, principalmente por la percepción de riesgo de contagio. Una de las primeras consecuencias, es la saturación de las vías públicas de circulación por vehículos particulares, lo que a su vez trae asociado un mayor uso de combustibles y, por tanto, problemas de contaminación del aire y acústico, impactando negativamente a la salud de la población.

Las emisiones de CO₂ han crecido en las últimas décadas a nivel global. Por ejemplo, entre los años 2007 y 2017 las emisiones de CO₂ han aumentado un 13,3%, pasando de 28.984 millones de toneladas de CO₂ a 32.840 millones de toneladas [1]. Solo el sector transporte es responsable de 8,04 Gt CO₂, representando un 25% de las emisiones globales de CO₂ y requiriendo un 29% del consumo de energía global [2]. Por lo tanto, se hace necesario conceptualizar un modelo de movilidad sustentable, considerando distintos tipos de personas y necesidades y las condiciones propias de cada ciudad, que permita a las personas ir de un lugar a otro en medios menos contaminantes, de forma accesible, eficiente, segura y equitativa. Es decir, con criterios de inclusividad acorde a cada ciudadano. Una aproximación es modificar el actual modelo de gestión de movilidad, priorizando el diseño de las ciudades para el transporte peatonal, bicicletas, transporte público mayor y menor, dejando en último lugar el transporte compartido en vehículos privados y el uso unipersonal de autos y taxis.

En el contexto de la movilidad sustentable, uno de los desafíos se asocia a la investigación y mejora de los combustibles alternativos, que permitan un rápido descenso en la generación de gases de efecto invernadero producido por nuestros desplazamientos y este sentido, el hidrógeno verde puede jugar un rol fundamental.

El hidrógeno verde es la base para producir combustibles sintéticos, que pueden reemplazar al petróleo y sus derivados. Los combustibles sintéticos o e-fuel son hidrocarburos producidos a partir de dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno verde (H₂) como únicas materias primas [3]. El proceso requiere energía, la que

debe provenir de fuentes renovables (por ejemplo, energía eólica, solar, geotérmica, etc.). Principalmente, existen tres tipos de procesos para la producción de combustibles sintéticos, *Biomass-to-Liquid* (BtL), *Power & Biomass-to-Liquid* (PBtL) y *Power-to-Liquid* (PtL), por sus siglas en inglés (Figura 1). Estas tres rutas sintéticas, pueden ser llevadas a cabo por medio del proceso Fischer-Tropsch [4,5]. Los combustibles Fischer-Tropsch son componentes de mezcla sintéticos certificados que se pueden agregar hasta en un 50 por ciento al combustible para aviones convencionales [4].

Los combustibles sintéticos permiten una reducción significativa de las emisiones de CO₂ comparadas con las emisiones generadas por el uso de combustibles fósiles. Basadas en el análisis de ciclo de vida, las emisiones de CO₂ se pueden reducir sobre un 70%. Los combustibles sintéticos también poseen una mayor densidad energética respecto de las baterías, por ello, pueden ofrecer una solución a aquellas aplicaciones donde la electricidad aún no tiene una respuesta, por ejemplo, en la aviación y el transporte marítimo.

El transporte marítimo de mercancías y la aviación comercial tienen también opciones limitadas de combustibles alternativos bajos en emisiones. Aquí, el desarrollo de combustibles líquidos en base a hidrógeno verde representa una opción ambientalmente amigable a pesar de su costo de producción en relación con combustibles tradicionales. Hoy en día, variados grupos europeos de investigación, integrando investigadores e ingenieros, se encuentran trabajando en los llamados “*Designer Fuels*” o combustibles de diseño, para ser utilizados en transporte y aviación, así como, en aplicaciones espaciales avanzadas para el reemplazo de la hidracina, altamente tóxica, es decir la búsqueda de “*Green Propellants*” [6].

Hoy en día, la movilidad en base a hidrógeno verde dentro de las ciudades está adquiriendo una gran importancia, con presencia en el mercado de diferentes fabricantes de autobuses urbanos eléctricos de pila de combustible. Por ejemplo, en Europa existen más de 300 autobuses eléctricos de pila de combustible circulando, algunos de ellos, hace más de diez años. Asimismo, un medio de transporte basado en hidrógeno es la solución más adecuada en el transporte de mercancías de largas distancias por carretera, existiendo camiones alimentados por hidrógeno que almacenan alrededor de 100 kg de hidrógeno, con pilas de combustible de 200 kW e híbridos con baterías,

pudiendo desarrollar potencias de más de 500 kW y una autonomía superior a 1200 km.

La aplicación en la que el hidrógeno tiene un mayor potencial es su uso como combustible alternativo en servicios de transporte. El uso de hidrógeno verde en transporte favorece la reducción de emisiones contaminantes y, a la vez, permite el desarrollo de estrategias para la diversificación e independencia energética, en especial, para un país como Chile donde sus cadenas logísticas son relevantes. El hidrógeno como vector energético y los combustibles sintéticos pueden ser utilizados en distintas aplicaciones: manufactura, transporte, minería, sector residencial, entre otras. En este estudio se analiza la viabilidad técnica y económica para distintas aplicaciones del hidrógeno verde.

2. MÉTODOS

En este trabajo se reportan tres casos de estudio. El primer caso de estudio revela una evaluación técnico-económica de una planta centralizada de producción de hidrógeno verde para ser utilizado en el sector movilidad. El segundo caso, analiza el uso de hidrógeno verde -obtenido vía electrólisis de agua- en el sector ferroviario. Mientras que, el tercer caso de estudio analiza la producción de amoníaco verde en Chile. En todos los casos de estudio, se considera la producción de hidrógeno verde por fuentes renovables de energía. Desde el punto de vista operacional, los principales equipos utilizados para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde considera equipos disponibles en el mercado y las inversiones requeridas reflejan las cotizaciones obtenidas de proveedores industriales. Los principales equipos requeridos, son: Electrolizador, sistema de almacenamiento de hidrógeno, sistemas de compresión de hidrógeno, dispensadores de hidrógeno.

La estimación del costo total de producción se sustenta en los costos de capital (CAPEX) y costos operacionales (OPEX), para cada caso analizado. Los costos de capital incluyen el costo del equipo de producción de hidrógeno, almacenamiento, compresión, equipos auxiliares y obras civiles. Los

costos operacionales incluyen el costo de electricidad, agua, mantención de equipos, pago de personal y arriendo de terrenos. Para cada caso de estudio, los principales indicadores económicos calculados fueron el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y periodo de retorno de la inversión (PRI, payback period) Estos indicadores económicos fueron calculados considerando metodologías estándar de evaluación de proyectos [7, 8]. Los análisis de sensibilidad fueron realizados con la herramienta Oracle Crystal Ball, para determinar el efecto de las principales variables en el VAN.

3. RESULTADOS

Chile tiene uno de los principales potenciales renovables a nivel global. Por ejemplo, en el Desierto de Atacama, el promedio diario mensual del índice de radiación solar está entre 5 y 12 kWh/m² para el invierno y verano [9], respectivamente, para la irradiancia horizontal global (GHI, por sus siglas en inglés). El promedio anual para esta zona del país es superior a 7,5 kWh/m² (GHI), mientras que, se estima un valor de 9 kWh/m² para la irradiancia normal directa (DNI, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, estos índices de irradiancia solar permiten el desarrollo de proyectos competitivos a nivel mundial, sustentado en tecnologías fotovoltaicas y concentración solar de potencia. Adicionalmente, Chile posee un potencial eólico para el desarrollo de proyectos *in-shore* y *off-shore*. Por ejemplo, la velocidad del viento en el Océano Pacífico podría alcanzar velocidades promedio de 10 m/s. Todo este potencial renovable puede ser gestionado mediante de la producción de hidrógeno verde.

De acuerdo con la Comisión Nacional de Energía y los reportes de IRENA (International Renewable Energy Agency) [10, 11], la capacidad instalada de generación eléctrica basada en energías renovables se describe en la Tabla 1. Destacan las regiones de Antofagasta y Atacama, en donde la capacidad renovable instalada alcanza los 1589,5 (MW) y 1907,5 (MW), respectivamente.

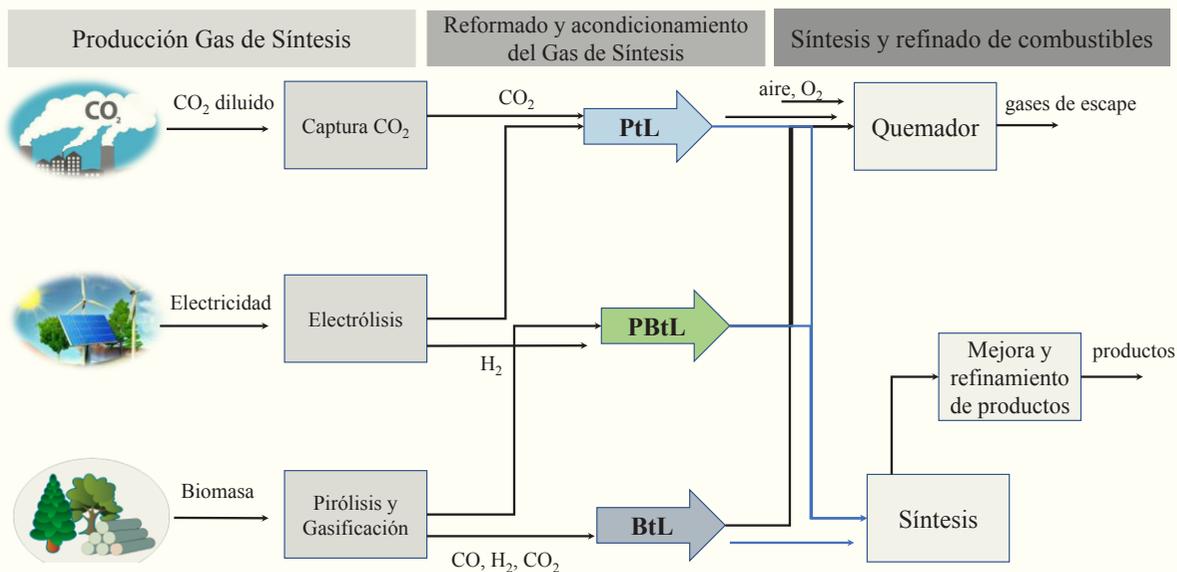


Figura 1. Representación esquemática de las rutas del proceso Fischer-Tropsch (adaptado de [6]).

Tabla 1: Capacidad instalada renovable para la generación de energía eléctrica en Chile (adaptado de [10, 11]).

Capacidad Instalada por región Energía Renovable (MW)	Biomasa	Eólica	Geotérmica	Mini Hidráulica	Solar	Total Renovable
Arica and Parinacota				11,4	8,2	19,6
Tarapacá				6,1	437,0	443,1
Antofagasta		301,0	44,9		1243,6	1589,5
Atacama		941,8		5,1	960,6	1907,5
Coquimbo		694,6		28,2	204,6	927,3
Valparaíso	7,4			3,0	169,2	179,6
Metropolitana de Santiago	42,5			88,0	373,2	503,7
Lib. Bernardo O'Higgins	16,2	18,0		34,1	224,8	293,0
Maule	37,0			113,1	140,7	290,9
Ñuble	71,1			20,0	29,8	120,9
Biobío	170,2	133,2		34,3	2,6	340,3
La Araucanía	81,0	386,9		80,7		548,7
Los Ríos	61,0			69,5		130,5
Los Lagos		230,1		90,7		320,7
Aisén		3,1		21,2		24,4
Magallanes		2,6				2,6
Total (MW)	486,3	2711,1	44,9	605,5	3794,4	7642,2

Actualmente, varios países han propuesto y aplicado distintas estrategias para producir hidrógeno verde y usarlo como vector energético con distintas aplicaciones estacionarias y móviles. La primera decisión está referida a cómo se debe producir el hidrógeno: de manera centralizada o distribuida. La primera alternativa, es útil para satisfacer la demanda de flotas cautivas, usando el hidrógeno verde como un nuevo vector energético para satisfacer la demanda y bajar las emisiones de gases de efecto invernadero. La producción centralizada de hidrógeno requiere el transporte del H₂ a diferentes hidrogenadoras para cubrir la demanda energética. Otra opción, es la generación distribuida de hidrógeno, produciendo el hidrógeno en el mismo lugar donde se distribuye (hidrogenadora).

Una planta centralizada de producción de hidrógeno verde de 2 MW de electrolizador PEM requiere 2,2 MW de energía eléctrica y 15 litros de agua por cada kg de hidrógeno producido. Para estas condiciones, el proceso de electrólisis produce 863 kg H₂/día, 3350 kg O₂/día y 21,6 MW/día de energía térmica. El costo total

de inversión para esta planta de producción centralizada de hidrógeno alcanza los 3,7 millones de Euros. Los principales indicadores económicos de la evaluación son: VAN 1.272.692 €, TIR del 14% y PRI de 9 años (Figura 2). El análisis de sensibilidad muestra que las principales variables que afectan el VAN son el costo de la electricidad y el tamaño de la planta (Tabla 2).

El sector transporte es uno de los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero y el transporte por carretera representa alrededor del 70%. En este sentido, las nuevas tecnologías basadas en el hidrógeno verde jugarán un papel clave. Con ello, se estudiarán variables como tecnología y conciencia ambiental, situación financiera e infraestructura adecuada para evaluar el uso del hidrógeno verde. La conciencia medioambiental y la disponibilidad de hidrógeno para los consumidores (diseño adecuado de la planta de producción de hidrógeno y de las estaciones de repostaje de hidrógeno), harán que se acepte el hidrógeno verde como combustible ecológico [12].

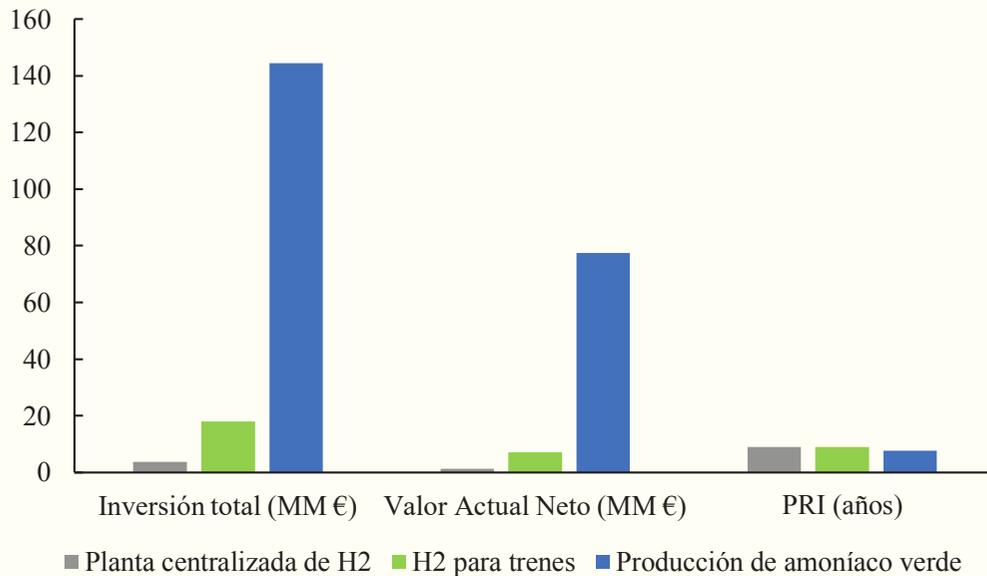


Figura 2: Inversión total y principales indicadores económicos para los diferentes casos de estudio.

Tabla 2: Análisis de sensibilidad de distintos casos de estudio (adaptado de [13-15]).

Estudio de Caso	Planta centralizada de H ₂	H ₂ para trenes	Producción de amoníaco verde
Variabes	Contribución a la varianza (%)		
Costo de Electricidad	62.9	-10.0	96.4
Tamaño de planta de producción de H ₂	36.7	--	--
Costo electrolizador	0.30	--	0.9
Horas de operación	0.00	5.5	1.0
Precio de hidrógeno	--	38.8	--
Tamaño del Electrolizador	--	44.3	0.4
Costo del ciclo Haber-Bosch	--	--	1.4
Precio del amoníaco	--	--	0.0

El sector del transporte ferroviario produce alrededor del 4,2% de las emisiones globales de CO₂, relacionadas con el sector del transporte. El transporte ferroviario tiene beneficios sociales y medioambientales, ya que reduce la congestión del tráfico, es más seguro y las emisiones son menores en comparación con otros medios de transporte [2], tanto para el transporte de carga como de pasajeros.

Para satisfacer la demanda de energía de una flota de 20 trenes, se requiere un sistema de producción de hidrógeno verde con tecnología de electrolizador polimérico de 10 MW. El electrolizador requiere de 11 MWh de energía eléctrica y 15 litros de agua bruta por cada kg de hidrógeno verde producido. El electrolizador producirá 200 kg H₂/h, 1600 kg O₂/h y 8 MWh de energía térmica residual.

El costo total de inversión de la planta de hidrógeno verde para satisfacer la demanda de 20 trenes es aproximadamente 18 millones de euros. Los principales indicadores económicos de la evaluación son: VAN 7.115.391 €; TIR del 23,5% y PRI de 9 años (Figura 2). El análisis de sensibilidad permite determinar que las principales variables que afectan el Valor Actual Neto (VAN) son la capacidad del

electrolizador o la capacidad de la estación de repostaje de hidrógeno y el precio del hidrógeno (Tabla 2).

Otros estudios reportados en la literatura [14-19], muestran que el hidrógeno verde es un vector energético que contribuye a descarbonizar las operaciones productivas con un alto desempeño energético para los sectores de energía y transporte. En particular, es posible el uso del hidrógeno verde y su integración en una estación de repostaje de hidrógeno para suplir la demanda de trenes híbridos de pila de combustible, tanto para trenes de pasajeros como para los ferrocarriles que transportan carga de distintos productos. La literatura describe una eficiencia de pila de combustible de alrededor del 50% y se estiman indicadores financieros atractivos (por ejemplo, TIR del 19%). Estos resultados confirman la oportunidad técnica y económica de utilizar hidrógeno verde en el transporte de pasajeros y de servicios de transporte de carga.

Considerando la transición energética, se deben evaluar otros combustibles limpios, mientras la economía del hidrógeno verde continúa desarrollándose. Actualmente, el amoníaco verde se ha considerado un medio de almacenamiento de hidrógeno y podría usarse como vector de energía

limpia. El amoníaco renovable también se utiliza como fertilizante, materia prima para la industria química, combustible de combustión limpia para el transporte, fluido refrigerante y generador de energía [14].

Para producir amoníaco verde a partir de hidrógeno verde se necesita un electrolizador polimérico (tecnología PEM) de 150 MW. Durante su producción, se aplica el proceso estándar de Haber-Bosch. El electrolizador requiere de 160 MW de energía eléctrica y 15 litros de agua por cada kg de hidrógeno producido. El electrolizador producirá 2687 kg H₂/h, 21582 kg O₂/h y 60 MWh de energía térmica residual.

El costo total de inversión para la producción de amoníaco verde es aproximadamente de 144 millones de Euros. Los principales indicadores económicos son: VAN 77.414.525 €; TIR del 17,0% y PRI de 7,6 años (Figura 2). El análisis de sensibilidad permite determinar que la principal variable que incide en el Valor Actual Neto (VAN) es el precio de la electricidad (Tabla 2). Considerando las últimas licitaciones de energía en Chile, las energías renovables (principalmente, solar y eólica) muestran los precios más bajos. Por lo tanto, con un bajo precio energético de las renovables, la producción de amoníaco verde en Chile es factible con buenos indicadores económicos, considerando la tecnología y condiciones de mercado que hoy operan.

Los casos de estudios que aquí se han presentado muestran el rol del hidrógeno verde en la descarbonización en el sector de la movilidad. No obstante, lo anterior, el hidrógeno verde como vector energético podría desempeñar diferentes roles, acorde al sector económico en el cual se utilice. Por ejemplo, podría contribuir a integrar las plantas renovables a gran escala, como portador de energía, descarbonizar la industria, el transporte y la calefacción de edificios y servir como materia prima para la industria química, entre otros [18, 19].

4. Conclusiones

El sector transporte es responsable de alrededor de 8,04 Gt de CO₂, representando aproximadamente el 25,0% de las emisiones globales de CO₂ y requiere alrededor del 29,0% del consumo global de energía final. En ese contexto, el hidrógeno verde jugará un rol fundamental en la descarbonización de los medios de transporte, siendo un vector energético que tiene amplias aplicaciones, siendo una alternativa ambientalmente amigable, socialmente beneficiosa y económicamente viable.

Los diferentes casos de estudio muestran que el hidrógeno verde es un vector energético que podría jugar un rol fundamental en el sector de la movilidad. Desde el punto de vista técnico, el hidrógeno verde es seguro, es un vector energético eficiente, la infraestructura está creciendo a nivel mundial, es sustentable con beneficios ambientales y sociales. Adicionalmente, desde el punto de vista económico, los proyectos de producción de hidrógeno verde presentan indicadores económicos aceptables, como, Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de retorno de la inversión (PRI).

Referencias

- [1] D.A. Hagos, E.O. Ahlgren. Exploring cost-effective transitions to fossil independent transportation in the future energy system of Denmark. *Applied Energy*, 261 (2020), 114389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114389>
- [2] C. Fúnez Guerra, L. Reyes-Bozo, E. Vyhmeister, J.L. Salazar, M. Jaén Caparrós, C. Clemente-Jul. Sustainability of hydrogen refuelling stations for trains using electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (2021), 13748-13759. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.044>
- [3] International Energy Agency. *The future of hydrogen*, 2019, pp.199.
- [4] ASTM International. *ASTM D7566—14C: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [5] R.U. Dietrich, F. Albrecht, T. Pregger. Production of Alternative Liquid Fuels in the Future Energy System. *Chemie Ingenieur Technik* 90 (2018), 179–192. <https://doi.org/10.1002/cite.201700090>
- [6] T. Pregger, G. Schiller, F. Cebulla, R.U. Dietrich, S. Maier, A. Thess, A. Lischke, N. Monnerie, C. Sattler, P.L. Clercq, B. Rauch, M. Köhler, M. Severin, P. Kutne, C. Voigt, H. Schlager, S. Ehrenberger, M. Feinauer, L. Werling, V.P. Zhukov, C. Kirchberger, H.K. Ciezki, F. Linke, T. Methling, U. Riedel, M. Aigner. Future Fuels—Analyses of the Future Prospects of Renewable Synthetic Fuels. *Energies* 13(1) (2020), 138. <https://doi.org/10.3390/en13010138>
- [7] C. Dimian Alexandre, S. Bildea Costin, A. Kiss Anton. Economic evaluation of projects. In: Dimian Alexandre C, Bildea Costin S, Kiss Anton A, editors. *Computer aided chemical engineering*, 35 (2014), 717-755.
- [8] V. Bartoov, P. Majerk, D. Hrakov. Taking risk into account in the evaluation of economic efficiency of investment projects: traditional methods. *Procedia Economics and Finance*, 24 (2015), 68-75.
- [9] E. Vyhmeister, C. Aleixendri-Muñoz, J.M. Bermúdez Miquel, J. Pina Moya, C. Fúnez Guerra, L. Rodríguez Mayor, A. Godoy-Faúndez, P. Higuera, C. Clemente-Jul, H. Valdés-González, L. Reyes-Bozo. A combined photovoltaic and novel renewable energy system: An optimized techno-economic analysis for mining industry applications. *Journal of Cleaner Production*, 149 (2017), 999-1010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.136>
- [10] CNE (National Energy Commission). *Generation installed capacity report (2021)*. Available online: <https://www.cne.cl/estadisticas/electricidad/>. [Accessed 26 April 2021].
- [11] IRENA (International Renewable Energy Agency), *Insights on Renewables (2021)*. Available online: www.irena.org/Statistics. [Accessed April 27, 2021].
- [12] D. Apostolou, S.N. Welcher. Prospects of the hydrogen-based mobility in the private vehicle market. A social perspective in Denmark. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9) (2021), 6885-6900. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.167>
- [13] C. Fúnez Guerra, M. Jaén Caparrós, B. Nieto Calderón, V. Sendarrubias Carbonero, E. Nieto Gallego, L. Reyes-Bozo, A. Godoy-Faúndez, C. Clemente-Jul, E. Vyhmeister. Viability analysis of centralized hydrogen generation plant for use in mobility sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (2018), 11793-11802. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.178>
- [14] C. Fúnez Guerra, L. Reyes-Bozo, E. Vyhmeister, M. Jaén Caparrós, J.L. Salazar, A. Godoy-Faúndez, C. Clemente-Jul, D. Verastegui-Rayó. Viability analysis of underground mining machinery using green hydrogen as a fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020), 5112-5121. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.250>
- [15] C. Fúnez Guerra, L. Reyes-Bozo, E. Vyhmeister, M. Jaén Caparrós, J.L. Salazar, C. Clemente-Jul. Technical-economic analysis for a green ammonia production plant in Chile and its subsequent transport to Japan. *Renewable Energy*, 157 (2020), 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.041>

- [16] F. Piraino, M. Genovese, P. Fragiacomio. Energy Conversion and Management, 228 (2021), 113650.
- [17] P. Fragiacomio, M. Genovese. Towards a new mobility concept for regional trains and hydrogen infrastructure. Energy Conversion and Management, 228 (2021), 113332. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113650>
- [18] G. Matute, J.M. Yusta, L.C. Correias. Techno-economic modelling of water electrolyzers in the range of several MW to provide grid services while generating hydrogen for different applications: A case study in Spain applied to mobility with FCEVs. International Journal of Hydrogen Energy, 44 (2019), 17431-17442. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.092>
- [19] Hydrogen Council. How hydrogen empowers the energy transition, 2017, pp. 19.
-

COMPETENCIAS DE LOS INGENIEROS EN LA EDUCACIÓN 4.0

Esteban Sefair Vera¹

RESUMEN

En nuestro país, así como en la mayoría de los países de América Latina, las universidades se ven enfrentadas a un conjunto de retos que las obligan a mejorar la calidad de los procesos formativos que entregan, adecuándolos a las demandas requeridas para las profesiones a nivel global. Por ello, este trabajo, tomando como base el contexto y diferentes aportes de autores e instituciones referentes, en relación a la denominada Industria 4.0, realiza un análisis de las tendencias y competencias relacionadas con la formación profesional en ingeniería, con base en las demandas laborales.

¹ Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan – Argentina (revalidado en Chile). Doctor en Educación, Universidad de Almería – España. Decano, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso. esteban.sefair@uv.cl

1. INTRODUCCIÓN

La educación superior continúa siendo el determinante estructural de la creación y difusión del conocimiento, de la formación y consolidación del capital humano avanzado y de la generación de movilidad social. Por tanto, en las sociedades contemporáneas los sistemas de educación superior presentan un rol fundamental, donde el conocimiento o el capital humano están reemplazando, como factor del desarrollo, al capital físico (Consejo Asesor Presidencial, 2008). Considerando lo anterior, es posible aseverar que, en la nueva economía, la prosperidad de los países es cada vez más dependiente de la calidad y pertinencia de sus sistemas educativos.

“La universidad debe cumplir la función social que espera la sociedad de ella, no sólo en equidad en el acceso, sino también en lo que se refiere al estado del arte en conocimientos, informaciones y propuestas de soluciones para un adecuado desarrollo sostenible humano y social” (Segrera, 2016, p. 30).

Lo que impulsa a las universidades a mejorar la calidad de los procesos formativos que ofrecen a sus estudiantes, para adecuarlos a las demandas que las profesiones exigen a nivel global, en que la universidad debe asumir responsabilidades para con los estudiantes y las necesidades del país (Mella, Menke y Babul, 2002).

En este contexto, uno de los grandes desafíos se refiere a las competencias profesionales asociadas con la irrupción de la denominada Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0. Debido a los avances tecnológicos de las TIC's, no solo las organizaciones deben adoptar nuevas formas de operación, impactando sobre el empleo (Peralta Beltrán, Bilous, Flores Ramos y Bombón Escobar, 2020), sino que también las personas deben innovar la forma en que estudian, trabajan y viven. Lo que finalmente, hace que los sistemas de educación superior deban rediseñar los modelos formativos usados tradicionalmente (Rojas Arenas, Jiménez Medina, Durango Marín y Giraldo, 2019). Como afirma González-Páramo (2017):

“El análisis de las características de la Cuarta Revolución Industrial sugiere que existe una analogía entre la globalización y la transición al nuevo entorno digital, a lo largo de la cual muchos

empleos desaparecerán, otros se transformarán y surgirán nuevas necesidades” (p. 15).

Por lo anterior, muchas investigaciones coinciden en que, en este escenario, las nuevas competencias requeridas no solo serán de carácter técnico y metodológico, sino también de tipo interactivas y personales (competencias transversales), que deberán ser adquiridas mediante la experiencia en distintos contextos y actividades (Echeverría Samanes y Martínez Clares, 2018), ya que las “nuevas máquinas inteligentes” se encontrarán en oficinas, fábricas y hogares, formando parte integral de la producción, la enseñanza, la medicina y la seguridad, impactando en nuestra forma de vida (Institute for the Future, 2011).

2. DESARROLLO

2.1. Industria 4.0

El término Industria 4.0, también denominado “Cuarta Revolución Industrial”, aparece por primera vez en Alemania en 2011, y forma parte de una iniciativa de ese país para implementar una estrategia tecnológica que permitiera integrar los sistemas avanzados de control con las tecnologías de información y comunicación (TIC) y así poder comunicar las personas, los productos y los sistemas complejos en la fábrica digital (Carvajal Rojas, 2017).

Para la IndustriALL Global Union (2018), “Industria 4.0 se utiliza como una etiqueta para la adopción de toda tecnología que sea avanzada, emergente y potencialmente disruptiva. Esto incluye, a modo de ejemplo, la digitalización y la inteligencia artificial” (p.4).

Estas definiciones han sido adoptadas a pesar de no ser del todo precisas, ya que abarcan el uso de una gran variedad de tecnologías. Sin embargo, para los fines de este trabajo, ocuparemos para Industria 4.0 las tecnologías asociadas a la definición del Boston Consulting Group (2018), donde convergen a lo menos nueve tecnologías (Figura 1) que, por sí mismas o integradas, requerirán desarrollar nuevas competencias profesionales. La base de la Cuarta Revolución Industrial son las personas, puesto que el principal objetivo es “crear ambientes de trabajo dinámicos y ágiles donde las personas estén motivadas mediante el uso de las tecnológicas” (Archanco, 2018).



Figura 1. Tecnologías de la Industria 4.0. Adaptado de: “Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries” (2015)

En palabras de Vessuri (2008):

“Es muy probable que se desarrollen nuevas disciplinas como derivación natural de los avances vertiginosos en la ciencia y la tecnología. Surgirá una fuerza de trabajo en estas nuevas disciplinas que pudieran ser tan importantes como lo son hoy las relativamente nuevas ciencias de la computación, la biología matemática, la genómica, las ciencias ambientales y la astrofísica” (p. 84).

2.2. Impacto en el empleo

A medida que se va masificando la adopción de las tecnologías vinculadas a la Industria 4.0, se van generando impactos en el empleo. Sin duda, el incremento en el uso de los robots, el Internet de las cosas, la inteligencia artificial y el Big Data van desplazando a los trabajadores actuales de algunas actividades (especialmente de tareas rutinarias), a la vez que se desarrolla nuevas tareas que generan la creación de nuevos empleos (González-Páramo, 2017). En este sentido, el mismo autor señala que existen 3 características del entorno laboral del futuro:

1. En la era digital la diferenciación del trabajo se hará sobre la base de tareas rutinarias, cualificadas o no, que puedan robotizarse, versus tareas no rutinarias que requieran de complejidad, patrones y relaciones.

2. La economía de la colaboración y las plataformas digitales impulsarán el emprendimiento y los trabajos por encargo, impactando de manera directa en los empleos a tiempo completo que puedan ser reemplazados por tareas y proyectos.
3. Debido al impacto en la velocidad del desarrollo tecnológico, los trabajos del futuro serán más flexibles y exigirán a los trabajadores mayor capacidad de reinventarse y menor sobrespecialización.

Por otra parte, los estudios de Eurofound (2018, a y b) establecen que la digitalización y la sustitución de trabajadores por máquinas (en sentido amplio), al favorecer formas más complejas de organizar la producción:

1. Facilitan la tercerización de un mayor número de tareas, incluso en los procesos de producción tradicionales.
2. Pueden generar condiciones de empleo menos favorables para los trabajadores en términos de estabilidad, ingresos, horas de trabajo y relaciones sindicales, propiciando la subcontratación.
3. Afectarán especialmente áreas como logística, control de calidad, administración y producción debido a la menor relevancia de la ubicación física del trabajo, y a la mayor eficiencia de los procesos digitalizados de gestión y control, generalmente asociados con aumentos de la productividad (ahorros en la mano de obra).
4. Globalizan el empleo, ya que ahora se podrán entregar servicios presenciales desde cualquier lugar del planeta.
5. Favorecen un aumento en la demanda de mano de obra en las empresas de suministro de tecnología.
6. Aumentan la importancia de las capacidades de comunicación y el trabajo en equipos multidisciplinares.

Y también, se potenciarán nuevas formas de empleo (Eurofound, 2018, c):

1. Intercambio estratégico de empleados, una forma de gestión cooperativa de los colaboradores que va más allá de una sola

organización. Aquí, un conjunto de empresas forman un "equipo" de trabajadores que se asignan a las empresas participantes a trabajos individuales según necesidad.

2. Trabajo compartido, aquí un empleador contrata (de manera normal) dos trabajadores para una sola posición de tiempo completo. Es una forma de trabajo a tiempo parcial que garantiza que los trabajos cuenten con personal permanente.
3. Gestión interina, es una forma de empleo en la que la empresa contrata a un experto altamente especializado de manera temporal y con un fin específico. Puede hacerse de manera directa o a través de una agencia de empleo.
4. Trabajo temporal, se refiere a un tipo de trabajo donde el empleo no es estable ni continuo. El Parlamento Europeo (2000) define el trabajo temporal como "trabajo irregular o intermitente sin expectativa de empleo continuo".
5. Trabajo móvil basado en TIC (teletrabajo), aquí el trabajo se realiza, al menos en parte, pero de manera regular fuera de la oficina de la empresa a través de conexiones en línea.
6. Trabajo basado en voucher, en esta forma de empleo un empleador adquiere un cupón de un tercero (normalmente el Gobierno) para ser utilizado como pago del servicio de un trabajador por una tarea específica.
7. Trabajo de cartera, se trata de contratistas por cuenta propia, autónomos o microempresas, que de manera asociada realizan trabajos para un gran número de clientes.
8. Plataformas de trabajo, es una forma de empleo que utiliza una plataforma online para conectar empresas o individuos con otras organizaciones o individuos y así para resolver sus necesidades o proporcionar servicios específicos.
9. Trabajo autónomo colaborativo, significa colaboración entre trabajadores autónomos y entre las PYME para hacer negocios y superar limitaciones generalmente de tamaño. Van más allá de las cadenas de suministro o relaciones de socios comerciales, y sus formas típicas son: organizaciones paraguas, co-trabajo y cooperativas.

De lo mencionado, se puede observar que el mercado laboral, como consecuencia de las nuevas tecnologías, se caracterizará, entre otros elementos, por la aparición de nuevas formas de trabajo (muchas de ellas de tipo asociativo entre personas o empresas), determinadas por la tercerización de actividades, las plataformas digitales, la robotización, la globalización y el desarrollo tecnológico. Estos cambios en el mercado laboral requerirán de sus participantes nuevas competencias, entre las que se pueden destacar: la flexibilidad, las capacidades comunicativas, el trabajo en equipos multidisciplinarios, la capacidad emprendedora y el uso de la tecnología. Entonces, el desafío para la educación superior es poder anticiparse y generar las acciones necesarias para formar profesionales adecuados al nuevo escenario.

A lo ya expuesto debe sumarse que, en América Latina debido por la irrupción del COVID-19, tanto en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México se aceleró e incrementó la transformación tecnológica, con diferentes niveles de dificultad, dependiendo del tipo y tamaño de empresa, donde a pesar del contexto recesivo existen dificultades para encontrar personal capacitado con las habilidades requeridas (Basco y Lavena, 2021).

2.3. Educación 4.0 en Ingeniería

De acuerdo con el World Economic Forum, se prevé que un 65% de los niños que hoy se encuentran en la escuela básica es muy probable que trabajen en profesiones que hoy no existen (González-Páramo, 2017; Manpower Group, 2017; Van Dam, 2017). De ellos, los que accedan a la formación superior o universitaria, ingresarán al mercado laboral en la década de 2030. Lo que trae un gran desafío en cuanto a qué habilidades y capacidades se deben potenciar para que estas personas se transformen en ciudadanos activos, ya que los empleos del futuro requerirán trabajar en un entorno tecnológico claramente diferente.

Por ello, los sistemas educativos deberán convivir de manera equilibrada con las nuevas tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial (sistemas expertos, robótica, realidad virtual, data mining, inteligencia artificial, cloud computing, por mencionar algunas), sin olvidar la garantía de una educación inclusiva, equitativa y de calidad que sea capaz de promover oportunidades de aprendizaje a lo largo de la vida (Fierro Santillán y Díaz Azuara, 2017). Preparando a

los niños y jóvenes para un futuro en el que utilicen y se complementen con la tecnología, a la vez que sean capaces de crear, innovar y emprender.

En este contexto, muchos estudios reconocen que el sistema educativo, en todos los niveles, y en su mérito, debe potenciar las capacidades técnicas del acrónimo STEM (Science, Technology, Engineering y Mathematics) debido a las demandas profesionales emergentes de tareas estadísticas, de procesamiento de datos, con capacidades para resolver problemas no estructurados y generar conocimiento mediante la información (González-Páramo, 2017; Manpower Group, 2017; Eurofound, 2018, a y b). Sin embargo, de acuerdo con el estudio del BID, en Latinoamérica existe el gran desafío que es aumentar la existencia de capital humano con habilidades en STEM, ya que “casi 3 de cada 10 empresas reconoce la falta de personal con habilidades blandas y habilidades duras, y las habilidades en STEM se identifican como las más ausentes” (Basco y Lavena, 2021).

Y, aunque las capacidades cognitivas seguirán siendo necesarias, se deben potenciar otras habilidades como el trabajo en equipo, la creatividad, la empatía, la adaptabilidad a los cambios y la capacidad de razonar y pensar fuera de lo tradicional (González-Páramo, 2017).

Además de los perfiles ocupacionales específicos de las diferentes ingenierías, generalmente altamente calificados, las habilidades no técnicas serán cada vez más relevantes en la formación de las nuevas generaciones. Las habilidades sociales, de comunicación y de adaptación al entorno adquieren más importancia en la medida que las tecnologías abarcan dominios técnicos diferentes y especializados, ya que requerirán la colaboración interdisciplinaria entre los integrantes de los equipos de trabajo, así como de los proveedores de servicios internos y externos (Eurofound, 2018, c).

Van Dam (2017), en su trabajo sobre las mutaciones de la ciencia y la tecnología, define un conjunto de competencias necesarias para los profesionales que trabajarán desde el 2020. Estas son: resolución de problemas complejos, pensamiento crítico, creatividad, coordinación con otros, inteligencia emocional, capacidad de análisis y toma de decisiones, orientación al servicio, negociación, flexibilidad cognitiva y gestión de personas. De ellas, la más importante dice

relación con la creatividad, puesto que las personas necesitarán ser más creativas en un contexto donde conviven nuevos productos, nuevas tecnologías y nuevas formas de trabajo.

De manera similar, el World Economic Forum (2016), en su estudio acerca de las habilidades básicas relacionadas con el trabajo, sobre las nueve más relevantes identificadas, indica que las cuatro más importantes son: 1) habilidades cognitivas (flexibilidad cognitiva, creatividad, razonamiento lógico, razonamiento matemático y solución de problemas); 2) habilidades relacionadas con los procesos de trabajo (escucha activa, pensamiento crítico y autoevaluación); 3) capacidad de resolver problemas complejos; y, 4) habilidades para adquirir conocimiento (aprendizaje activo, expresión oral, comprensión lectora, expresión escrita y competencias TIC).

A la vez, Carvajal Rojas (2021), en su trabajo sobre competencias en Ingeniería, identifica algunas competencias genéricas y específicas que, sin ser exhaustivas, coinciden con lo expresado en otros estudios al respecto. Las principales competencias genéricas se refieren a: desarrollo de aplicaciones matemáticas con software especialista; capacidad migrar desde ciencias básicas y principios fundamentales de ingeniería propios de la disciplina hacia sistemas complejos interdisciplinarios; realizar experimentos en ambientes virtuales; capacidad de generar relaciones comunicativas (orales y escritas), en ambientes virtuales y presenciales, para poder desempeñarse en equipos multidisciplinarios; fortalecer los valores relacionados con la tolerancia, democracia, responsabilidad, derechos y deberes; y, desarrollar aprendizajes para poder trabajar y realizar investigación en ambientes multi e inter disciplinarios usando tecnologías en ambientes virtuales, remotos e interactivos.

Es innegable que la Industria 4.0 generará un cambio en el empleo y el trabajo, y probablemente, este cambio podrá tomar muchas formas. Lo relevante es que las tecnologías digitales y físicas inteligentes se pueden utilizar para mejorar los trabajos y facilitar las tareas, pudiendo pensarse en una asociación, en que las tecnologías autónomas trabajen junto a las personas, aprovechando cada una sus fortalezas para lograr un mejor resultado de lo que cualquiera podría lograr solo. (sinergia) (Schwartz et al., 2017)

Por tanto, en función del conjunto de competencias y habilidades que demandará la Industria 4.0, donde la tecnología se convierte en un proceso central en cuanto a la transformación digital de la educación (Ranz, 2016), podemos decir que, en la formación en Ingeniería, debemos adaptar los procesos formativos con el fin de mejorar las capacidades para la empleabilidad futura de los ingenieros, garantizando el desarrollo del talento humano y el aprendizaje de las competencias, clave del nuevo contexto socio-laboral.

3. CONCLUSIONES

La Cuarta Revolución Industrial ha impactado, y lo seguirá haciendo, en la manera en que las personas convivimos, aprendemos y nos relacionamos, modificando no solamente las relaciones económicas entre empresas, gobiernos y países, sino también redefiniendo las relaciones laborales, las relaciones sociales y las capacidades profesionales requeridas de los ingenieros.

Hoy debemos ser capaces de vivir y convivir con las tecnologías que están redefiniendo, al menos en América Latina, la manera en que se forman los profesionales del futuro. Las evidencias indican que se está produciendo un fuerte impacto en el empleo, en especial en las relaciones trabajo-organizaciones, además de la aparición de nuevas formas de trabajo, que exigen nuevas competencias formativas.

De lo analizado, los estudios e investigaciones indican que, dentro del conjunto de competencias necesarias para los ingenieros en los próximos 10 años, independientemente de la especialidad, se destacan: la capacidad de innovar y emprender, el razonamiento lógico-matemático, las habilidades sociales y comunicativas, la capacidad de enfrentar y resolver problemas complejos, y disponer de un conjunto de competencias TIC adecuadas al tipo de profesión o trabajo a realizar. Sin olvidar, la capacidad de desarrollar nuevos aprendizajes a lo largo de la vida.

En relación a las competencias TIC, se deben desarrollar en los estudiantes capacidades para generar aplicaciones con software especialista o e-learning; aprender y emplear Internet y dispositivos móviles en las comunicaciones entre equipos inter o multidisciplinarios de trabajo; explorar, seleccionar y utilizar sistemas multimedia de interacción e integración social; y, adaptarse a trabajo en equipos multidisciplinarios e interdisciplinarios con convergencia de tecnologías en ambientes virtuales, remotos e interactivos.

Por ello, las escuelas de Ingeniería deben adaptarse a estas tendencias, generando los mecanismos necesarios que permitan entregar las habilidades necesarias para impulsar la empleabilidad de sus egresados, adoptando y adaptando nuevas formas de enseñar y aprender que vayan de la mano con la evolución de la ciencia y la tecnología. En ese sentido, la incorporación de metodologías activas, de aprendizaje adaptativo y móvil, soportadas en TIC y modelos STEM puede contribuir al objetivo, ya que deben cambiarse las prácticas educativas orientándolas hacia sistemas de formación continua con reconocimiento de aprendizajes previos, que potencien la formación inter y multidisciplinaria, a nivel de pre y posgrado.

Lograr esto va a requerir que seamos capaces de desarrollar y fortalecer el talento de nuestros académicos, ya que los desafíos en educación para la Industria 4.0 implican la implementación de modelos de educación por competencias, con enfoques basados en la medición del aprendizaje, fomentando el aumento del aprendizaje mixto o híbrido, que mejore la alfabetización digital. A ello debe sumarse la personalización del aprendizaje, con una mezcla de aprendizaje formal e informal. Un gran desafío, pero no imposible.

BIBLIOGRAFÍA

- Archando, R. (2018). Los 9 pilares tecnológicos de la industria 4.0 que todo CEO debe conocer. Papeles de inteligencia. [En línea], español. Disponible: <https://papelesdeinteligencia.com/pilares-tecnologicos-de-la-industria-4-0/> [2018, septiembre 27].
- Bakhshi, H., Downing, J., Osborne, M. y Schneider, P. (2017). *The Future of Skills: Employment in 2030*. London: Pearson and Nesta.
- Basco, A. y Lavena, C. (2021). *América Latina en movimiento. Competencias y habilidades para la cuarta revolución industrial en el contexto de pandemia*. Instituto para la Integración de América Latina y el Caribe (INTAL). Sector de Integración y Comercio (INT). NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-2176BID. Consultado el 17 de julio 2021. En: <https://publications.iadb.org/es/america-latina-en-movimiento-competencias-y-habilidades-para-la-cuarta-revolucion-industrial-en-el>
- Boston Consulting Group (2018). *Acelerando el desarrollo de la Industria 4.0 en Argentina*. Buenos Aires: Nieponice, G., Rivera, R., Tfelti, A. y Drewanz, J.
- Carvajal Rojas, J. (2017). *La Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0 y su Impacto en la Educación Superior en Ingeniería en Latinoamérica y el Caribe*. Trabajo presentado en: 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, Boca Raton, Estados Unidos.
- Consejo Asesor Presidencial. (2008). Informe: Los desafíos de la Educación Superior chilena. Consultado el 12 de marzo 2019. En: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/IN793/1/material_docente/bajar?id_material=338460
- Echeverría Samanes, B. y Martínez Clares, P. (2018). Revolución 4.0, competencias, educación y orientación. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 12(2), 4-34. <http://dx.doi.org/10.19083/ridu.2018.831>
- El desafío de la Industria 4.0 y la exigencia de nuevas respuestas* (2018). Montevideo: IndustriALL Global Union
- Eurofound (2018, a). *Automation, digitisation and platforms: Implications for work and employment*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.
- Eurofound (2018, b). *Game changing technologies: Exploring the impact on production processes and work*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.
- Eurofound (2018, c). *Overview of new forms of employment- 2018 update*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.
- Fierro Santillán, C y Díaz Azuara, S. (2017, julio 31). La cuarta revolución industrial en la educación. *Iberoaméricadivulga* [En línea], Español. Disponible: <https://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?La-cuarta-revolucion-industrial-en-la-educacion> [2019, marzo 20].
- González-Páramo, J. (2017). *Cuarta revolución industrial, empleo y estado de bienestar*. Madrid: Real Academia de las Ciencias Morales y Políticas
- Institute for the Future (2011). *Future Work Skills 2020*. University of Phoenix. Research Institute. California: Davies, A., Fidler, D., Gorbis, M.
- Manpower Group (2017). *La revolución de las competencias: talento, empleabilidad y tecnología*. Madrid: Serie Human Age.
- Mella, J., Menke, L., Babul, J. (2002). Formación universitaria en un mundo globalizado y cambiante. El programa Académico de bachillerato de la Universidad de Chile. Retención y movilidad estudiantil en la educación superior [Versión electrónica]. *Revista Calidad en la Educación*, 17, 175-185.
- Peralta Beltrán, A., Bilous, A., Flores Ramos, C. y Bombón Escobar, C. (2020). El impacto del teletrabajo y la administración de empresas. *RECIMUNDO*, 327 - 335. Obtenido de <https://recimundo.com/index.php/es/article/view/761/1154>
- Ranz, R. (2016). Una educación 4.0 para el fomento del talento 4.0. [En línea], Español. Consultado: [12, abril, 2019] Disponible: <https://robertoranz.com/2016/05/30/una-educacion-4-0-para-el-fomento-del-talento-4-0/>
- Rojas Arenas, I. D., Jiménez Medina, E., Durango Marín, J. A. y Giraldo, J. E. (2019). Aprendizaje por competencias e industria 4.0, un reto para la formación en ingeniería industrial. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 2. Consultado en 10 de julio 2021. Obtenido de: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/695>
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., y Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. Consultado

- el 15 de junio 2021. Disponible en: https://inovasyon.org/images/Haberler/bcgperspectives_Industry40_2015.pdf
- Segrera, Francisco López. (2016). Educación Superior Comparada: Tendencias Mundiales y de América Latina y Caribe. *Avaliação: Revista da Avaliação da Educação Superior (Campinas)*, 21(1), 13-32. <https://dx.doi.org/10.1590/S1414-40772016000100002>
- Schwartz, J., Collins, L., Stockton, H., Wagner, D. y Walsh, B. (2017, febrero 28) *The future of work: the augmented workforce*. Deloitte University Press. [En línea] Inglés. Consultado: [12, abril, 2019] Disponible en: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/human-capital-trends/2017/future-workforce-changing-nature-of-work.html>
- Van Dam, D. (2017). The 4th industrial revolution & the future of work. [En línea]. Consultado: [20, marzo, 2019] Disponible en: <https://bookboon.com/es/the-4th-industrial-revolution-the-future-of-jobs-ebook>
- Vessuri, H. (2008). El futuro nos alcanza: mutaciones previsibles de la ciencia y la tecnología. En A. Gazzola y A. Didriksson (comp.), *Tendencias de la Educación Superior en América Latina y el Caribe* (pp. 55-88). Caracas: IESALC – UNESCO
- World Economic Forum (2016). *The human capital report*. Genova: WRR

LA IMPORTANCIA DE LA HUELLA DEL AGUA

Yenifer González¹, Yannay Casas-Ledón² y Gladys Vidal³

RESUMEN

Hoy en día existe una preocupación por la disponibilidad del recurso hídrico debido a la creciente incertidumbre que genera el cambio climático sobre este vital elemento. En los últimos años esta variación en el clima del planeta ha traído consigo diversos fenómenos naturales que se han visto incrementados en intensidad y recurrencia, dejando a su paso grandes devastaciones y pérdidas humanas y materiales. En Chile, el fenómeno que se ha presentado en el último tiempo es la sequía, considerándose siendo catalogada incluso como una mega sequía. A causa de esto, se piensa que en los próximos años se incrementarán las temperaturas y disminuirán las precipitaciones.

La baja disponibilidad de agua en diferentes zonas de la tierra y particularmente en nuestro territorio, conduce a buscar nuevos mecanismos para generar conciencia en el sistema productivo y en la población, para configurar una sociedad más inteligente en el uso de este recurso natural. El término de “Huella del agua” nace de la necesidad de cuantificar cuánta agua usamos diariamente en forma directa e indirecta. Esta respuesta solo es posible responderla en forma adecuada en el mundo si se plantean metodologías estándares para su medición en todo el planeta. La cuantificación del agua en la generación de un producto, o en un proceso productivo es la base para entender y cambiar los hábitos de uso del agua, bajo una nueva cultura y relacionamiento con agua, en una era de escasez hídrica.

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

² Yannay Casas-Ledón, Ingeniera Química, Dra. Ciencias Biológicas Aplicada, Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA-UDEC), Departamento de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción.

³ Gladys Vidal, Ingeniera Civil Industrial mención Agroindustrias, Dra. en Ciencias Químicas (Programa Biotecnología Ambiental). Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA-UDEC), Departamento de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM).

1. INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un recurso vital para todos los seres vivos, porque de ella depende gran parte de los procesos que ocurren en nuestro organismo y una falta de este recurso nos podría llevar a la muerte (Iglesias-Rosado *et al.* 2011), siendo justamente este tipo de agua el que se encuentra con menor disponibilidad en el planeta (Figura 1). Además, es un recurso necesario para la obtención de diferentes productos y servicios que encontramos actualmente, como es el caso de la agricultura en donde es fundamental, o para generar energía; constituyendo un aporte para lograr un desarrollo productivo y económico de los países.

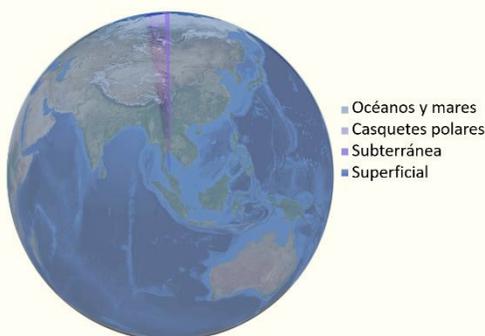


Figura 1. Distribución del agua en la Tierra.
Datos extraídos de: Auge 2007

En los últimos años nos hemos visto enfrentados a una megasequía, la que ha traído como consecuencias un alza en las temperaturas y una disminución en las precipitaciones, que podrían alcanzar entre un 30% a un 40% hacia mediados del siglo XXI (McPhee *et al.* 2012). Y es debido a éste y a otros fenómenos naturales, consecuencia del cambio climático, que los países afectados han tenido que postergar sus programas de desarrollo. O en otros casos, esta situación ha llevado a agravar las precarias condiciones económicas y sociales que ya existían en algunos países con anterioridad al desastre, dado que se deben invertir millones de dólares para subsanar la situación, estimándose que las pérdidas por sequía en agricultura pueden alcanzar un 47% del

total de pérdidas en valor de las cosechas ocasionadas por fenómenos naturales (Ortega 2013).

Chile no es ajeno a esta situación, ya que estructuralmente vulnerable a la sequía (Núñez *et al.* 2016), debido a su diversa geografía. La sequía afecta consigo a los diversos sectores productivos, ya que son las actividades que una mayor cantidad de agua utilizan, liderados por el sector agropecuario, +que utiliza un 73% del agua disponible en el país (Figura 2).

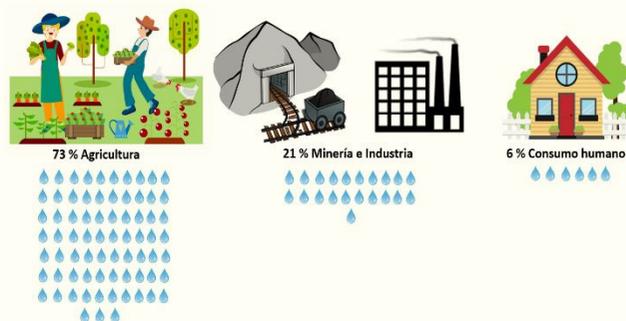


Figura 2. Distribución de los usos consuntivos del agua en Chile.
Datos extraídos de: Ayala 2010.

Es por ello que el uso y la gestión del agua son un elemento clave para cualquier organización en vista de la creciente demanda y escasez de agua. La gestión del agua constituye un requisito a nivel local, regional y global, es por ello la necesidad de una herramienta de evaluación coherente. En este sentido es que surge el concepto de la Huella Hídrica o Huella del agua.

3. HUELLA DEL AGUA

La Huella Hídrica o Huella del agua es un indicador global de la apropiación y consumo de los recursos de agua dulce, que se utiliza para definir el volumen de agua dulce total usado directa o indirectamente para producir bienes y servicios (Hoekstra 2008), siendo un instrumento que facilita la comprensión de los impactos ambientales relacionados con el uso eficiente de los recursos hídricos. La aplicación de dicha herramienta aportaría numerosas ventajas y beneficios para cualquier proceso, actividad o servicio tales como:

- Disponer información con base científica para la toma de decisiones y actuar de forma proactiva frente riesgos relacionados con la disponibilidad y uso del agua.
- Mejorar la eficacia de productos, procesos y organización.
- Apoyar en campañas de marketing y comunicaciones, obteniendo mayor reconocimiento como entidad responsable con el medioambiente, estableciendo mayor competitividad en el mercado.
- Visualizar el uso oculto (indirecto) del agua de diferentes productos y comprender los efectos del consumo y el comercio frente al agua y su disponibilidad.



Figura 3. Concepto de Huella del Agua.

El concepto de Huella Hídrica nació en el año 2002 por parte del Dr. Arjen Hoekstra (Hoekstra, 2003) creando la metodología para poder estimarla y dando posteriormente lugar a la Water Footprint Network (WFN), una plataforma online que busca promover la transición hacia el uso sostenible de los recursos de agua dulce por medio de la Huella Hídrica. En el año 2014 se creó el marco normativo a través de la ISO 14046:2014 *Gestión Ambiental- Huella de agua- Principios, requisitos y directrices*.

Ambas plataformas tienen el objetivo de evaluar y concientizar sobre el uso racional del recurso agua tomando como base la Huella Hídrica, presentando distintas visiones sobre el mismo concepto, pero que proporcionan información específica que se complementan entre sí (Pfister *et al.* 2017).

3.1. Metodología según “The water footprint network”. Las metodologías existentes establecen las directrices y pasos a seguir en la estimación de la Huella Hídrica, reconocidas a nivel mundial desarrolladas por Water Footprint Network (WFN) y estandarizada por la ISO 14046:2014.

La metodología (WFN): Cubre un conjunto de definiciones y métodos para la contabilidad de la Huella Hídrica, diferenciadas en tres clasificaciones: Huella Hídrica azul, Huella Hídrica verde y Huella Hídrica gris. Además, muestra cómo se calculan las Huellas Hídricas para procesos y productos individuales, así como para consumidores, empresas, naciones, regiones, etc.

- **La ISO 14046:2014:** Similar a la WFN también esta normativa establece las directrices para ser aplicada a productos, procesos y organizaciones basados en evaluaciones de sus Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Las mayores diferencias con la anterior radican en que está orientada a evaluar los impactos ambientales y a la salud humana relacionados al consumo y contaminación del agua (Pfister *et al.* 2017).

A pesar de las diferencias metodológicas entre ambos estándares, ellos proporcionan definiciones y métodos de cálculo relevantes para las empresas y gobiernos en la formulación de estrategias y políticas relacionadas a la sustentabilidad del uso del recurso agua (Pfister *et al.* 2017).

En la WFN, la Huella Hídrica adquiere un enfoque volumétrico, definiéndose como “El volumen total de agua dulce utilizada para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o comunidad o producidos por una organización”, expresándose en unidades de volumen por unidades de tiempo ($m^3/año$). La Huella Hídrica también se expresa en función del tipo de agua que se considere, y se puede desglosar según sus componentes (Hoekstra and Chapagain, 2008; Mekonnen and Hoekstra 2011) (Figura 4):

- **Huella Hídrica Azul (HH_{azul}):** corresponde al agua que se incorpora a un producto y proviene de fuentes naturales ya sean superficiales o subterráneas como ríos, manantiales o acuíferos.
- **Huella Hídrica Verde (HH_{verde}):** es el agua proveniente de la lluvia, deshielos o de la nieve que se incorpora a un producto. Principalmente se encuentra presente en productos agrícolas.
- **Huella Hídrica Gris (HH_{gris}):** ésta corresponde al volumen de agua dulce necesaria para diluir los contaminantes de manera que la calidad del agua permanezca sobre los estándares de calidad.

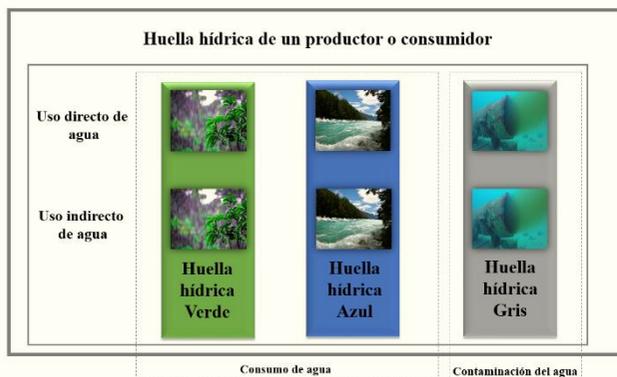


Figura 4. Representación esquemática de los componentes de la Huella Hídrica. Adaptado de Hoekstra *et al.* (2011).

Un punto a tener en consideración es que en el cálculo de la Huella Hídrica no se considera el uso de agua azul mientras ésta sea devuelta a su lugar de origen. En la Figura 5 se encuentra la evaluación de la Huella Hídrica en el caso de un producto que, en este caso, es la producción de una camiseta.



Figura 5. Ejemplo del cálculo de la Huella Hídrica de una camiseta.

Una evaluación completa de la Huella Hídrica consta de cuatro fases:

1. Establecer objetivos y alcance
2. Contabilidad de la Huella Hídrica
3. Evaluación de la sostenibilidad de la Huella Hídrica
4. Formulación de respuesta de la Huella Hídrica

Esta evaluación es una herramienta útil para ayudar a comprender cómo se relacionan las actividades y los productos con la escasez de agua, y la contaminación con sus posibles impactos que pueda generar, además de ayudar a comprender qué es lo que se puede hacer para garantizar que las actividades contribuyan al uso sostenible del agua dulce (Hoekstra *et al.*, 2011).

3.2. Normativa ISO 14046. La norma ISO 14046:2014 es el principal referente internacional para evaluaciones y comunicaciones en el registro e inventario de la Huella Hídrica dentro de los sistemas productivos. Especifica la guía de evaluación, principios y requisitos en las diversas cadenas de consumo y suministro. Junto a los aspectos claves en su aplicación por ejemplo en productos, procesos y organizaciones, basados en evaluaciones de sus ciclos de vida. Considerando (Ferrer 2014):

- **Uso consuntivo.** Definido como agua que es consumida durante la producción de un producto, proceso o servicio, considerando que el volumen el agua de salida será menor que el de entrada.
- **Uso degradativo.** Relaciona la calidad del agua, es decir, que el agua de salida tendrá peor calidad que el agua ingresada a un proceso o servicio.

Esta normativa busca correlacionar los términos antes expuestos en distintos indicadores ambientales:

- Daño a la salud humana. En este indicador se relaciona cómo el uso consuntivo y degradativo pueden afectar a la salud humana, en donde se representarán el número de años perdidos debido a una enfermedad o a una muerte prematura.
- Daño a la calidad del ecosistema. También se evalúan los daños asociados al uso consuntivo y degradativo del agua sobre la calidad de los ecosistemas
- Índice de Impacto Hídrico. Permite establecer el estrés hídrico que caracteriza una zona geográfica debido al uso consuntivo y degradativo del agua.

Para implementar esta normativa, se debe adoptar una metodología que se basa en seguir una serie de pasos para evaluar de una buena forma los potenciales impactos ambientales que pueden resultar del uso del agua. Esta metodología se resume en la Figura 6, la cual muestra los 4 pasos principales a seguir en caso de querer realizar una evaluación de la Huella de agua.



Figura 6. Metodología de la ISO 14046 (International Organization for Standardization)

Esta evaluación de la Huella del agua a través de la ISO 14046 puede otorgar diferentes ventajas tales como (International Organization for Standardization):

- Evaluar la magnitud de impactos potenciales relacionados con el agua.
- Identificar oportunidades para reducir los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua.

- La gestión estratégica del riesgo relacionado con el agua.
- Facilitar la eficiencia del agua y la optimización de la gestión del agua.
- Informar a quienes toman decisiones en la industria, y en las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales de sus impactos ambientales potenciales relacionados con el agua.
- Proporcionar información coherente y fiable con base en evidencia científica para dar el informe de los resultados de la huella de agua.

4. ESCALAS DE APLICACIÓN

El concepto de Huella Hídrica tiene relación con el impacto ambiental que puede tener el consumir cierto producto, generando así información respecto de qué productos impactan más en los cuerpos de agua y también sobre cuáles se pudiera lograr ahorrar agua al utilizarlos de una manera más consciente.

Esta Huella Hídrica puede ser aplicada en todos los servicios y productos que consumimos diariamente, en donde, se estima que el 96% de la Huella Hídrica de los consumidores está relacionada directamente con los productos que consumimos, ya sean industriales o agrícolas y que la producción agrícola contribuye con el 92 % de la Huella Hídrica global (Mekonnen and Hoekstra 2011).

La evaluación de la Huella Hídrica depende en gran medida de la escala de aplicación. A continuación, se describen los principales niveles (Figura 7) (Hoekstra *et al.* 2011):

- ✓ **Para un proceso.** Esta Huella Hídrica constituye la base para todas las demás Huellas Hídricas que se puedan calcular. Es el resultado de la suma de las Huellas Hídricas de los diversos pasos del proceso que sean relevantes en la producción del producto.
- ✓ **Para un producto.** La Huella Hídrica de un producto se define como el volumen de agua consumido directa e indirectamente para su producción, expresado en m³ de agua por unidad de producto (kg, MJ, kWh, entre otros). El consumo directo para la fabricación de un producto incluye el agua utilizada o contaminada durante el proceso de fabricación y el agua incorporada en el propio producto como ingrediente. A diferencia del consumo indirecto, el que corresponde a toda el agua

necesaria para producir las diferentes materias primas utilizadas en el proceso (productos de la cadena de suministro).

- ✓ **Para un consumidor.** Corresponde a la suma de las Huellas Hídricas de todos los productos consumidos por el consumidor. Las unidades de medida son de volumen/tiempo.
- ✓ **Para una comunidad.** La suma de las Huellas Hídricas de los miembros de la comunidad.
- ✓ **Para una nación.** La suma de las Huellas Hídricas de los habitantes del país.
- ✓ **Para una empresa.** La suma de las Huellas Hídricas de los productos finales que produce la empresa.
- ✓ **Para un área delimitada geográficamente.** Dentro de esto cabe un municipio, provincia, estado, nación o cuenca, y corresponde a la suma de las Huellas Hídricas de todos los procesos que tienen lugar en el área.

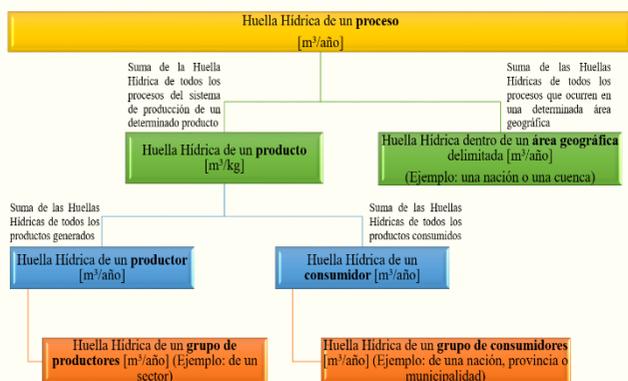


Figura 7. Escalas de aplicación de la Huella Hídrica por la WFN. Adaptado de: Hoekstra *et al.* 2011

4.1. Para un proceso. La Huella Hídrica de un proceso, como se mencionó anteriormente, se expresa en unidades de volumen de agua por unidad de tiempo, cuando ésta se divide sobre la cantidad de producto que resulta del proceso, se puede expresar como volumen de agua por unidad de producto según la metodología de la WFN. Es según esta metodología que surgen los términos “Huella Hídrica directa” y “Huella Hídrica indirecta” en donde la primera se entiende como el volumen de agua que es directamente sustraído desde el área o sistema analizado y posteriormente consumido por cada uno de los distintos procesos que ocurren dentro de esta”, mientras que la segunda se refiere al

volumen virtual de agua requerida para la producción de productos y/o servicios que son demandados por los distintos procesos que se desarrollan en el área analizada, pero no producida en él (Hoekstra *et al.* 2011). En la Figura 8 se muestra el caso para la producción de carne en donde se integra la Huella Hídrica directa e indirecta en todo el ciclo productivo.

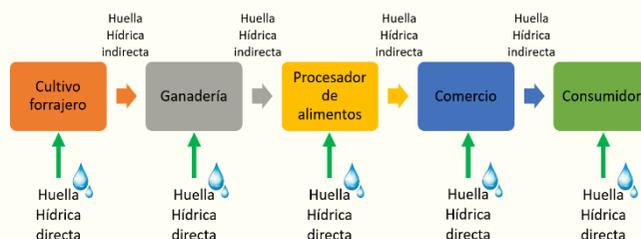


Figura 8. Huella Hídrica directa e indirecta en cada etapa de la cadena de suministro de un producto animal. Adaptado de Hoekstra *et al.* 2011

El caso anterior es según la metodología de la WFN, pero también un proceso se puede evaluar mediante la normativa ISO 14046, en donde se debe recopilar información y evaluar los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua utilizada o afectada por el proceso. Para esto es necesario realizar un inventario con las entradas y salidas del agua en el sistema, interpretar los resultados y evaluar los impactos generados por el uso del agua (Ferrer 2014).

4.2. Para el comercio. Así como existen productores regionales que generan una gran cantidad de los productos que consumimos, la mayoría de éstos vienen de fuentes externas y se importan a diario, importándose con ellos el agua que ha sido utilizada como materia prima en los procesos, naciendo así el término de “Agua Virtual”, el cual depende de:

- ✓ Condiciones de producción (incluyendo lugar y hora de producción)
- ✓ Qué tan eficiente ha sido utilizada el agua

Es así, como la Huella Hídrica de los diferentes países se componen de la Huella Hídrica interna y externa.

- Huella Hídrica interna. Se refiere al agua utilizada dentro del país para producir bienes y servicios.
- Huella Hídrica externa. Es el volumen anual de agua que utilizan otros países para producir bienes y servicios importados y consumidos en el país que se ha considerado, es decir es el volumen de Agua Virtual que se importa dentro de un producto (Hoekstra 2008).

Los cuatro factores principales que determinan la Huella Hídrica de un país son:

- Volumen de consumo (relacionado con el ingreso nacional bruto)
- Patrón de consumo (Por ejemplo: alto o bajo consumo de carne)
- Clima (Condiciones de crecimiento)
- Práctica agrícola (Eficiencia en el uso del agua)

Hoekstra and Chapagain (2006) realizaron un estudio entre el año 1997 y 2001 encontrando que la Huella Hídrica promedio global es de 1240 m³/año per cápita, teniendo que en Estados Unidos, esta Huella Hídrica tiene un promedio de 2480 m³/año per cápita, mientras que China tiene una huella promedio de 700 m³/año per cápita.

Al 2005, los países industrializados tenían las Huellas Hídricas en el rango de 1250 hasta 2850 m³/año per cápita, el Reino Unido se encuentra con el valor más bajo llegando a tener una Huella Hídrica de 1258 m³/año mientras que Estados Unidos ocupaba un lugar superior teniendo 2842 m³/año per cápita. Mientras que en los países en desarrollo la Huella Hídrica varía mucho más llegando desde 550 hasta 3800 m³/año (Hoekstra and Mekonnen 2012).

Estas diferencias no sólo se deben a los patrones de consumo de los habitantes de cada país, sino que también a las diferencias de las Huellas Hídricas de los productos consumidos en el país, ya que según como sea la productividad en el uso del agua, los valores pueden aumentar drásticamente. Se tienen registros que el producir un Kilogramo de grano en un país árido puede necesitar entre 2 o 3 veces más agua que el producirlo en un país húmedo (Hoekstra 2003) es por ello que se hace relevante tomar en consideración el lugar dónde se producen los alimentos y cuál es el destino final de ellos, jugando un rol especial la seguridad hídrica de los países con baja disponibilidad de agua, ya que muchos países tienen impactos significativos en el consumo de agua y contaminación de otros, desde los cuáles se importan los productos usados masivamente.

En la Figura 9 se puede observar el balance hídrico de agua virtual por país, en donde los países que se encuentran en verde tienen una exportación de agua virtual, esto quiere decir que están llevando gran cantidad de productos a otros países, llevando consigo el agua que se necesita para producirlos. En el caso de

los que están en amarillo a rojo tienen una importación de agua virtual, por lo tanto, importan productos que llevan consigo una gran cantidad de agua, la que se muestra en la tabla al costado izquierdo de la Figura.

Los mayores exportadores de agua virtual se encuentran en América del Norte y del Sur, Asia y Australia, mientras que los mayores importadores de agua virtual son África, México, Europa, Japón y Corea del Sur comercializándose principalmente cultivos oleaginosos, es decir, de aquellos que se extrae aceite (Hoekstra and Mekonnen 2012).

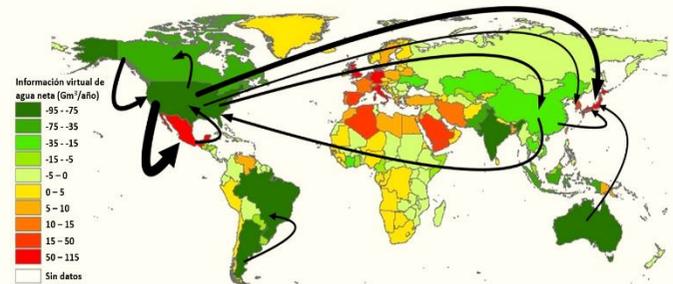


Figura 9. Balance hídrico por país y dirección de los flujos brutos de agua virtual relacionados con el comercio de productos agrícolas e industriales durante el período 1996-2005, mostrándose sólo los mayores flujos brutos (>15 Gm³/año). Extraído de: Hoekstra and Mekonnen (2012).

5. HUELLA HÍDRICA DE ALGUNOS PRODUCTOS

Varios han sido los esfuerzos para estimar la Huella Hídrica de diversos productos, haciendo énfasis en los productos alimenticios, en la Figura 10, se presenta la pirámide alimenticia de los principales alimentos consumidos con sus respectivas Huella Hídricas (Hoekstra 2008). En el estudio realizado por Hoekstra and Mekonnen (2012) encontraron que la Huella Hídrica promedio mundial de un consumidor asciende a 1.385 m³/año, la cual está dada mayoritariamente por el consumo de productos de cereales (27%), seguidos de carne (22%) y productos lácteos (7%).

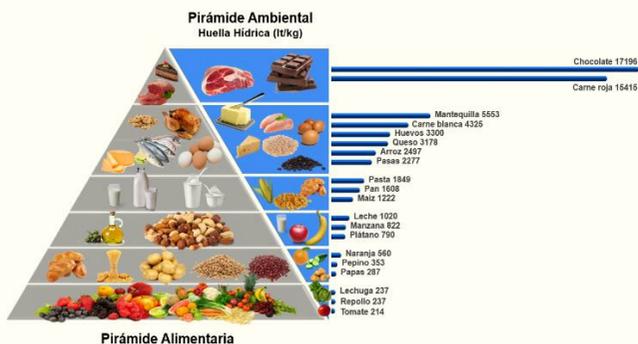


Figura 10. Pirámide alimentaria y valores de Huella Hídrica. Valores obtenidos de Water Footprint Network.

La Huella Hídrica mundial relacionada con la producción de cultivos fue de 7404 mil millones de m³/año en el período 1996-2005, estando compuesta por un 78% de Huella Hídrica verde, un 12% de Huella Hídrica azul y un 10% de Huella Hídrica gris.

Mekonnen and Hoekstra (2011) encontraron que la Huella Hídrica promedio mundial aumenta desde los cultivos de azúcar, teniendo una Huella Hídrica de aproximadamente 200 m³/ton hasta las legumbres que presentan una Huella Hídrica de 4000 m³/ton, pero esta Huella Hídrica puede variar por la categoría del cultivo y por la zona en donde ha sido producido, teniendo el trigo y el arroz las mayores Huellas Hídricas azul.

Al considerar por tonelada de producto, el café, té, cacao, tabaco, especias, nueces, caucho y fibras presentan Huellas Hídricas relativamente grandes.

En el caso del consumo de productos animales es posible que un aumento en el consumo de este tipo de alimentos ejerza una mayor presión sobre los recursos de agua dulce en el mundo, dado que casi un tercio de la Huella Hídrica total de la agricultura en el mundo se encuentra relacionada con la producción de productos animales. Cualquier Huella Hídrica de un producto animal es mayor que la Huella Hídrica de los productos de cultivo con un valor nutricional equivalente, siendo 20 veces mayor en promedio por caloría que para los cereales y las raíces con almidón, y teniendo que la Huella Hídrica por gramo de proteína para la leche, huevos y la carne de pollo es 1,5 veces mayor que para las legumbres. Estos valores también difieren si los productos animales provienen de sistemas industriales o de sistemas de pastoreo o mixtos, ya que los primeros generalmente consumen y contaminan más recursos de aguas subterráneas y superficiales, contribuyendo así a aumentar la Huella Hídrica gris. También varía de un país a otro debido a las diferencias en el clima y la

práctica agrícola que sea utilizada para obtener el alimento de los animales (Mekonnen and Hoekstra 2011). En la Figura 11 se observan las huellas hídricas de la carne de diferentes animales.

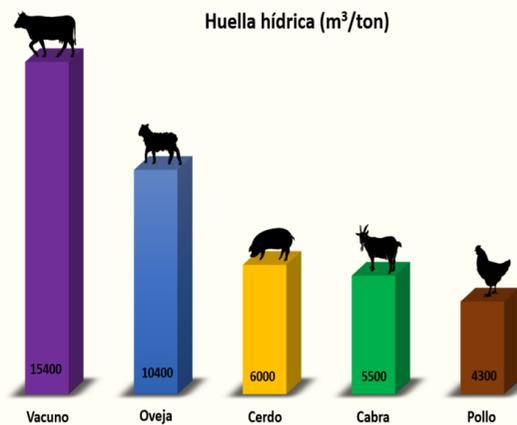


Figura 11. Huella Hídrica de la carne de diferentes animales. Elaboración propia con datos obtenidos de Mekonnen and Hoekstra (2011).

Es importante mencionar, que el impacto de la Huella Hídrica varía significativamente entre procesos, consumidores, comunidades, regiones y países, dependiendo principalmente de:

- Condiciones climáticas (temperaturas, precipitaciones, geología, topografía y escorrentía): en este caso las precipitaciones juegan un papel muy importante en el sector agrícola y ganadero. Una disminución de las precipitaciones traería consigo un incremento del uso de las reservas de agua dulce superficiales y subterráneas disponible en cada región, ejerciendo mayor presión y competencia con otros usos del agua. Además, la Huella Hídrica azul del agua superficial y subterránea serían mayores para las regiones áridas y semiáridas (Álvarez 2018).
- Desarrollo tecnológico del lugar en donde se esté produciendo: las prácticas agrícolas y ganaderas, constituyen factores claves en la obtención de un producto con calidad, con menores consumos de recursos, no necesariamente de agua sino también de combustibles, agroquímicos, entre otros.
- Gobernanza y políticas públicas. La adecuación de políticas locales de gobernanza relacionadas al agua y el rango de actores

involucrados en las decisiones sobre el agua y sus prioridades.

- La vulnerabilidad del ecosistema del río o humedal a la extracción de agua; y el impacto acumulativo de la contaminación de diferentes fuentes, así como, el costo de oportunidad de diferentes usos del agua y el grado de competencia entre diferentes usuarios de agua dentro de una cuenca fluvial determinada.
- Las diferencias existentes entre los países, regiones en términos de las principales actividades económicas que dominan cada lugar.
- Hábitos de consumos: Los hábitos de consumos principalmente relacionados a los consumidores constituyen la base para un uso eficiente del recurso agua. Hábitos responsables reducirían significativamente los consumos de recursos.

6. SITUACIÓN MUNDIAL

Para calcular la Huella Hídrica mundial se ha estudiado la Huella Hídrica por nación considerando la producción como el consumo de bienes y servicios. Encontrándose como resultados que la huella hídrica anual global de la humanidad en el período 1996-2005 fue de 9,087 Gm³/año, estando compuesto este valor de un 74 % de huella hídrica verde, un 11% de huella hídrica azul y un 15 % de huella hídrica gris, aportando la producción agrícola con un 92 % de la huella hídrica global, además teniendo que una quinta parte de esta huella hídrica global se relaciona con la producción para exportación (Hoekstra and Mekonnen 2012).

En la Figura 12 se observan las huellas hídricas totales de los diferentes países en el período antes mencionado y en la Figura 13 se muestra el detalle de la huella hídrica verde, azul y gris. Es así como en este período también se pudo estimar que el volumen total de flujo de agua virtual relacionado con el comercio de productos agrícolas e industriales fue de 2,320 Gm³/año, constituyéndose de un 68% de huella hídrica verde, un 13% de huella hídrica azul y un 19 % de huella hídrica gris. Así teniendo en cuenta que varios países dependen en gran medida de los recursos hídricos extranjeros y que muchos países tienen impactos significativos en el consumo de agua y contaminación de otros lugares (Hoekstra and Mekonnen 2012).

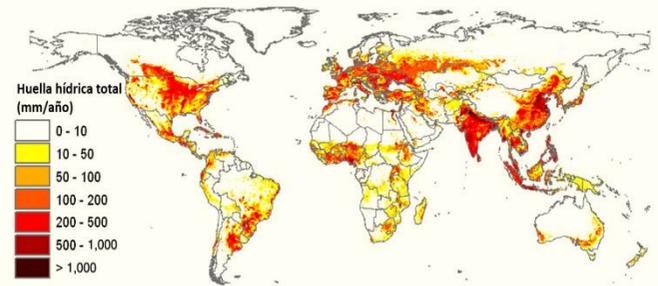


Figura 12. Huella Hídrica de la humanidad durante el período 1996-2005. Adaptado de Hoekstra and Mekonnen (2012).

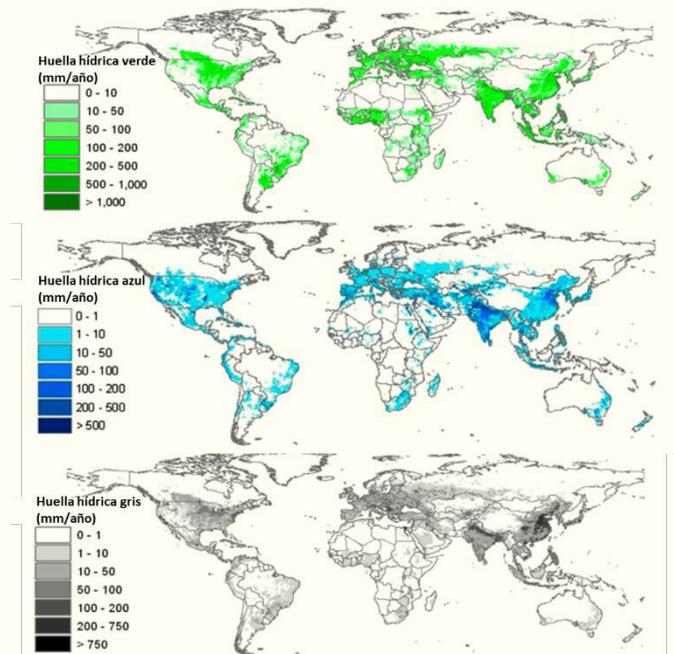


Figura 13. Huellas hídricas verde, azul y gris dentro de las naciones en el período 1996-2005. Adaptado de Hoekstra and Mekonnen (2012).

7. CONSIDERACIONES FINALES

A pesar de la relevancia de la estimación de la Huella Hídrica frente a los escenarios actuales de escasez y presión ambiental sobre este valioso recurso, aún persisten limitaciones en la estimación de dicho indicador:

- ✓ La Huella Hídrica no constituye por sí sola una medida de los impactos económicos, sociales o ambientales derivados al consumo y

contaminación de las aguas. Como herramienta tiene una finalidad definida, la generación de respuestas apropiadas por parte de las empresas y gobernantes requerirán otros criterios para la toma de decisiones (Chapagain and Tickner 2012).

- ✓ La resolución espacial y los fundamentos de los datos de los factores de caracterización del impacto de la Huella Hídrica también pudieran limitar la capacidad de interpretar los resultados que pueden generarse (Northey *et al.* 2016).
- ✓ La disponibilidad de datos de uso de agua, datos de inventario para las cadenas de suministro de los productos locales son factores que limitan la aplicabilidad y la veracidad de los resultados obtenidos (Northey *et al.* 2016).

Para un mejor entendimiento de la herramienta Huella Hídrica, esta debe ir acompañada de mecanismos que fomenten su divulgación, comunicación, y regulación entre los cuales se pudiera mencionar:

- ✓ Ecoetiquetado de productos: aspecto que proporcionaría información ambiental relacionada al recurso hídrico de cualquier producto, permitiendo a su vez una mayor información a los consumidores.
- ✓ Establecer Certificaciones relacionadas a la Huella Hídrica. Avanzar en la búsqueda de certificaciones que, si bien son voluntarias, proporcionarían elementos diferenciadores en el mercado nacional e internacional principalmente para los procesos y productos. En este sentido, Chile ha lanzado una nueva iniciativa que otorga a sectores productivos y empresas una certificación denominada “Certificado Azul”. Dicha certificación fue desarrollada en el marco del programa SuizAgua y presentada por la Fundación Chile. Es una iniciativa público-privada lanzada en el presente año (2021) que promueve la gestión sustentable de los recursos hídricos a largo de la cadena de producción de sectores productivos y empresas a través de la verificación y certificación de la huella hídrica estandarizada por la ISO 14046:2014. Esta iniciativa constituye una enorme oportunidad para incentivar prácticas de eficiencia hídrica a escala nacional.

- ✓ La educación ambiental es sumamente importante para lograr concientizar y fomentar hábitos responsables sobre el consumo de los recursos.
- ✓ Las exigencias en términos de regulaciones y derechos del agua, constituyen un elemento clave en establecer mejores políticas hacia la sustentabilidad del recurso agua (Álvarez 2018).

Como se ha visto, todo lo que usamos y comemos tiene una Huella Hídrica; por lo tanto, se hace fundamental gestionar este recurso de una buena manera, incrementando el rendimiento en su uso. Es así como con pequeños gestos podemos disminuir nuestra Huella Hídrica o Huella del agua, mediante cambios en las rutinas, en el consumo de alimentos y en el patrón de consumo en general de diferentes bienes y servicios.



Algunos de estos gestos se presentan en la Figura 14.

Figura 14. Acciones tendientes a reducir la Huella Hídrica personal.

Es vital tener todas estas recomendaciones claras en nuestro día a día ya que, en el actual escenario de escasez hídrica, cada gota cuenta y se hace insostenible para el planeta seguir manteniendo el estilo de vida que estamos llevando, el que se enfoca mayoritariamente en sostener las comodidades que tenemos sin considerar el desgaste ecológico que se produce cada vez que adquirimos un nuevo bien o servicio. En este ámbito, la educación ambiental se hace primordial para generar una sociedad consciente e informada de lo que pasa a nuestro alrededor, contribuyendo así a crear una sociedad responsable con el medio ambiente en su diario vivir.

8. AGRADECIMIENTOS.

- ANID/FONDAP/15130015

9. REFERENCIAS

- Álvarez P. 2018. The water footprint challenge for water resources management in Chilean arid zones. *Water international*, **43**(6), 846-859.
- Auge M. 2007. Agua fuente de vida. *Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires*.
- Ayala L. 2010. Aspectos técnicos de la gestión integrada de las aguas (GIRH) – Primera etapa diagnóstico. Informe preparado para el diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Santiago, Chile.
- Chapagain A. and Tickner D. 2012. Water footprint: Help or hindrance?. *Water Alternatives*, **5**(3), 563-581.
- Ferrer M. 2014. Huella Hídrica: La nueva norma internacional ISO 14046: 2014 y su implementación. CONAMA 2014.
- Hoekstra A. 2003. Virtual Water. An Introduction. En: Virtual Water Trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series N° 12. Delft, the Netherlands, 13- 23.
- Hoekstra A. 2008. The water footprint of food. En: The Swedish Research Council for Environment, Stockholm, p.12.
- Hoekstra A. and Chapagain A. 2008. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Blackwell Publishing. p 208.
- Hoekstra A., Chapagain A., Mekonnen M. and Aldaya M. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. *Routledge*.
- Hoekstra A. and Mekonnen M. 2012. The water footprint of humanity. *Proceedings of The National Academy of Sciences*, **109**(9), 3232-3237.
- Iglesias-Rosado C., Villarino-Marín A., Martínez J., Cabrerizo L., Gargallo M., Lorenzo H. and Russolillo J. 2011. Importancia del agua en la hidratación de la población española: documento FESNAD 2010. *Nutrición Hospitalaria*, **26**(1), 27-36.
- International Organization for Standardization (ISO). 2014. ISO 14046:2014 Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines. Disponible en <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14046:ed-1:vi:es>
- McPhee J., De la Fuente A., Herrera P., Niño Y., Olivares M., Sancha A. and Vargas X. 2012. El sector del agua en Chile. Su estado y sus retos. En B. Jiménez Cisneros & J. 169-192.
- Mekonnen M. and Hoekstra A. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, **15**(5), 1577-1600.
- Northey S., Mudd G., Saarivuori E., Wessman-Jääskeläinen H. and Haque N. 2016. Water footprinting and mining: where are the limitations and opportunities? *Journal of Cleaner Production*, **135**, 1098-1116.
- Núñez J., Hallack-Alegría M. and Cadena M. 2016. Resolving regional frequency analysis of precipitation at large and complex scales using a bottom-up approach: The Latin America and the Caribbean Drought Atlas. *Journal of Hydrology*, **538**, 515-538.
- Ortega D. 2013. Sequía: causas y efectos de un fenómeno global. *Ciencia UANL*, **16** (61), 8-15.
- Pfister S., Boulay A., Berger M., Hadjikakou M., Motoshita M., Hess T., ... and Manzano A. 2017. Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016) "A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA". *Ecological Indicators*, **72**, 352-359.

10. ANEXO.

PAGINAS DE INTERÉS

- <https://waterfootprint.org/en/>
- <https://www.watercalculator.org/wfc2/esp>

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

AGUAS ANDINAS S.A.

ALSTOM CHILE S.A.

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

COLBÚN S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

EMPRESA CONSTRUCTORA GUZMÁN Y LARRAÍN LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

ENEL GENERACIÓN CHILE S.A.

FLUOR CHILE S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUIMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE S.A.

EMPRESAS DE INGENIERÍA COLABORADORAS

ACTIC CONSULTORES LTDA.

ARCADIS CHILE S.A.

IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

ZAÑARTU INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

VISA

El deporte tiene nuevos beneficios.



con tus Tarjetas de Crédito Bci Visa



Escanea el código o ingresa a
Bci.cl



Disfrútalos también con:



Cámbiate a Bci    BancoBci  Más información en Bci.cl



El detalle de las promociones, sus vigencias y condiciones se indican en www.bci.cl. La responsabilidad de la entrega y descuentos por productos y servicios no bancarios es de responsabilidad del comercio que lo ofrece, no cabiéndole responsabilidad a Bci en ello, ni en la ulterior atención que se demande. Promociones exclusivas para clientes personas naturales, pagando con Tarjeta de Crédito Bci. Se excluyen de estos beneficios a clientes de Tarjeta de Crédito Visa Corporate, Tarjetas emitidas por filiales y sociedades de apoyo al giro de Bci. Infórmese sobre la garantía estatal de los depósitos en su banco o en www.cmfchile.cl.